

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KALEHİSAR ÖREN YERİ'NDEKİ OLASI SARNIÇ YAPISININ
JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS

Elifnur BAYDIN KAVAKLI

EKİM-2025
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**KALEHİSAR ÖREN YERİ'NDEKİ OLASI SARNIÇ YAPISININ
JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF A POSSIBLE CISTERN STRUCTURE AT
KALEHİSAR RUINS USING GEOPHYSICAL METHODS**

YÜKSEK LİSANS

Elifnur BAYDIN KAVAKLI

EKİM-2025

GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**KALEHİSAR ÖREN YERİ'NDEKİ OLASI SARNIÇ YAPISININ
JEOFİZİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF A POSSIBLE CISTERN STRUCTURE AT
KALEHİSAR RUINS USING GEOPHYSICAL METHODS**

YÜKSEK LİSANS

Elifnur BAYDIN KAVAKLI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sercan KAYIN

EKİM-2025

GÜMÜŞHANE

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans olarak hazırlamış olduğum “**Kalehisar Ören Yeri’ndeki Olası Sarnıç Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kısıtlara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

14/10/2025

.....
Elifnur BAYDIN KAVAKLI

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimi hayatım süresince her türlü akademik desteği sağlayan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sercan KAYIN'a teşekkürü bir borç bilirim. Aynı zamanda Kalehisar Ören Yeri Arkeolojik kazısı, kazı başkanı Prof. Dr. Mustafa Kemal ŞAHİN'e yine kazı ekibinde olan Seçil GÖVEN'e ve tüm kazı ekibine çok müteşekkirim. Arazi çalışmalarım sırasında destek olan proje ekibinde bulunan ve İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Turgay İŞSEVEN, Arş. Gör. Dr. Nedim Gökhan AYDIN ve Arş. Gör. Orhan APAYDIN hocalarıma destekleri için çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Gümüşhane Üniversitesi - Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (GÜBAP) tarafından “24.B0126.02.01” kodu ve “**Çorum, Alaca, Kalehisar Ören Yeri'nin Arkeojeofizik Araştırması**” isimli proje ile desteklenmiştir.

Son olarak hayatım boyunca beni maddi manevi destekleyen yanımda olan annem Sevim BAYDIN ve babam İbrahim BAYDIN'a, akabinde tez sürecimde maddi manevi destek olan aynı zamanda meslektaşım ve hayat arkadaşım Mustafa KAVAKLI'ya minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Elifnur BAYDIN KAVAKLI
GÜMÜŞHANE – 2025

ÖZET

Arkeolojik kazılarda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, yeraltında gömülü bulunan yapı kalıntılarının lokasyon ve derinlik bilgilerinin tam olarak bilinmemesidir. Bu durum beraberinde hem ekonomik olarak hem de kazı süresinin artması nedeniyle kazı ekibine büyük bir yük getirmektedir. Yeryüzünden tahribatsız bir şekilde uygulanabilen arkeojeofizik yöntemler, zaman ve maliyet açısından kolaylık sağlamaktadır. Son yıllarda teknolojinin gelişimine paralel olarak alet tasarımıyla yaşanan yenilikler ve yorumlama-modelleme programlarının geliştirilmesiyle jeofizik yöntemlerin arkeolojik çalışmaların doğal bir parçası haline getirmiştir.

Bu tez çalışmasında, Çorum ili Alaca İlçesinde bulunan Kalehisar Ören Yeri araştırma sahası olarak belirlenmiştir. Kalehisar Ören Yeri'nde önümüzdeki yıllarda kazı planlaması yapılan ve eski bir sarnıç yapısının olduğu düşünülen bir sahada, jeofizik yöntemlerden, yer radarı (GPR), elektrik öz direnç tomografi (ERT), manyetik yöntemlerin kullanıldığı bir arkeojeofizik çalışma yaparak, bu alanda gömülü halde bulunan olası sarnıç yapısı ve buna bağlı yapıların tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Manyetik yöntemden güneybatı – kuzeydoğu yönelimli yaklaşık 5-8 metre genişliğinde bir yapı olduğu ve bu yapıya bağlı güneydoğu yönünde daha küçük yapılar olduğu belirlenmiştir. ERT profilleri altında gözlemlenen yapıların derinliklerinin 1.5-2 metre civarında gözlenmiş olup GPR verilerinden gözlemlenen anomalilerin 0.3 m ile 2-5 metre derinliklerinde olduğu gözlemlenmiştir. Böylece bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ile gömülü halde bulunan arkeolojik kalıntıların yerleri, yönelimleri ve derinlikleri gibi özellikleri tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasının ileride yapılması planlanan kazı çalışmasına hem ekonomik katkı hem de zamandan tasarruf sağlamak suretiyle bir yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arkeojeofizik, ERT, GPR, Kalehisar Ören Yeri, Manyetik yöntem

SUMMARY

One of the biggest difficulties encountered in archaeological excavations is the lack of exact location and depth information of the remains of structures buried underground. This situation brings a great burden to the excavation team both economically and due to the increase in excavation time. Archaeological methods that can be applied non-destructively from the surface provide convenience in terms of time and cost. In recent years, innovations in tool design and the development of interpretation-modeling programs in parallel with the development of technology have made geophysical methods a natural part of archaeological studies.

This thesis has identified the Kalehisar Archaeological Site in the Alaca District of Çorum as the research area. The aim is to conduct an archaeogeophysical study using geophysical methods, including ground penetrating radar (GPR), electrical resistivity, and magnetic methods, at a site within the Kalehisar Archaeological Site where excavations are planned for the coming years and where an ancient cistern structure is suspected. The aim is to identify a possible buried cistern structure and related structures within the site. Magnetic analysis revealed a structure approximately 5-8 meters wide, oriented southwest-northeast, and smaller structures connected to this structure to the southeast. The structures observed under ERT profiles were observed to have depths of approximately 1.5-2 meters, while anomalies observed from GPR data ranged from 0.3 meters to 2-5 meters. Thus, the results obtained from this thesis have determined the location, orientation, and depth of buried archaeological remains. It is anticipated that this thesis will guide future excavations by contributing both economically and saving time.

Keywords: Archaeogeophysics, ERT, GPR, Kalehisar Archaeological Site, Magnetic method

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	IV
TEŞEKKÜR	V
ÖZET	VI
SUMMARY.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
EKLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
1.2. Çalışmanın Kapsamı	1
1.3. Çalışmada Uygulanan Yöntemler	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. KALEHİSAR ÖREN YERİ	6
3.1. Kalehisar Ören Yerinin Önemi	6
3.2. Kalehisar Ören Yerinin Konumu	7
4. JEOFİZİK YÖNTEMLER	11
4.1. Yer Radarı Yöntemi (GPR)	11
4.1.1. Yer Radarı Yönteminin Uygulaması	11
4.2. Elektrik Özdirenç Tomografi (ERT).....	16
4.2.1. Wenner-Schlumberger Dizilimi.....	18
4.3. Manyetik Yöntem	20
4.3.1. Yer Manyetik Alanı ve Özellikleri.....	21
4.3.2. Yönlü kosinüs filtresi.....	23
4.3.3. Kutba indirgeme yöntemi	23
4.3.4. Düşey türev	25
4.3.5. Analitik sinyal.....	26
4.3.6. Tilt açısı (Tilt Türevi)	27
4.3.7. Tilt Açısının Toplam yatay Türevi (HD_TDR).....	30
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	31

6. TARTIŞMA.....	47
7. SONUÇLAR.....	50
KAYNAKÇA	51
EKLER	58
ÖZGEÇMİŞ.....	60



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Yaygın jeolojik materyallerin tipik bağıl dielektrik geçirgenlikleri (Conyers, 2012).....	13
Tablo 2. Yer materyallerinin öz direnç aralıkları (Palacky, 1987'den değiştirilmiştir).....	16



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Buluntu örneği (kaide parçası. dış yüzey koyu yeşil renkli sırlı. hatlar kazıma tekniğinde siyah renkli olarak verilmiş.)	7
Şekil 2. Kalehisar Ören Yeri'nin lokasyon haritası	8
Şekil 3. Kalehisar Ören Yeri'nin yer bulduru haritası	9
Şekil 4 Kalehisar kalesi - Anadolu Selçuklularına ait Kervansaray - Ören yeri havadan görüntüleri.....	10
Şekil 5. Yer radarı yöntemi ile veri toplanmasını gösteren blok diyagram (Daniels, 2004)	12
Şekil 6. GPR yeraltı dağılımı radargram gösterimi.....	15
Şekil 7. ERT ölçüm prensibi genel gösterimi (a-d) (Schmidt, 2013'den düzenlenmiştir)	17
Şekil 8. ERT sistematik dizilimin çok eletrotlu şematik gösterimi. Seviyeler ilerledikçe mesafenin artması gerekir. (Loke, 2013'den düzenlenmiştir)	18
Şekil 9. Wenner - Schlumber diziliminde ölçüm prensibi ve veri noktalarının konumları (Jiang vd., 2020'den düzenlenmiştir).....	19
Şekil 10. Wenner Schlumberger dizilimi için duyarlılık kesitleri. a) n=1, b) n=2, c) n=4, d) n=6 (Loke, 2013)	20
Şekil 11. Yer manyetik alanının bileşenleri	21
Şekil 12. Manyetik anomalinin kutba indirgenmiş hali ve kutba indirgenmeden önceki durumu (Blakely,1995).	24
Şekil 13. Tilt açısının geometrisi (Akın ve diğ. 2011) değiştirilmiş gösterimi.....	29
Şekil 14. Çalışma alanında yapılan jeofizik ölçümlerin profilleri. Siyah ile gösterilip P1-P33 arasındaki çizgiler manyetik ve GPR profillerini gösterirken, yeşil ile gösterilen ERT_1 ve ERT_2 isimli kalın çizgiler ERT profillerini göstermektedir.....	31
Şekil 15. Çalışma alanının Toplam manyetik alan (TMI) haritası.....	32
Şekil 16. Çalışma alanının Yönlü kosinüs filtresi uygulanmış TMI (D_COS) haritası..	33
Şekil 17. Çalışma alanının Kutba indirgeme (RTP) haritası.....	34
Şekil 18. Çalışma alanının Analitik sinyal (AS) haritası	35
Şekil 19. Çalışma alanının birinci düşey türev (VD) haritası	35
Şekil 20. Çalışma alanının Tilt açısı (TDR) haritası	36
Şekil 21. Tilt açısının yatay türev (HD_TDR) haritası	37

Şekil 22. ERT_1 profilinin görünür öz direnç, hesaplanan görünür öz direnç ve Ters çözüm modeli	38
Şekil 23. ERT_2 profilinin görünür öz direnç, hesaplanan görünür öz direnç ve Ters çözüm modeli	38
Şekil 24. ERT profillerinde gözlemlenen anomalilerin harita düzlemine aktarımı	39
Şekil 25. GPR verilerinin işlenmesi ve görüntülenmesi aşamasında yapılan veri işlem adımları	40
Şekil 26. Yer radarı derinlik kesitleri	39
Şekil 27. 1 no'lu anomalinin gözlemlendiği işaretlenen GPR profilleri	42
Şekil 28. 1 no'lu anomalinin gözlemlendiği hatların çalışma alanındaki lokasyonu	43
Şekil 29. 2 no'lu anomalinin gözlemlendiği işaretlenen GPR profilleri	44
Şekil 30. 2 nolu anomalinin gözlemlendiği hatların çalışma alanındaki lokasyonu	45
Şekil 31. 3 nolu anomalinin gözlemlendiği işaretlenen GPR profilleri	46
Şekil 32. 3 nolu anomalinin gözlemlendiği hatların çalışma alanındaki lokasyonu	46
Şekil 33. Manyetik, ERT ve GPR yöntemlerinden elde edilen anomalilerin çalışma alanındaki toplu gösterimi. Taban harita manyetik, siyah çizgiler GPR ve iki hat boyunca siyah profil çizgileri ise ERT profillerindeki anomalileri göstermektedir	47
Şekil 34. Tez kapsamında kullanılan jeofizik yöntemlerden veri işlem aşamaları sonrasında gözlemlenen anomalilerin üst üste bindirilmesi. Kesik çizgili sarı renkli olan anomaliler manyetik yöntemden elde edilen, siyah içi boş dikdörtgenler GPR yönteminden elde edilen ve iki hat boyunca farklı renkteki düz çizgi ile çevrelenen anomaliler ERT yönteminden elde edilen anomalileri göstermektedir	48
Şekil 35. Çalışma alanındaki potansiyel gömülü yapıların ve/veya binaların dağılımı. Belirleme, birden fazla jeofizik yöntemde anomali gösteren yerlerin işaretlenmesi yoluyla yapılmaktadır. Siyah çizgilere sahip poligonlar, üç yöntemde de uyumlu güçlü anomaliler gösterirken (1 ve 2 nolu anomali), soluk kesikli poligonlar (3 nolu anomali) nispeten daha zayıf anomaliler göstermektedir	49

EKLER DİZİNİ

Ek 1. Tez kapsamında yapılan arazi çalışması sırasında çekilen fotoğraflar	56
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	:mesafe
B	:Manyetik akı
C	:Akım elektrotu
D	:Sapma açısı
EM	:Elektromanyetik
ERT	:Elektrik özdirenç tomografi
f	:Mıknatıslanmayı çevreleyen alan
F	:Yer manyetik alanının toplam alan vektörü
GPR	:Yer radarı
H	:Yer manyetik alanın yatay bileşen vektörü
I	: Akım
İ	:Eğim açısı
J	:Mıknatıslanma şiddeti
k	:Süseptibilite
m	:Mıknatıslanma
M	:Manyetik moment
Mhz	:Yer radarı manyetik nüfus derinlik birimi (Megahertz)
n	:seviye
nT	:Yer manyetik alanı siddet birimi (nanotesla)
P	:Potansiyel elektrotu
R	:Direnç
RDP	:Bağıl dielektrik geçirgenlik
U	:Manyetik potansiyel
x	:Yer manyetik alanının kuzey bileşen vektörü
y	:Yer manyetik alanının doğu bileşen vektörü
z	:Yer manyetik alanın düşey bileşen vektörü
ΔV	:Potansiyel fark
θ	: Tilt açısı
θ_f	: Manyetik faz açısı
θ_m	: Mıknatıslanma açısı
μ	:Manyetik geçirgenlik
ρ	:Yoğunluk

Ω	:Ohm
ΔT	:Anomali
ρa	:Görünür özdirenç



1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Arkeojeofizik yöntemler, arkeolojik bir sahada gömülü halde bulunan nesne ve/veya yapıların doğrultu, derinlik, uzanım gibi lokasyon bilgilerinin yüzeyden tahribatsız bir şekilde bulunmasını sağlamaktadır. Bu tez çalışmasının amacı da Kalehisar Ören Yeri'nde bulunan bir sahada bulunduğu düşünülen arkeolojik sarnıç yapısının konumu derinliği uzanımı vb. bilgilerin yüzeyden yapılacak arkeojeofizik yöntemler ile tahribatsız bir şekilde tespit etmektir. Böylece ilerleyen yıllarda yapılacak olan kazı çalışmalarına ışık tutacak, gün yüzüne çıkarılmayı bekleyen tarihi değeri olan sarnıç yapısına ve olası arkeolojik nesnelere tahribatsız şekilde yapı bütünlüğünün bozulmadan ulaşılmasına yol gösterici olması amaçlanmaktadır.

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Kalehisar Ören Yeri, Çorum ili Alaca ilçesi Mahmudiye Köyü yakınlarında bulunan ve geniş bir alana yayılmış bir sit alanı içerisinde bulunmaktadır. Tez konusu olarak seçilen çalışma sahası ise bu sit alanı içerisinde, kazı ekibi tarafından var olduğu düşünülen arkeolojik su sarnıcının bulunduğu 45 x 30 metre ebatlarında bir alanda yer almaktadır. Çalışma sahasında arkeojeofizik yöntemlerden manyetik, elektrik rezistivite tomografi (ERT) ve yer radarı (GPR) yöntemleri uygulanarak, gömülü halde olduğu düşünülen sarnıç yapısı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu yüksek lisans çalışması, tez danışmanının yürütücü olduğu, Gümüşhane Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminde bulunan GÜBAP 24.B0126.02.01 kodlu ve “Çorum, Alaca, Kalehisar Ören Yeri'nin Arkeojeofizik Araştırması” başlıklı projesi kapsamında bulunduğundan sahada yapılan arazi çalışmalarının bir kısmı yüksek lisans öğrencisi Elifnur Baydın Kavaklı'nın da katılımı ile 2024 yılı Ağustos ayında yapılmıştır.

Yapılan arazi çalışmasında elde edilen manyetik verilere kutba indirgeme ve düşey türev yöntemleri gibi spektral analiz çalışmaları uygulanmış olup, anomaliler ve bu anomalilere sebep olan kaynak üzerine incelenmiştir. Elektrik rezistivite tomografi yöntemi ile elde edilen veriler değerlendirilerek bu sarnıca uzanan arkeolojik yapıların konumları ve lokasyonları, öz direnç farklarıncı saptanmaya çalışılmıştır. Yer radarı yöntemi ile de yeraltındaki gömülü yapılar belirlenerek diğer iki yöntem sonuçları ile

karşılaştırılmış olup, böylece üç farklı jeofizik yöntem kullanılmasının akabinde, hata payının en aza düşürüleceği öngörülmüştür.

1.3. Çalışmada Uygulanan Yöntemler

Yüksek lisans tezine konu olan sahada uygulanacak jeofizik yöntemler; yer radarı (GPR), elektrik rezistivite tomografi (ERT) ve manyetik yöntemlerdir. ERT çalışmaları 48 kanallı elektrik rezistivite cihazı kullanılarak, elektrot aralıkları 1 metre olacak şekilde 2 profil ERT ölçümü alınmıştır. ERT verisi alımı her iki profile de Wenner - Schlumberger dizilimi kullanılarak yapılmıştır. Proton manyetometresi kullanılarak, toplam alan manyetik ölçümleri yerden 1 metre yukarıdan ve profiller arası 1 metre ve profil içi ölçüm aralıkları 1 metre olacak şekilde ölçülmüştür. Çalışma alanı civarında seçilecek baz noktası 1 saat ara ile periyodik ölçümler alarak baz düzeltmesi grafiği hazırlanıp akabinde ham verilere baz düzeltmesi uygulanmıştır. Böylece tez çalışması için seçilen sahanın iki boyutlu manyetik haritası hazırlanmış olup, Sonrasında Toplam alan manyetik verilerine ileri spektral analiz veri işlem adımları (kutba indirgeme (RTP) ve birinci düşey türev, analitik sinyal, tilt açısı vb,) uygulanmıştır.

Toplam alan manyetik ölçümlerinin yapıldığı profillerde 1 metre profil aralıkları ile 500 mHz antenle yer radarı (GPR) ölçümleri alınmıştır. Elde edilen bu veriler ile kat haritaları oluşturulmuştur. Yüzeyden uygulanan arkeojeofizik yöntemler yapıyı tahrip etmeden, yeraltında olası gömülü yapı hakkında daha detaylı bilgiye erişilmesine olanak sağlamıştır.

2.LİTERATÜR ÖZETİ

Jeofizik yöntemlerin dünyada ve ülkemizde gömülü arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılmasında kullanımı günümüze kadar birçok çalışmada uygulanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Arkeolojik araştırmalarda uygulanan jeofizik yöntemler, arkeojeofizik yöntemler olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemlerden yararlanılarak tarihi değeri olan gömülü yapıların, tespit edilerek, tahrip edilmeden arkeolojik kazılarda gün yüzüne çıkarılmasına katkı sağlanmıştır.

1946 yılında yapılan elektrik öz direnç çalışması, jeofizik yöntemlerin arkeolojik kalıntıların araştırılmasında uygulanan ilk çalışma olarak bilinmektedir (Atkinson, 1952). Ardından manyetik çalışmaların da arkeolojik alanların belirlenmesinde kullanıldığı gözlenmiştir. Jeofizik yöntemlerden elektrik öz direnç yöntemi (ERT) yeraltı yapılarının belirlenmesinde yıllardır kullanılan etkili bir elektrik yöntemidir. ERT yöntemi ilk olarak Wenner tarafından 1915 yılında uygulanmış olup, Schlumberger tarafından geliştirilmesi 1920 yılına dayanmaktadır. Teknoloji ve bilgisayar sistemlerinin gelişmesiyle ERT değerlendirmelerinin, tek boyut öz direnç değişimlerinin düşey elektrik sondajı (DES) olarak değerlendirilmesi, zaman içinde iki ve üç boyutlu olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Yer radarı yöntemi de elektrik öz direnç ve manyetik yöntemlerinin ardından arkeolojik sahalarda gömülü halde bulunan yapı kalıntılarının belirlenmesi için kullanılmıştır (Vaughan, 1986). İtalya'nın Napoli şehrinde bulunan Cimitero delle Fontanelle mağarasında kaya boşluğunun sınır yapısının belirlenmesi amacıyla yer radarı ve elektrik öz direnç çalışmaları yapılmış, mağaradaki düşük dayanım noktaları modellenmiştir (Di Santalo vd., 2016). Pompeii yakınlarında bulunan Stabiae'de gerçekleştirilen GPR ve ERT yöntemleri ile yer altında bir tünel tespit edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen verilerde, yapıda meydana gelen sorunlara kaynak olarak şiddetli yağışlar olarak belirlenmiştir (Ogden vd., 2012).

Neubauer vd. (2002), GPR, Manyetik ve ERT yöntemlerini kullanmış, arkeolojik bir alanda bulunan bir villanın detaylarını karşılaştırmalı olarak tespit etmiştir. Murdie vd. (2003), GPR, Manyetik ve ERT yöntemlerini kullanarak arkeolojik bir sahada hendek tespiti yapmıştır. Poros antik kentinde Papadopoulos vd. (2006) GPR, Manyetik ve ERT yöntemlerini bütünleşik olarak kullanmıştır. Drahor (2006), manyetik ve ERT yöntemleri ile birlikte VLF ve sismik yöntemleri de arkeolojik bir sahada kullanmıştır (Drahor, 2006). Sünbül (2007), yaptığı yüksek lisans çalışmasında Balıkesir-Burhaniye ve Ören'de manyetik ve elektrik yöntemlerini kullanarak antik çağa ait bir yapı bulmuştur (Sünbül,

2007). Drahor vd. (2008) Zeugma’da Manyetik ve ERT yöntemlerini kullanmış, 2011 yılında İzmir Agios Voukolos kilisesinin etrafında ve içerisinde jeofizik ölçümler almıştır (Drahor vd., 2008; Drahor vd. 2011). Kayın (2010), Uşak ili Banaz ilçesinde bulunan Akmonia antik kentinde farklı alanlarda manyetik gradyan ve süseptibilite ölçümleri almış ve yüksek lisans tezi kapsamında olası gömülü nesneleri tespit etmeye çalışmıştır. Drahor vd. (2015) Çorum ilinde bulunan ve Hitit İmparatorluğu'nun şehirlerinden birisi olan Şapinuwa’daki arkeolojik sit alanında jeofizik çalışmalar ile Taşdöşem alanı içindeki gömülü yapıları belirlemek için bir çalışma yapmıştır. Bu doğrultuda çoklu jeofizik yöntemler uygulanmış ve gömülü yapı kalıntılarının konumlarını belirlemiştir. Ullrich vd. (2016), manyetik, ERT ve GPR yöntemlerini bronz ve demir çağ yaşlı farklı niteliklere sahip yapı ve nesnelerin tespitinde kullanmıştır. Fernández-Álvarez vd. (2017) GPR ve ERT yöntemleri ile Pancorbo Kalesi köyünde bir arkeojeofizik çalışma yapmıştır.

Arkeolojik kazılar bağlamında, yanmış tuğla duvarlar, seramikler, mezarlar ve fırınlar gibi önemli mıknatıslanma alanlarının belirlenmesinde manyetik yöntem sıklıkla kullanılır (Büyüksaraç vd., 2006; Kaya vd., 2007; Schmidt, 2007). ERT yöntemi, kısa bir zaman diliminde birden fazla ölçüm alabilen çoklu elektrot dizileriyle değişen derinliklerdeki karmaşık arkeolojik kalıntıların görüntülenmesi ve haritalanması için yaygın olarak kullanılmıştır (Abouarab vd., 2024; Akca vd., 2019; Drahor vd., 2008, 2011; Karaaslan ve Karavul, 2018). GPR yöntemi, diğer jeofizik yöntemlere kıyasla saha çalışması sırasında daha az çabayla yeraltının yüksek çözünürlüklü görüntülerini sağlayan, sığ derinliklerdeki arkeolojik yapıların görüntülenmesinde en sık kullanılan jeofizik yöntemlerden bir diğeridir (Balkaya vd., 2018; Casas vd., 2018; Küçükdemirci vd., 2017).

Küçükdemirci (2014), Aizanoi antik kenti ile Heraio Teichos Akrapolünde manyetik ve GPR yöntemlerini uygulamıştır. Ekinci vd. (2014), Amorium antik kentinde manyetik ve ERT ölçümleri almıştır. Zorlu (2017); Olba antik kentinde Dipol-Dipol elektrot dizilimi kullanılmış, gömülü yapıları tespit etmiştir. Balkaya vd. (2018), Pisidian antik kentinde GPR ve rezistivite yöntemlerini uygulamış, olası arkeolojik yapı kalıntılarını başarılı bir şekilde tespit etmiştir. Yılmaz vd. (2018); Isparta ili Kılıç köyünde GPR ve rezistivite yöntemleri ile arkeolojik yapı kalıntılarını tespit ederek arkeolojik kazı için öneride bulunmuştur. Ünyay (2019); Aediculus Bazilikası’nın içerisinde ve çevresinde ERT ve GPR yöntemlerini uygulamıştır. Akça vd. (2019). Antalya’da GPR ve ERT yöntemleri ile antik şehrin mimarisini tekrardan oluşturmayı başarmıştır. Avcı (2022) Çift Yatay Halka Elektromanyetik yöntem ve 3 boyutlu ERT yöntemlerini kullanarak gömülü yapıları belirlenmeye çalışmıştır. Sağın (2022), Hodul Dağı Ören

mevkiinde GPR ve ERT yöntemlerini kullanmış ve çalışma alanındaki gömülü yapı kalıntılarını belirlemiştir. Burdur, Hacılar Büyük Höyük'te jeofizik, jeomorfoloji ve insanız hava aracı ile görüntüleme çalışmalarında Özdoğru vd. (2022), gömülü yapıların konumlarını belirlemiştir. Sillyon antik kentinde bulunan arkeolojik yapıların araştırılması için Erçetin (2023), manyetik ERT ve GPR yöntemlerini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kayın vd. (2025), Kalehisar Arkeolojik Alanı'nda yapmış oldukları arkeojeofizik çalışmada manyetik, ERT ve GPR yöntemlerini kullanarak aktif kazı alanı, Kalehisar Medresesi ve Kalehisar Külliyesi arasında kalan üç saha gömülü arkeolojik yapı kalıntılarını belirlemiştir.



3.KALEHİSAR ÖREN YERİ

Çorum'un Alaca ilçesi Mahmudiye Köyü sınırlarında bulunan alan, Cumhurbaşkanlığı kararıyla “Kalehisar Ören Yeri” olarak isimlendirilmiş, 2021 yılında arkeolojik kazı çalışmaları başlatılmıştır. Kazı başkanlığını Aydın, Adnan Menderes Üniversitesi, İnsan Ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Sanat Tarihi Bölümü, Türk Ve İslam Sanatları Anabilim Dalı Öğretim üyesi, Prof. Dr. Mustafa Kemal Şahin üstlenmektedir.

3.1. Kalehisar Ören Yerinin Önemi

Kalehisar Ören Yeri, Orta Karadeniz coğrafyasında ve Anadolu Selçuklu kentsel planlama geleneğinde önemli veriler sunan çok katmanlı bir arkeolojik yerleşimdir. Alanda medrese, han/kervansaray, hamam, mezarlık ve çini fırını gibi farklı işlevlere hizmet etmiş yapılar bir arada bulunmuş; bu çeşitlilik, kentin dönemin önemli merkezlerinden biri olduğuna işaret etmektedir.

Kazı koşullarında han veya saray işlevi taşıdığı değerlendirilen bölümlerin gün yüzüne çıkması, hem buranın bir yerleşim alanı olarak önemini hem de ileri dönem araştırmaların odak noktasını belirlemesi bakımından hayati bir gelişmedir. Buluntular arasındaki çini, sırlı ve yüksek kalitede seramik örnekleri, yapı topluluğunun estetik ve teknolojik düzeyini gösterirken; moloz taş ve kırma taşın dönüşümlü kullanıldığı duvar örgü tekniğinin hem medrese hem de han yapılarda benzer şekilde uygulanması, bu iki yapının mimari ilintisinin altını çizmektedir. İlerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek kazı ve analizler, bu ortak işçilik izleri sayesinde yapıların özgün işlev ve kullanım biçimlerini daha net ortaya koyabilecektir. Çalışma süreci içerisinde; gerek kazı sırasında gerekse değişik yerlerden elde edilen seramik, sırlı tuğla ve çiniler ile sikkelerin çizim ve fotoğrafları çekilerek belgelendirilmesi yapılmıştır (Şekil 1). Çalışma bitiminde, daha sonra çalışmaları yapılmak üzere kazılarda çıkarılan buluntular müze müdürlüğüne teslim edilmiştir (Şahin vd.,2021).



Şekil 1. Buluntu örneği (kaide parçası. dış yüzey koyu yeşil renkli sırlı. hatlar kazıma tekniğinde siyah renkli olarak verilmiş.)

Kaledeki düzenin yaklaşık 500 metre güneydoğusunda, ayakta kalmayı başarmış yüksek beden duvarlarıyla tanınan bir medrese kalıntısı yer alır. Tarihlendirme kaynakları tam olarak netlik kazandırmasa da, eserin Selçuklu ve Beylikler dönemine tarihlenebilecek özellikler taşıdığı kabul edilmektedir. 1965–1966 yıllarında Prof. Dr. Oktay Aslanapa'nın yaptığı kazı çalışmaları, buradaki yapı topluluğunun plan şemalarını belirlemiş; Hüsamiye Medresesi olarak anılan yapı, kareye yakın formu ve iki eyvanlı düzeniyle moloz taş örgü örneği sergilemiştir.

Medresenin güneydoğusunda dört eyvanlı, kare planlı ve sıcaklık-külhan bölümleri tespit edilen hamam, batı yönde yalnızca temelleri kalmış bir han, kuzeyde ise günümüze tek kemeri ulaşmış kare planlı bir türbe ortaya çıkarılmıştır. Birbirini bütünleyen medrese, hamam, han ve türbe gibi yapılar, müessese yapısına karşılık gelen “külliye” kavramını akla getirir. Bu bileşim, o dönemde bölgenin hem sosyal hem de ekonomik açıdan büyük bir yerleşme odağı olduğunu göstermektedir (Şahin, 2018). Türkiye genelindeki Selçuklu dönemi yerleşim ve mimari örnekleriyle karşılaştırıldığında, Kayseri Keykubadiye ve Konya Kubad Abad saray kazılarındaki buluntularla kurduğu paralellikler, Kalehisar Ören Yeri'nin Çorum ilinin kültürel mirası ve bölgesel turizme sağlayacağı katkının altını çizmektedir.

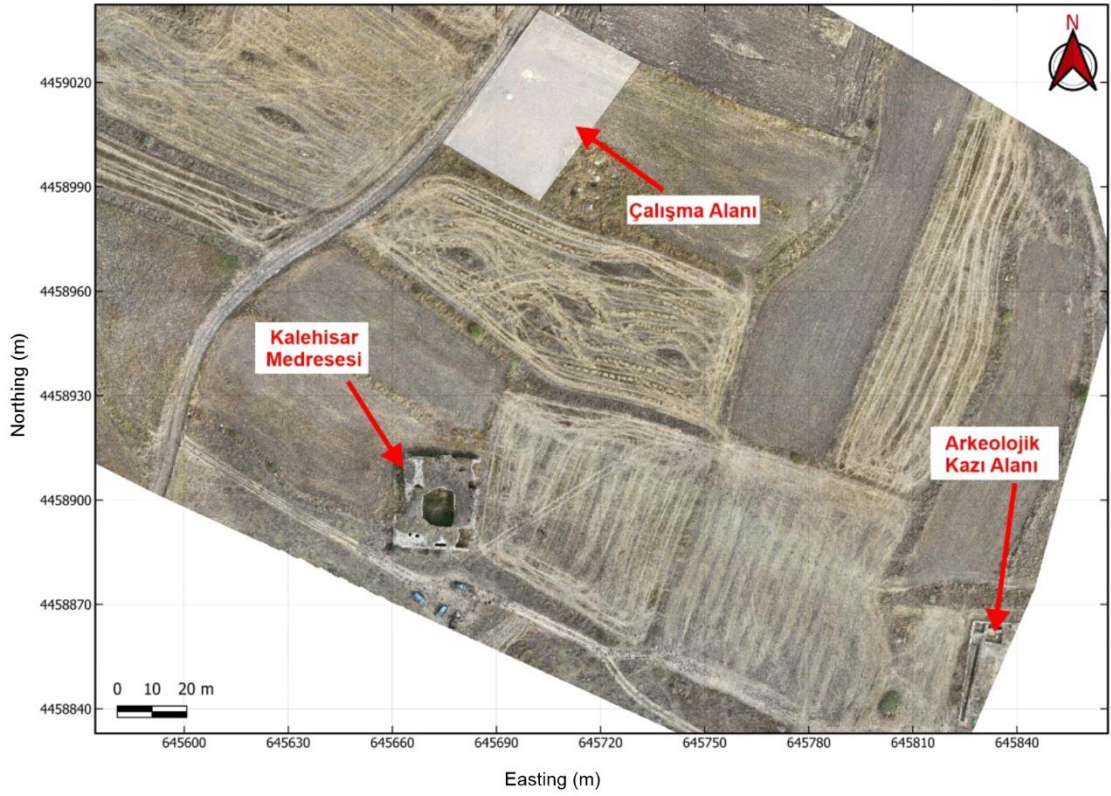
3.2. Kalehisar Ören Yerinin Konumu

Kalehisar Ören Yeri, Çorum ilinin Alaca ilçesine bağlı Mahmudiye Köyü (Çerkez Kalehisarı) sınırlarında, Kaletepe Mevkii'nde yer almaktadır (Şekil2). Arkeolojik açıdan oldukça zengin bir alan olan bu bölge, farklı dönemlere ait birçok medeniyetin izlerini barındırmaktadır. Köyün yaklaşık 1 kilometre batısında bulunan, iki kola ayrılan ve ortalama 100 metre yüksekliğe, 150 – 200 metre çapa sahip olan tepe, üzerinde

barındırdığı kalıntılarla dikkat çekmektedir. Söz konusu tepenin çeşitli noktalarında eski uygarlıklara ait yapısal izler hâlâ gözlemlenebilir durumdadır. Tepenin güney yamacına merdivenle ulaşılabilir durumdadır. Batı kısmında ise Hitit tanrılarına ithaf edildiği düşünülen bir sunak yapısı yer almaktadır. İki bölümlü olarak inşa edilen bu sunağın sağ kısmı daha yüksek bir kotta yer almakta; bu bölümde dört basamak ile birer put ve aslan kabartmaları bulunmaktadır. Üçüncü basamakta yer alan iki aslan figürü zaman içerisinde ciddi biçimde tahrip olmuş, baş kısımları tamamen yok olmuştur. Aynı basamak üzerinde yer alan bir Frigçe yazıt da alanda dikkat çeken önemli unsurlardandır. Sunağın sol bölümü, sağ tarafa kıyasla daha alçak bir düzlemde yer alır ve bir tezgâh biçiminde düzenlenmiştir. Tezgâhın arkasındaki doğal kaya kütlesi, oturmak veya sırt yaslamak amacıyla oyulmuş bir forma sahiptir. Bu bölümde ayrıca kayaya oyulmuş iki aslan heykeli bulunmaktadır; fakat bunların da yalnızca gövde kısımları günümüze ulaşabilmiştir, başları tahrip edilmiştir. Sunağın güneybatı kenarından yaklaşık 3 ila 5 metre aşağıda, bir su kuyusuna ve onunla bağlantılı olduğu anlaşılan, tepenin güney yamacına paralel biçimde uzanan su arki kalıntılarına ulaşılmaktadır. Kuzey yamaçta ise zirve noktasında kare planlı bir yapıya ait, moloz taş temeller üzerine kurulmuş kalıntılar yer almaktadır (Şekil 3). Güney yamaçta da benzer yapısal özelliklere sahip iki farklı yapı kalıntısına rastlanmıştır. (Şahin vd.;2021)



Şekil 2. Kalehisar Ören Yeri'nin lokasyon haritası



Şekil 3. Kalehisar Ören Yeri'nin yer bulduru haritası

Kalehisar Ören Yeri, Hitit, Frig, Doğu Roma (Bizans), Selçuklu ve Beylikler gibi pek çok uygarlığa ait arkeolojik izleri bir arada sunan nadir alanlardandır. Bu alan ilk olarak 1936 yılında, Alacahöyük kazılarına eş zamanlı olarak Koşay (1936) tarafından incelenmiştir. Kaleye yaklaşık 500 metre mesafede, güneydoğu doğrultusunda yer alan ve yüksek duvarları hâlâ ayakta duran bir medrese kalıntısı günümüze kadar ulaşmıştır. Yapının inşa tarihi kesin olarak belirlenememiştir de, Selçuklu ve Beylikler dönemlerine ait mimari özellikler taşıdığı yönünde değerlendirmeler mevcuttur. 1965–1966 yıllarında Prof. Dr. Oktay Aslanapa'nın başkanlığında gerçekleştirilen arkeolojik kazı sonucunda, bu medreseye ait plan şeması belirlenmiş olup; yapı, "Hüsamiye Medresesi" olarak tanımlanmıştır (Şekil.4). Kareye yakın bir plana sahip olan ve iki eyvanlı olarak inşa edilen medrese, moloz taş kullanılarak inşa edilmiştir. Medresenin güneydoğusunda sıcaklık ve külhan bölümleriyle birlikte dört eyvanlı, kare plana yakın bir hamam yer alırken; batısında sadece temelleri kalmış bir han (veya kervansaray) ve kuzeyinde günümüzde yalnızca kemer kısmı ayakta kalmış kare planlı bir türbe tespit edilmiştir. Bu yapı grubu, dönemin sosyal ve mimari düzenini yansıtmaları bakımından büyük bir arkeolojik ve tarihi değere sahiptir (Şahin vd., 2021).



Şekil 4. Kalehisar kalesi - Anadolu Selçuklularına ait Kervansaray - Ören yeri havadan görüntüleri

4. JEOFİZİK YÖNTEMLER

4.1. Yer Radarı Yöntemi (GPR)

Yer radarı teknolojisinin ortaya çıkışı, 1886 yılında Heinrich Rudolf Hertz'in elektromanyetik dalgaların hem yayıldığını hem de çeşitli yüzeylerden yansıdığını deneysel olarak göstermesiyle temellenmiştir. Elektromanyetik dalgaların uzak mesafedeki metal objeleri tespit edebilme potansiyeli, 1904 yılında Hülsmeyer'in geliştirdiği ilk RADAR (Radio Detection and Ranging) sistemi ile uygulamalı bir örnek bulmuştur. Ancak yer altına gömülü cisimlerin saptanmasına yönelik radar teknolojisinin kullanımı, bu gelişmeden yaklaşık altı yıl sonra, Leimbach ve Löwy tarafından geliştirilen ve Almanya'da patentlenen sistemle ilk kez gündeme gelmiştir. Bu patent, yer altı radarının (Ground Penetrating Radar - GPR) teorik ve teknik temellerinin atıldığı dönüm noktalarından biri olmuştur.

4.1.1. Yer Radarı Yönteminin Uygulaması

Yer radarı sistemleri, yalnızca jeofiziksel ve mühendislik uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda kültürel mirasın korunmasına yönelik çalışmalarda da önemli rol oynamaktadır. Bu bağlamda GPR teknolojisi, 1970'li yıllardan itibaren arkeolojik araştırmalarda da kullanılmaya başlanmış ve geçen zaman içinde bu alanda vazgeçilmez bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle gömülü yapıların, mezarların, eski yol ağlarının ve duvar kalıntılarının tespitinde sağladığı başarılı sonuçlar, GPR'ı arkeolojik jeofizik çalışmaların temel araçlarından biri haline getirmiştir. Conyers (2012)'in aktardığına göre, bu teknoloji arkeolojik alanda kullanılan en karmaşık ve sofistike yöntemlerden biridir. GPR, elektromanyetik dalgalar yardımıyla yer altındaki farklı malzeme türleri ve yapıların yansıtma özelliklerine göre detaylı analiz yapma imkânı sunar. Bu özellik, arkeolojik sit alanlarında kazı yapmadan önce yapılacak ön değerlendirme süreçlerinde özellikle önemlidir. Hem zaman hem de maliyet açısından avantaj sağlayan GPR, aynı zamanda alanın korunmasına da katkı sunmaktadır.

Teknik olarak bakıldığında, GPR sistemleri elektromanyetik (EM) sinyaller yayarak çalışır. Bu sinyallerin frekans aralığı genellikle 10 ila 1500 MHz arasında değişmektedir. Bu geniş frekans aralığı, yaklaşık olarak 30 metre ile 18 santimetre arasında dalga boylarına karşılık gelir. Söz konusu frekanslar, elektromanyetik spektrumun televizyon yayınları, FM radyo, cep telefonu sinyalleri gibi günlük yaşamda

Tablo 1. Yaygın jeolojik materyallerin tipik bağıl dielektrik geçirgenlikleri (Conyers, 2012)

Materyal	RDP
Hava	1
Kuru kum	3-5
Kuru silt	3-30
Buz	3-4
Asfalt	3-5
Volkanik kül/pomza	4-7
Kireçtaşı	4-8
Granit	4-6
Donmuş tabaka	4-5
Kömür	4-5
Şeyl	5-15
Kil	5-40
Beton	6
Doygun silt	10-40
Kuru kumlu kıyı arazisi	10
Ortalama organik açıdan zengin yüzey toprağı	12
Bataklık veya ormanlık alan	12
Organik açıısından zengin tarım arazisi	15
Doygun kum	20-30
Tatlı su	80
Deniz suyu	81-88

Bu bağlamda, zemin içerisindeki nem miktarı, mineraloji, tane boyutu dağılımı ve gözeneklilik gibi fiziksel değişkenler, özellikle elektrik iletkenliği üzerinde belirleyici etkilere sahiptir. Yüksek nem oranına sahip, özellikle kil mineralleri içeren ortamlar, radar dalgalarının zayıflamasına neden olarak sinyalin derine nüfuz etmesini sınırlar. Bu tür zeminlerde elektromanyetik enerji, su molekülleri tarafından emilir ve bu da GPR sinyalinin etkinliğini ciddi şekilde azaltır.

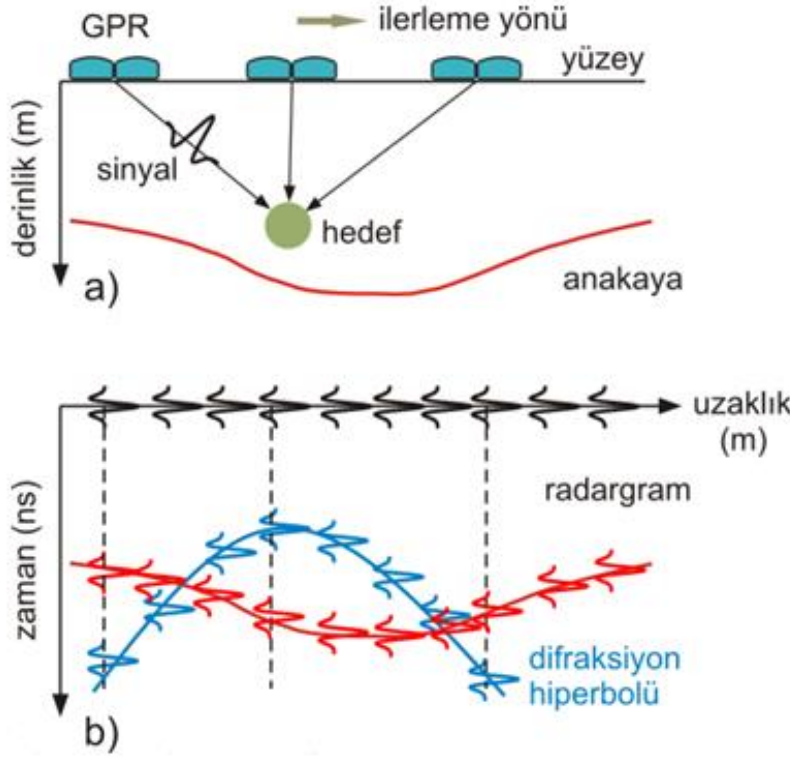
Radar sinyallerinin yayılımı sürecinde karşılaşılan bir diğer önemli etken, zemin içerisindeki malzeme geçişleri arasında oluşan dielektrik kontrasttır. Eğer zemin içerisindeki iki farklı katman ya da gömülü yapı arasında belirgin bir dielektrik farkı varsa, radar sinyali bu sınır yüzeyden güçlü bir şekilde yansır ve geri dönen sinyal, alıcı

anten aracılığıyla kolaylıkla tespit edilebilir. Bu tür yüksek kontrastlar, yer altındaki hedeflerin konumlarını, derinliklerini ve sınırlayıcı geometrik yapılarını daha net şekilde ortaya çıkarmaya yardımcı olur. Buna karşın, dielektrik sabitleri birbirine yakın olan malzeme çiftleri arasında ise yansıma miktarı oldukça sınırlı kalır; bu da hedef yapıların tespit edilebilirliğini düşürür ve sinyalin bu bölgeden sönümlenerek geçmesine neden olur.

Radar sinyalinin yayılımı esnasında yaşanan enerji kaybı, yani sinyalin sönümlenmesi (attenuation), sinyalin ortamda ilerlerken maruz kaldığı emilim ve saçılma etkileri sonucunda meydana gelir. Elektromanyetik dalgalar, özellikle yüksek iletkenlik gösteren tuzlu su, metal parçacıkları, kil mineralleri veya organik maddece zengin toprak gibi ortamlarda hızla zayıflar. Bu tür ortamlar, radarın derinlik kapasitesini ciddi oranda düşürerek sadece yüzeye yakın anomalilerin tespitine olanak tanır. Bu nedenle saha çalışmaları öncesinde zemin özelliklerinin laboratuvar ortamında ya da yerinde ölçülerek analiz edilmesi, radar sisteminde kullanılacak frekansın belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Radar sistemlerinde kullanılan frekansın büyüklüğü ile algılanabilir derinlik arasında doğrudan bir ters orantı söz konusudur. Yüksek frekanslı antenler (örneğin 900 MHz ve üzeri), yüzeye yakın ve küçük ölçekli hedefleri yüksek çözünürlükle görüntüleyebilirken, daha derin yapılar için düşük frekanslı antenler (örneğin 100-200 MHz) tercih edilmektedir. Ancak düşük frekanslar daha düşük çözünürlük sunar. Dolayısıyla, hedeflenen derinlik ve çözünürlük arasında optimum bir denge sağlamak gerekmektedir. Ayrıca, radar sinyalinin toprak içerisindeki yolculuğu boyunca uğradığı her bir fiziksel değişim, sinyalin frekansı, genliği ve zamanlama özelliklerinde değişime yol açmaktadır. Bu nedenle, yansıyan sinyalin süresi (two-way travel time) ve genliği, hedefin hem derinliğinin hem de fiziksel yoğunluğunun belirlenmesinde önemli ipuçları sunar. Özellikle radar yansımalarının zamansal süresi, sinyalin geldiği derinliği gösterirken; sinyalin genliği, yansımanın şiddeti ve hedef ile çevresindeki ortam arasındaki fiziksel farkı tanımlamaktadır (Şekil 6). Yüksek genlikli yansımalar, genellikle metalik cisimler ya da hava boşlukları gibi büyük dielektrik kontrastlara sahip yapılar tarafından oluşturulur. Buna karşılık, daha homojen ortamlar, daha düşük genlikli ve yayvan yansımalar üretmektedir. GPR sistemlerinin etkinliği yalnızca kullanılan donanımın teknik özelliklerine değil, aynı zamanda ölçüm yapılacak ortamın fiziksel ve kimyasal karakteristiklerine de bağlıdır. Veri kalitesinin artırılması, sinyal kayıplarının en aza indirilmesi ve yer altındaki yapıların doğru şekilde modellenebilmesi için, arazi özelliklerinin önceden değerlendirilmesi, anten frekansının doğru seçilmesi ve veri

analizinde uygun algoritmaların kullanılması gereklidir. Bu bağlamda, GPR sistemlerinin sunduğu yüksek çözünürlüklü yer altı görüntüleme yeteneği, jeoteknik mühendislikten çevresel araştırmalara, arkeolojiden güvenlik uygulamalarına kadar pek çok disiplinde değerli bir araç olarak önemini her geçen gün artırmaktadır.



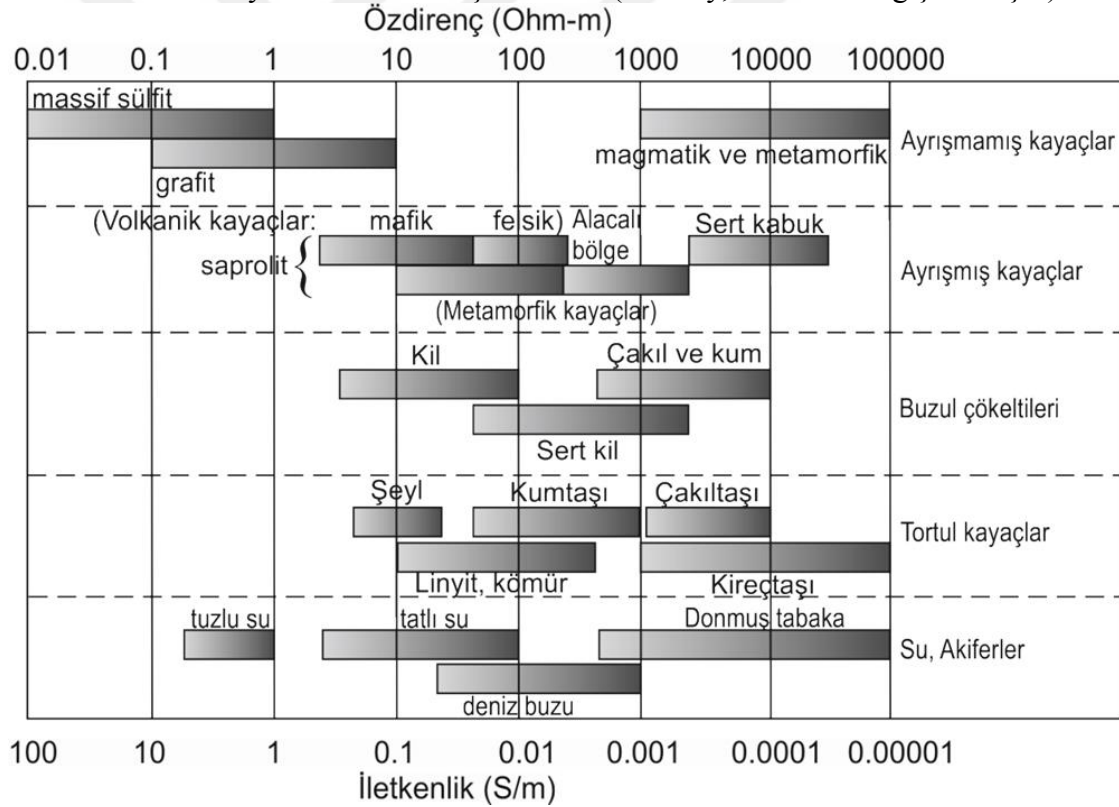
Şekil 6. GPR yeraltı dağılımı radargram gösterimi

GPR teknolojisi, yer altındaki arkeolojik yapıların ve kazı alanlarının stratigrafik ilişkilerini doğru şekilde ortaya koymada sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle antik mezar çukurları, yapı temelleri, kalıntı birikintileri, taş duvarlar ve benzeri yapılar, GPR yöntemleri açısından oldukça uygun örnekler teşkil eder. Roma dönemine ait arkeolojik alanların haritalanması ise, bu teknolojinin uzaktan algılama kapasitesini gösteren en temel uygulamalardan biri olmuştur. Toprak altında bulunan ve hasar görmüş yapılara ait temeller ile duvarlar, GPR sayesinde genellikle belirgin yansıma farklarıyla kolayca tespit edilip haritalanabilmektedir.

4.2. Elektrik Özdirenç Tomografi (ERT)

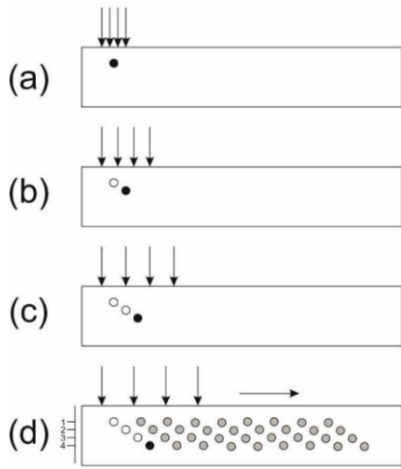
Elektrik özdirenç yöntemleri, yer altındaki malzeme dağılımını temsil eden özdirenç profilini ortaya koymakta önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntemin etkin kullanılabilmesi için, araştırma yapılan sahadaki farklı zemin ve kayaç türlerinin özdirenç değerlerinin bilinmesi gerekir. Böylece elde edilen özdirenç verileri, jeolojik bilgilerle bütünleştirilerek, yer altı yapısının daha anlaşılır ve görsel bir modeline dönüştürülebilir. Yeraltı materyallerinin özdirenci oldukça geniş bir aralıkta değişim gösterebilir; bu değerler 0.01 ohm-m'den başlayıp birkaç yüz kiloohm-m'ye kadar çıkabilmektedir. Bu farklılıklar, hedeflenen yapılar ile onları çevreleyen ana kayaçlar arasında belirgin özdirenç kontrastlarının oluşmasına neden olur. Bu nedenle, özdirenç dağılımlarının jeolojik bir yapıya dönüştürülmesi, hem yorumlamayı kolaylaştırır hem de sahaya ilişkin daha net sonuçlar sunar.

Tablo 2. Yer materyallerinin özdirenç aralıkları (Palacky, 1987'den değiştirilmiştir)



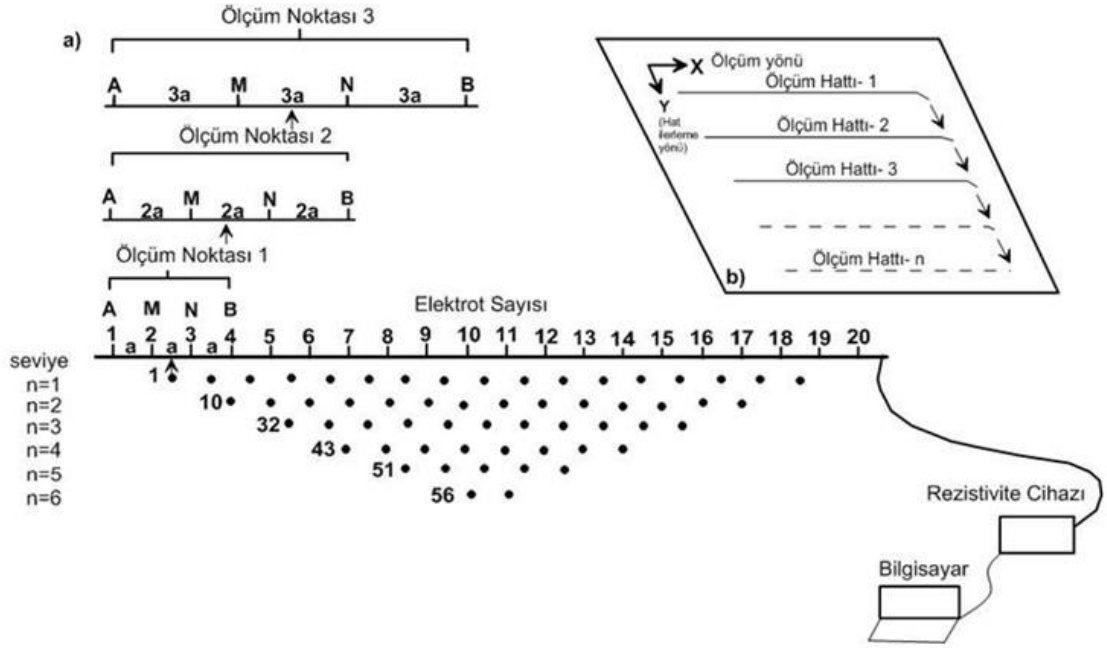
ERT tekniği özellikle 1980'lerin sonları ile 1990'lı yıllarda önemli bir gelişme süreci yaşamıştır. Bu gelişmeler sonucunda, elektriksel verilerin yeraltı görüntülemesinde kullanımı daha güvenilir ve ayrıntılı hale gelmiştir. Tomografik ters çözüm yöntemi, klasik eğri uydurma ya da kesit çizme yaklaşımlarına kıyasla çok daha doğru ve detaylı veriler elde edilmesine imkân tanımaktadır (Daily vd., 2004). ERT sistemi, oldukça geniş

alanlara uygulanabilir nitelikte olup, geleneksel toprak direnç ölçümlerinde kullanılan ekipmanlarla benzer şekilde kurulabilir. Bu yöntemde, dört adet elektrot yardımıyla toprağa elektrik akımı verilir ve oluşan potansiyel farkı ölçülerek direnç değeri hesaplanır. Ölçüm derinliğini ve alanını genişletmek için elektrotlar iki şekilde düzenlenebilir (Şekil 7). İlk yöntemde, her yeni ölçümde elektrotlar merkezden dışa doğru eşit aralıklarla genişletilir. İkinci yöntemde ise, sabit bir elektrot referans alınarak, diğer elektrotlar giderek daha geniş bir düzende yerleştirilir ve bir kesit oluşturulur. Bu süreçte sabit elektrotun yeri değiştirilerek eğimli bir kesit üretimi sağlanır (gri noktalar). Her elektrot düzeni için hesaplanan görünür öz direnç değeri, o düzenin merkezinin altına denk gelen derinliğe (siyah noktalar) yerleştirilerek analiz edilir.



Şekil 7. ERT ölçüm prensibi genel gösterimi (a-d) (Schmidt, 2013'den düzenlenmiştir)

Elektrik Öz direnç Tomografi elektrot diziliminin otomatik hale getirilmesi verilerin daha anlaşılır ve seri olarak elde edilmesini sağlar. Çok elektrot sistemi, Profil hattı boyunca eşit aralıklarla zemine çakılır. Bilgisayarlı kontrol ünitesine bağlanan elektrotlar cihaza bağlanır. Veri görüntüleme için yeraltı elektriksel dağılımının düşey kesiti için, tek veri ve tek profil seviyesinde birleşir. ERT yazılım programı ölçü grupları arasında ve seviye aşamalarına otomatik şekilde geçiş sağlamak üzere programlanmıştır. Cihaz ünitesinde, ölçümler için potansiyel ölçümleri için kullanılmak üzere dört adet elektrot seçilir. Birinci seviyede, 4 elektrotun yan yana, 1-2-3-4, 2-3-4-5, 3-4-5-6 şeklinde olası gruplanmalarının profil boyun alınmış olan ölçümlerinden oluşur. Profilin bu şekilde devam eder. Elektrotların tamamı kullanıldığı zaman ERT yazılımı elektrot aralıklarını arttırır. Seviyelerde 2, 1-3-5-7, 2-4-6-8, 3-5-7-9 elektrotların kullanımı sağlanır. Art arda olan seviyelerde elektrotlar arası mesafe açılır, mesafenin artmasıyla alınan ölçüm daha derin olur. Elde edilen, elektrik Öz direnç Tomografi verileri konturlanarak kesit olarak görüntülenebilir.

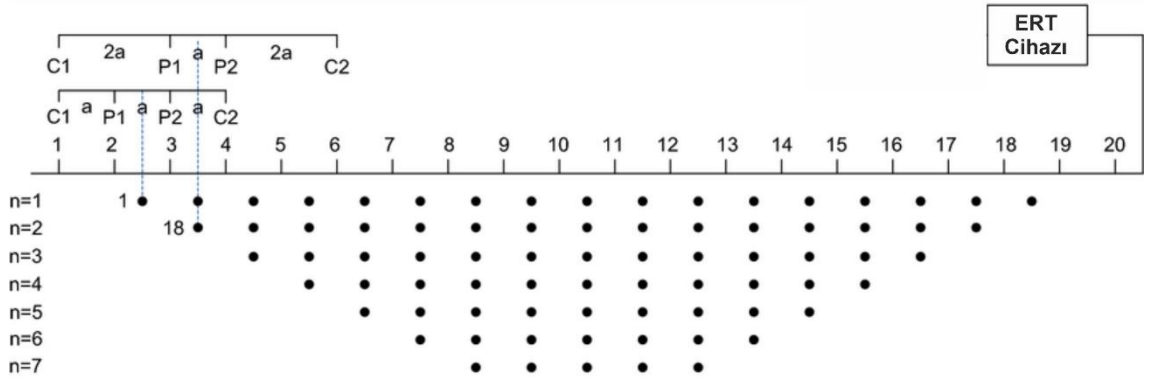


Şekil 8. ERT sistematik dizilimin çok elektrotlu şematik gösterimi. Seviyeler ilerledikçe mesafenin artması gerekir. (Loke, 2013'den düzenlenmiştir)

4.2.1. Wenner-Schlumberger Dizilimi

Wenner-Schlumberger dizilimi, Elektriksel Öz direnç Tomografisi (ERT) uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen, Wenner ve Schlumberger elektrot konfigürasyonlarının bir kombinasyonu niteliğindedir. Aralık katsayısı olan n değeri 1'e eşit olduğunda, bu dizilim Wenner konfigürasyonu ile benzerlik gösterir; bu durumda elektrotlar arası uzaklık a olarak tanımlanır. Öte yandan, $n = 2$ olarak belirlendiğinde ise yapı, Schlumberger düzenine karşılık gelir. Bu yöntemde, ölçülen görünür öz direnç değeri her zaman dizilimin orta noktasına yerleştirilir. Bu sayede, a ve n parametrelerinin tekil ya da eş zamanlı artırılmasıyla daha derin seviyelerden veri elde etmek mümkündür.

Wenner-Schlumberger düzeni, araştırma derinliği açısından ortalama bir performans sunmakla birlikte, hem yatay hem de düşey yöndeki jeolojik hedeflere karşı orta seviyede bir hassasiyet sağlar. Ayrıca bu dizilim, yalnızca Wenner konfigürasyonuna kıyasla daha geniş bir alanı tarayabildiğinden, çeşitli yer altı yapılarının daha ayrıntılı biçimde belirlenmesine olanak tanır.



Şekil 9. Wenner - Schlumber diziliminde ölçüm prensibi ve veri noktalarının konumları (Jiang vd., 2020’den düzenlenmiştir)

Wenner - Schlumberger elektrot dizilimi için görünür öz direnç (birimi Ωm) ve geometrik katsayı hesaplamaları Eşitlik 1-3’te verilmiştir.

$$\rho_a = R \cdot k \quad (\text{Eşitlik 1})$$

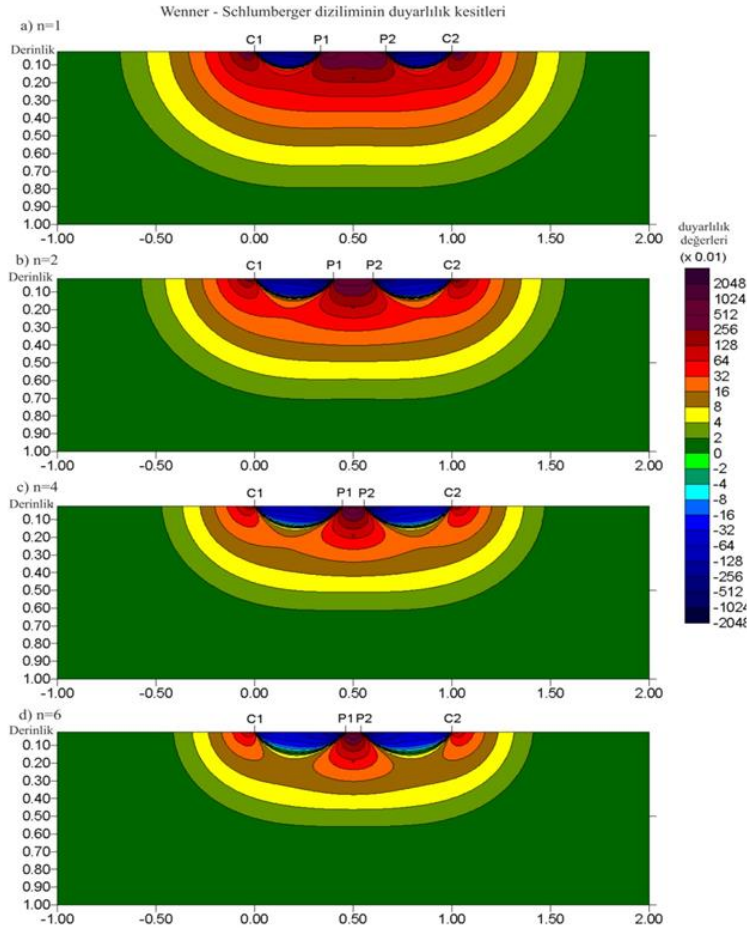
$$R = \Delta v / I \quad (\text{Eşitlik 2})$$

$$k = \pi n (n + 1) a, \quad (n=1,2,3,...) \quad (\text{Eşitlik 3})$$

ile ifade edilir.

Burada, ρ_a : Görünür öz direnç değerini, k : Geometrik katsayı, R : Dirençleri

ΔV : Potansiyel farkı, I : Akım göstermekte olup, elektrik potları arasındaki mesafeyi, n ölçüm seviyelerini temsil etmektedir. Bu düzenekte hassasiyet alanında dikkat çeken bir durum, n katsayısı arttıkça yüksek pozitif hassasiyetin merkeze doğru yoğunlaşmasıdır. Özellikle $n=6$ seviyesinde yer alan potansiyel elektrotlar (P1 ve P2) altında ortaya çıkan yüksek pozitif hassasiyet, akım elektrotları (C1 ve C2) çevresindeki hassasiyet değerlerinden belirgin biçimde daha fazladır. Bu durum, dizilimin düşük n seviyelerinde yatay yapıların, yüksek n seviyelerinde ise düşey yapıların tespiti konusunda daha etkili olduğunu göstermektedir (Şekil 9). Sonuç olarak, Wenner-Schlumberger elektrot düzeni hem yatay hem de düşey yapı kesintilerine karşı duyarlı bir profil sunar (Loke, 2013).



Şekil 10. Wenner Schlumberger dizilimi için duyarlılık kesitleri. a) $n=1$, b) $n=2$, c) $n=4$, d) $n=6$ (Loke, 2013)

ERT (Elektrik Rezistivite Tomografisi) yöntemi yaygınlaşmadan önce, tek boyutlu (1B) Düşey Elektrik Sondajı (DES) tekniği kullanılıyordu. 1960'lerden sonra teknoloji geliştikçe iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) analizler yapılmaya başlanmıştır (Şekil 10). ERT, mühendislik problemleri, çevresel araştırmalar, arkeolojik keşifler, maden aramaları, jeotermal enerji incelemeleri, hidrojeoloji ve fay hatları araştırmaları gibi çeşitli alanlarda etkin bir şekilde uygulanmaktadır. İlk olarak 1960'larda tıp alanında kullanılan bu teknoloji, 1970'lerde özellikle kuyu içi jeofizik araştırmalarda yaygınlaştı. 1980'li yıllarda ise radar tomografi (Lager ve Lytle, 1977) ve sismik tomografi (Pan ve Kak, 1983; Worthington, 1984; Daily, 1984) alanlarında kullanıldı. 1990'larda ise kuyu içi tomografi uygulamalarında kendine yer bulmuştur (Daily ve Owen, 1991).

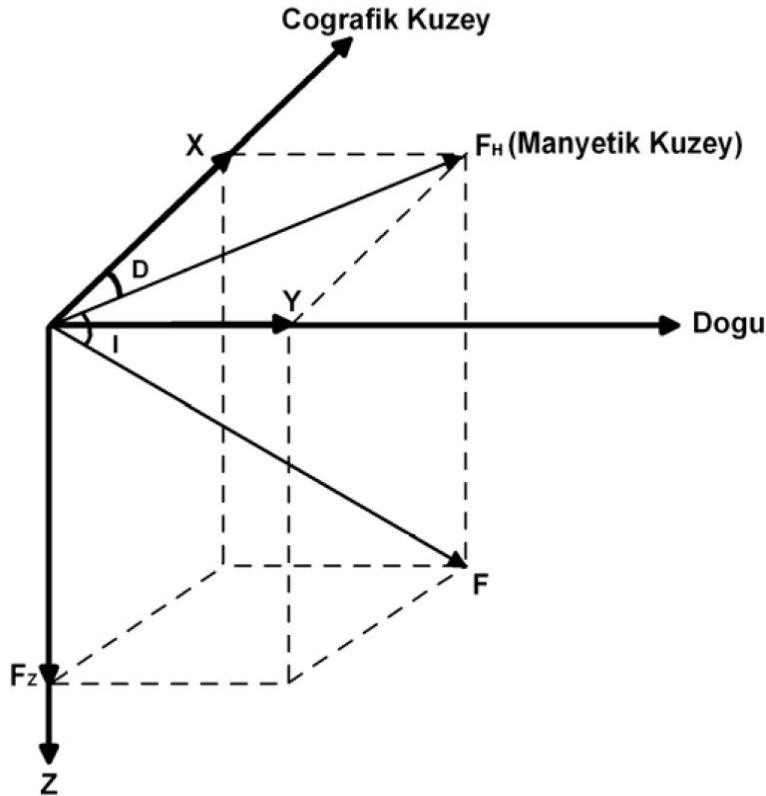
4.3. Manyetik Yöntem

Manyetik yöntemlerin temel amacı, yeryüzünde bulunan ve doğal manyetik özellikler sergileyen jeolojik yapıların bu özellikleri doğrultusunda analiz edilmesidir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için, incelenen nesnenin çevresindeki malzemelerden farklı

bir manyetik duyarlılığa sahip olması gerekir; böylece söz konusu nesne, ölçümlerde belirgin bir manyetik anomali oluşturabilir. Yöntemle birlikte, toplam alan (F), yatay bileşen (H) ve düşey bileşen (Z) gibi çeşitli manyetik vektör bileşenleri belirlenebilmektedir. Ayrıca bu teknik, yalnızca kara yüzeyinde değil; aynı zamanda hava ve deniz platformlarından da başarıyla uygulanabilmektedir. Bu özelliği sayesinde, geniş alanlara yönelik araştırmalarda esnek ve kapsamlı bir veri toplama olanağı sunmaktadır.

4.3.1. Yer Manyetik Alanı ve Özellikleri

Yeryüzünün herhangi bir noktasındaki manyetik alan, vektörel bir nicelik olarak tanımlanır ve bu vektör; yatay bileşen (H), düşey bileşen (Z) ile birlikte sapma açısı (D) ve meyil açısı (I) olmak üzere iki açıyla ifade edilir (Şekil 11). Bu bileşenler arasındaki matematiksel ilişkiler literatürde çeşitli formüllerle açıklanmıştır (Eşitlik 4-10) (Ateş, 2004). D açısı, coğrafi kuzey ile manyetik kuzey arasındaki farkı gösterir; doğuya doğru olan sapmalar pozitif, batıya doğru olanlar ise negatif değer olarak alınır. I açısı ise yatay bileşenle toplam alan vektörü arasındaki eğimi gösterir; eğer aşağı yönelmişse pozitif (kuzey yarım küre), yukarı yönelmişse negatif (güney yarım küre) olarak kabul edilir. $I = 0^\circ$ olan konumlar manyetik ekvator olarak adlandırılırken, $I = \pm 90^\circ$ değerine sahip alanlar manyetik kutuplardır.



Şekil 11. Yer manyetik alanının bileşenleri

$$x = H \cos(D) \quad (\text{Eşitlik 4})$$

$$y = H \sin(D) \quad (\text{Eşitlik 5})$$

$$H^2 = x^2 + y^2 \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$F^2 = H^2 + F_z^2 \quad (\text{Eşitlik 7})$$

$$F_z = H \tan(I) \quad (\text{Eşitlik 8})$$

$$I = \arctan \frac{F_z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$D = \arcsin \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

Şeklinde ifade edilir.

Burada;

F: YMA'nın toplam alanı; **H(F_H):** YMA'nın yatay bileşenini; **F_z:** düşey bileşeni; **x:** YMA'nın kuzey yönündeki bileşeni **y:** YMA'nın doğu yönündeki bileşeni;

D: Denklinasyon veya sapma açısı; **I:** Inklınasyon açısı veya eğim açısını göstermektedir.

Yer manyetik alan şiddetindeki değişim nanoTesla (nT) olarak ifade edilir.

1 nT = 10⁻⁹ Tesla, ayrıca 1 nT= 10⁻⁵Gauss olarak da belirtilebilir (Ateş, 2004).

Manyetik alan verilerinin sağlıklı bir şekilde analiz edilebilmesi, bu verilere çeşitli ileri düzey analizlerin uygulanmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, toplam alan manyetik verisine hem spektral analiz teknikleri hem de yapısal sınır belirleme yöntemleri entegre edilmesi gerekir. Bu çalışmada izlenen ilk adım, toplam alan verisine yönlü kosinüs filtresinin uygulanması olmuştur. Ardından, verilere kutba indirgeme işlemi uygulanmıştır. Elde edilen kutba indirgenmiş veriye ise sınır belirlemeye yönelik türev tabanlı yöntemler uygulanmıştır. Bu analiz yöntemlerine ilişkin detaylı açıklamalar ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.

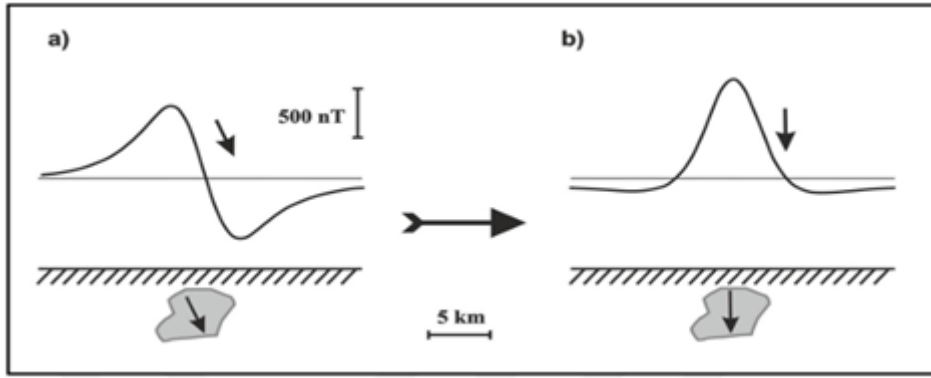
4.3.2. Yönlü kosinüs filtresi

Yönlü kosinüs filtresi, istenilen bir azimut yönündeki sinyali kaldırma veya izole etme amacıyla kullanılan bir filtredir. Yönlü kosinüs filtresi, yüksek yönlü özelliklerin daha fazla hassasiyetle zayıf hizalanması ve izole edilmesiyle karakterize edilen manyetik verilerin geliştirilmesinde en yaygın olanıdır.

4.3.3. Kutba indirgeme yöntemi

Mıknatıslanmanın vektörel doğası nedeniyle, yer altındaki manyetik cisimlerin oluşturduğu anomalilerin şekli; manyetizasyonun ve yer manyetik alanının eğim (inklinasyon) ve yönlenme (deklinasyon) açılarına doğrudan bağlı olarak değişiklik gösterir. Dolayısıyla, mıknatıslanmanın dik bir doğrultuda hizalanmadığı durumlarda, manyetik anomali kaynağı ile anomali maksimumu arasında yer değiştirme gözlemlenebilir. Bu durum, anomalinin doğrudan kaynağın üzerinde konumlanmamasına neden olarak verilerin yorumlanmasını karmaşıktırır. Bu zorluğu aşmak amacıyla geliştirilen "kutba indirgeme" (reduction to the pole – RTP) yöntemi, manyetik enlemde eğimli olarak ölçülen verileri, sanki bu ölçümler manyetik kutupta ve düşey bir alan altında yapılmış gibi dönüştürür. Kutba indirgeme yöntemi manyetik anomalilerin yorumlanmasını kaydadeğer kolaylayarak sağlamaktadır. Kutba indirgeme yöntemini ilk olarak Baranov (1957) oluşturmuştur.

Yerkürenin manyetik alanı eğimli olduğunda, indüksiyonla oluşan anomaliler çoğunlukla asimetrik biçimde ortaya çıkar. Ancak bu alan düşey konumdayken, anomaliler doğrudan kaynağın üzerinde oluşur (Gunn vd., 1977). Yer çekimi (gravite) ve manyetik yöntemler arasındaki temel farklardan biri de; gravite anomalileri çoğunlukla kütle yoğunluğunun tam üzerinde yer alırken, manyetik anomaliler bu özelliği yalnızca mıknatıslanma ve yer manyetik alanı düşey yönelimliyse gösterir. Mıknatıslanma vektörü (m) ile çevresel manyetik alan vektörünün (f) düşey yönde hizalanmadığı durumlarda, bu vektörlerin faz açıları (θ_m ve θ_f) manyetik anomali üzerinde yatay kaymalara, şekil bozukluklarına ve hatta işaret değişikliklerine neden olabilir (Şekil 12) (Blakely, 1995). Kutba indirgeme işlemi, bu faz farklılıklarını düzelterek anomalilerin merkezlenmesini sağlar ve böylece yoruma elverişli bir manyetik model elde edilir.



Şekil 12. Manyetik anomalinin kutba indirgenmiş hali ve kutba indirgenmeden önceki durumu (Blakely,1995).

Simetrik olmayan durumlarda anomalinin simetrik duruma getirilmesi için kutba indirgeme işlemi uygulanır(Şekil 12). Herhangi bir ΔTr anomalisinin hesaplanması Eşitlik 11’de verilmiştir.

$$F[\Delta Tr] = F[\phi r] F[\Delta T] \quad (\text{Eşitlik 11})$$

$F[\phi r]$ kutba indirgeme olarak tanımlandığında (Baranov ve Naudy, 1964), burada $F[\phi r]$, kutba indirgeme operatörünü temsil eder ve Eşitlik 12-17 arasındaki bağıntılar ile hesaplanmaktadır (Blakely, 1995).

$$F[\phi_r] = \frac{1}{\theta_m \theta_f} = \frac{[k]^2}{a_1 k_x^2 + a_2 k_y^2 + a_3 k_x k_y + i|k|(b_1 k_x + b_2 k_y)} \quad (\text{Eşitlik 12})$$

$$a_1 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_x \hat{f}_x \quad (\text{Eşitlik 13})$$

$$a_2 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_y \hat{f}_y \quad (\text{Eşitlik 14})$$

$$a_3 = -\hat{m}_y \hat{f}_x - \hat{m}_x \hat{f}_y \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$b_1 = \hat{m}_x \hat{f}_z - \hat{m}_z \hat{f}_x \quad (\text{Eşitlik 16})$$

$$b_2 = \hat{m}_y \hat{f}_z - \hat{m}_z \hat{f}_y \quad (\text{Eşitlik 17})$$

Burada; k_x X yönü dalga sayısı, k_y :Y yönlü dalga sayısını, a:Gerçek sayı, b:sanal sayı, m:Manyetizasyon yönü bileşenleri, f:YMA kosinüs bileşenleridir.

Ayrıca , ΔTr sanki kutupta ölçülmüş bir manyetik ölçümün sonucu şeklindedir (Baranov ve Naudy, 1964).

4.3.4. Düşey türev

Düşey türev işlemleri genellikle manyetik verilerde, anomali ve diğer yapısal özelliklerin kenarlarını daha açık bir şekilde ortaya çıkarmak için kullanılır. Türev derecesi isteğe bağlı olarak belirlenebilir. Eğer yüksek bir türev derecesi tercih edilirse, gürültü fazlalığı oluşan bir harita ortaya çıkabilir (Gunn, 1974). Yüksek geçişli filtrelerin bir türü oldukları için gürültü artışına neden olan istenmeyen bir özellik taşırlar. Bununla birlikte, spektrumun yüksek dalga boyu bileşenlerini artırdığı gibi, yüksek dalga boylu gürültüyü azaltmak için alçak geçişli filtre uygulamaları yapmak gerekir (Oasis Montaj, 2007). Herhangi bir türev derecesi, bir potansiyel alandan türetilebilir. $\Delta z > 0$ olduğu varsayıldığında, birinci dereceden düşey türev Eşitlik 18'deki gibi verilir.

$$\frac{\partial}{\partial z} \phi(x, y, z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\phi(x, y, z) - \phi(x, y, z - \Delta z)}{\Delta z} \quad (\text{Eşitlik 18})$$

Fourier ortamına dönüştürülmesi de Eşitlik 19'daki gibidir.

$$\begin{aligned} F \left[\frac{\partial \phi}{\partial z} \right] &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(\phi - F(\phi)e^{-|k|\Delta z})}{\Delta z} \\ &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{(1 - e^{-|k|\Delta z})}{\Delta z} F(\phi) \\ &= |k| F(\phi). \end{aligned} \quad (\text{Eşitlik 19})$$

Formülü ifadesini sağlar (Blakely, 1995). Herhangi bir dereceden düşey türev ifadesinin hesaplanması genel itibariyle Eşitlik 20'de gösterilen denklem yardımıyla yapılmaktadır.

$$F \left[\frac{\partial^n \phi}{\partial z^n} \right] = |k|^n F(\phi) \quad (\text{Eşitlik 20})$$

Bu denklemdeki $|k|$ radyal sayısı bir yandan düşey türevin süzgecidir. Fourier dönüşümü yapılan potansiyel alan verisinin $|k|^n$ süzgeci ile çarpımının ters fourier dönüşümünün n. dereceden düşey türev değerlerini vermektedir.

4.3.5. Analitik sinyal

Potansiyel alan verilerinin değerlendirilmesinde en önemli aşamalardan biri, anomaliye neden olan yapıların hem konumlarını hem de yer altındaki derinliklerini doğru biçimde belirleyebilmektir. Manyetik verilerin, anomalilere neden olan jeolojik yapıların sınırlarını belirlemede bir araç olarak kullanılmasına yönelik ilk çalışmalardan bazılarını Nabighian (1972) gerçekleştirmiştir. Bu yöntemin öne çıkmasının temel nedeni, yermanyetik alanın karakteristikleri ile mıknatıslanma yönünden etkilenmemesidir (Blakely, 1995; Roest vd., 1992). Manyetik anomalilerin analitik sinyali ise, dikey ve yatay türevlerin karelerinin toplamının karekökü şeklinde tanımlanmaktadır (Eşitlik 21) (Roest vd., 1992; Roest vd., 1993; Salem vd., 2002).

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (\text{Eşitlik 21})$$

Formül 'de verilen $|A(x, y)|$ analitik sinyalin genliği ve M manyetik alandır.

Manyetik yapılara ait analitik sinyalin en yüksek değeri göstermesi, genellikle bu yapıların manyetik kenarlarının tespitinde başvuru olan temel yöntemlerden biridir. Özellikle yüzeye yakın nesnelerde analitik sinyalin maksimum noktası, yüksek çözünürlük sağlayarak ayrıntılı bilgi sunarken, derinlerdeki yapıların tanımlanmasında yeterli hassasiyeti gösteremez (Arısoy ve Dikmen, 2013). Manyetik verilerin analitik sinyal yöntemiyle değerlendirilmesine başlanmadan önce, kutba indirgenmiş verilerin x, y ve z eksenlerindeki türevleri hesaplanmıştır. Bu türevlerin karelerinin toplamının karekökü alınarak, analitik sinyal haritası oluşturulmuştur. X eksenini için oluşturulan türev haritasında kuzeyde öne çıkan güçlü anomaliler, bölgedeki temel jeolojik kaynaklı görülmektedir. Aynı şekilde, y ve z eksenlerine ait türev haritaları da kuzey yönünde benzer şekilde belirgin anomaliler göstermekte olup, bu anomalilerin de bölgenin baskın yapısal özelliklerine işaret ettiği anlaşılmaktadır. Analitik sinyalin maksimum değer gösterdiği bölgeler KD-GB kısmında gözlemlenen manyetik anomalilerin kaynaklarını ortaya koymaktadır. Analitik sinyal haritasında saptanan maksimum değerler ve bu

değerlerin yoğunlaştığı KB-GD yönelimi, ölçümün diğer manyetik haritalamalarında da kendini göstermektedir.

4.3.6. Tilt açısı (Tilt Türevi)

Tilt açısı, kutba indirgenmiş manyetik anomali verisinin düşey yöndeki birinci türevinin, yatay yöndeki birinci türeviyle oranlanıp ters tanjantının alınmasıyla elde edilen bir açı türüdür. Miller ve Singh (1994)'in yapmış olduğu çalışmada bu açı, yer altındaki manyetik kaynakların sınırlarını belirlemede etkili bir gösterge olarak sunulmuştur. Elde edilen tilt açısı haritası, yüzeyde gözlemlenemeyen fakat yer altında mevcut olan yapısal sınırların konumunu belirlemeye yardımcı olur. Bu bağlamda, araştırma alanına ait kutba indirgenmiş (RTP) manyetik veriler kullanılarak tilt açısı hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Harita üzerinde kırmızı tonlar pozitif değerleri, mavi tonlar negatif değerleri ve sarı tonlar sıfır değerlerini ifade etmektedir. Verduzco vd. (2004) önerisine göre, tilt açısının sıfır değer verdiği bölgeler, genellikle manyetik yapıların kenar sınırlarını temsil eder. Bu nedenle, sarı renk ile gösterilen ve tilt açısının sıfırlandığı hatlar, manyetik kaynakların yatay sınırlarını tanımlamak açısından önemlidir. Pozitif değerler doğrudan kaynağın üzerinde konumlanırken, negatif değerler bu kaynakların daha uzakta bulunduğu işaret eder. Harita üzerindeki kuzey ve güney yönlerinde belirginleşen sıfır konturların, çalışılan bölgenin başlıca yapısal sınırlarını yansıttığı düşünülmektedir.

Tilt açısı yöntemi, düşey türev ile yatay türev gradyanı arasındaki oran kullanılarak potansiyel alan verisinden elde edilir (Miller ve Singh, 1994; Verduzco vd., 2004). Bu yaklaşım, eğim açısı, ikinci türev, analitik sinyal ve yatay gradyan gibi diğer kenar belirleme teknikleriyle karşılaştırıldığında; hem yüzeye yakın hem de daha derin yapıları belirleme konusunda güçlü bir performans sergilemektedir (Miller, 1994). Sadece yapısal sınırların yatay konumlarını değil, aynı zamanda bu yapıların derinliği hakkında da bilgi sunar. Ayrıca, yüksek mertebeden türevlerin kullanıldığı tekniklerle kıyaslandığında, tilt açısının gürültüye karşı daha az duyarlı olduğu vurgulanmıştır (Akın ve Çiftçi, 2011). Tilt açısının matematiksel tanımı ise şu şekildedir:

Tilt açısı; Düşey türevin, yatay türeve oranının ters tanjantının alınmasıyla elde edilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Eşitlik 22-23).

$$Tilt = \theta = \tan^{-1} \frac{Düşey_türev}{Yatay_türev} \quad (Eşitlik\ 22)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial T}{\partial h}} \right) \quad (\text{Eşitlik 23})$$

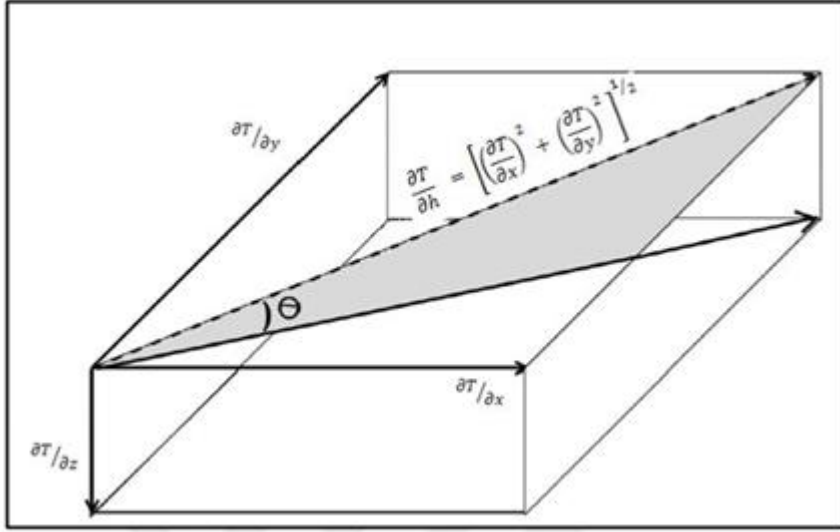
Toplam manyetik alan değerinin yatay yönde birinci türevi (Eşitlik 24),

$$\frac{\partial T}{\partial h} = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eşitlik 24})$$

Buna göre Tilt açısı Eşitlik 25’te verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2}} \quad (\text{Eşitlik 25})$$

Miller ve Singh (1994) kaynak cismin sınırlarını tilt açısı ile göstermiştir. Tilt açısının konturlarının pozitif olduğu kısım kaynağın kendisini tanımladığından, Tilt açısının 0° değeri ise kaynak sınırlarını vermektedir (Şekil 13). Tilt açısı konturları ($\pm 45^\circ$) arasındaki mesafenin yarısı yapının üst derinliğini vermektedir (Salem vd., 2007; Oruç, 2011; Akın vd., 2011).



Şekil 13. Tilt açısının geometrisi (Akın ve Çiftçi, 2011) değiştirilmiş gösterimi

Potansiyel alan anomalilerine neden olan yer altı kütlelerinin sınırlarını belirlemek ve bu sınırların özelliklerini daha ayrıntılı hale getirmek amacıyla sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri, türevlere dayalı klasik analiz teknikleridir. Manyetik anomalilerin büyüklüğü, hem manyetik alanın şiddetine hem de kaynağın derinliğine bağlıdır. Bu nedenle, zayıf manyetik anomaliler, genellikle daha güçlü anomalilerin etkisi altında kalarak göz ardı edilebilmektedir. Bu durumu dengelemek amacıyla geliştirilen kenar belirleme filtreleri, özellikle uzun dalga boyuna sahip anomalileri bastırmadan, doğrusal yapıları tanımlamak için tercih edilmektedir (Oruç, 2011). Bu bağlamda, Eğim Açısı filtresi, kısa dalga boylu bileşenleri öne çıkararak yer altındaki manyetik kaynakların sınırlarını daha net biçimde ortaya koyan etkili bir türev tabanlı tekniktir (Verduzco vd., 2004). Aynı zamanda bu filtre, hem güçlü hem de zayıf manyetik anomalilerden alınan yanıtları dengelemek üzere kullanılan otomatik kazanç kontrol filtrelerinde de uygulanmaktadır. Eğim Açısı filtresi ve bu filtreden türetilen diğer yöntemler, çoğunlukla anomalilere neden olan kütlelerin hem yatay konumlarını hem de derinliklerini kısa sürede tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır (Eşitlik 26-28) (Verduzco vd., 2004; Salem vd., 2007).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial M / \partial z}{\partial M / \partial h} \right) \quad (\text{Eşitlik 26})$$

$$\frac{\partial M}{\partial h} = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)^2} \quad (\text{Eşitlik 27})$$

$$T = \tan^{-1} \frac{\partial M / \partial z}{\sqrt{(\partial M / \partial x)^2 + (\partial M / \partial y)^2}} \quad (\text{Eşitlik 28})$$

Tilt açısı yönteminin veri işleme adımlarında anomali gözlemlenen kaynak haricinde yatay türevi değerleri en tepe değerinde ve negatif değerli olması sağlanmalıdır. Eğim açısının değerleri ise pozitif ve negatif 90° aralıklı değer almaktadır. Tilt açısı yönteminin veri işleme aşaması, manyetik yöntemin analitik sinyal verilerine göre çok daha sade ve anlaşılır şekilde yorumlanmasını sağlamaktadır.

Bu yöntemde kullanılan işlemlerin temeli türevlerin oranına dayandığı için filtre sonucu genlik bilgisi içermemektedir. Bu nedenle bu filtrenin iyileştirme derecesi türevlerin yerel genliğine göre değişim göstermektedir. Düşük gradyanlı alanlarda iyileştirecek bir sinyal bulunmaz, ama filtrenin çıktısı bütün alan için tanımlanabilir. Yani, tilt açısı haritalamalarının ham veriler ile beraber yorumlanması daha önemlidir.

4.3.7. Tilt Açısının Toplam yatay Türevi (HD_TDR)

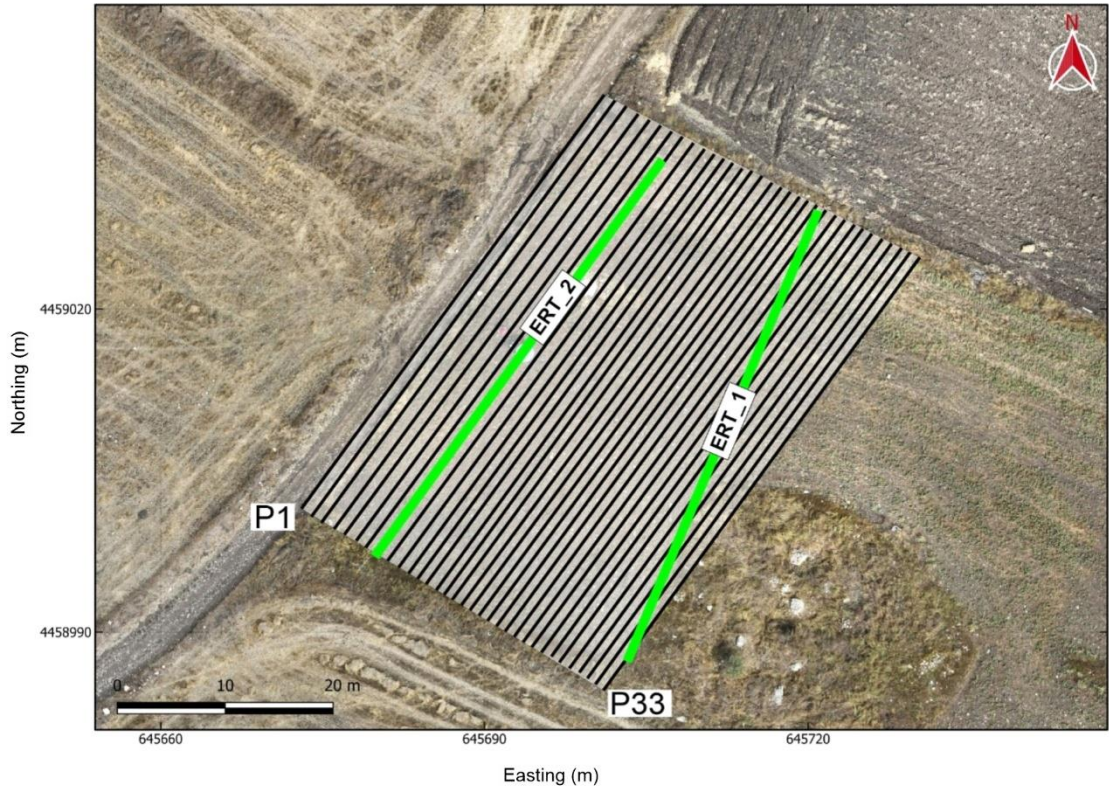
HD_TDR, gövde kenarlarına merkezlenmiş daha keskin ve daha iyi tanımlanmış maksimum oluşturur (Verduzco vd., 2004). Bu bağımsızlığın bir diğer avantajı, indüklenmiş veya kalıntı mıknatıslanma veya ikisinin bir karışımı olan maddeler için yararlı manyetik tepkiler sağlayacak olmasıdır. HD_TDR, Rad/mesafe birimindedir (Eşitlik 29).

$$HDTDR = \sqrt{\left(\frac{\partial TDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TDR}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{Eşitlik 29})$$

Tilt açısının x ve y eksenlerindeki kare türevlerinin toplamının karekökü Tilt Açısının Toplam Yatay Türevi (HD_TDR)'dir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışma alanı, Anadolu Selçuklu Dönemi'nin önemli kentlerinden birisi olan, Çorum İli, Alaca İlçesi, Mahmudiye Köyü yakınlarındaki Kalehisar Ören Yeri'nde bulunmaktadır. Bu sahada arkeojeofizik yöntemlerden manyetik, Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) ve yer radarı (GPR) ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen araştırma bulguları aşağıdaki paragraflarda sırasıyla verilmiştir.

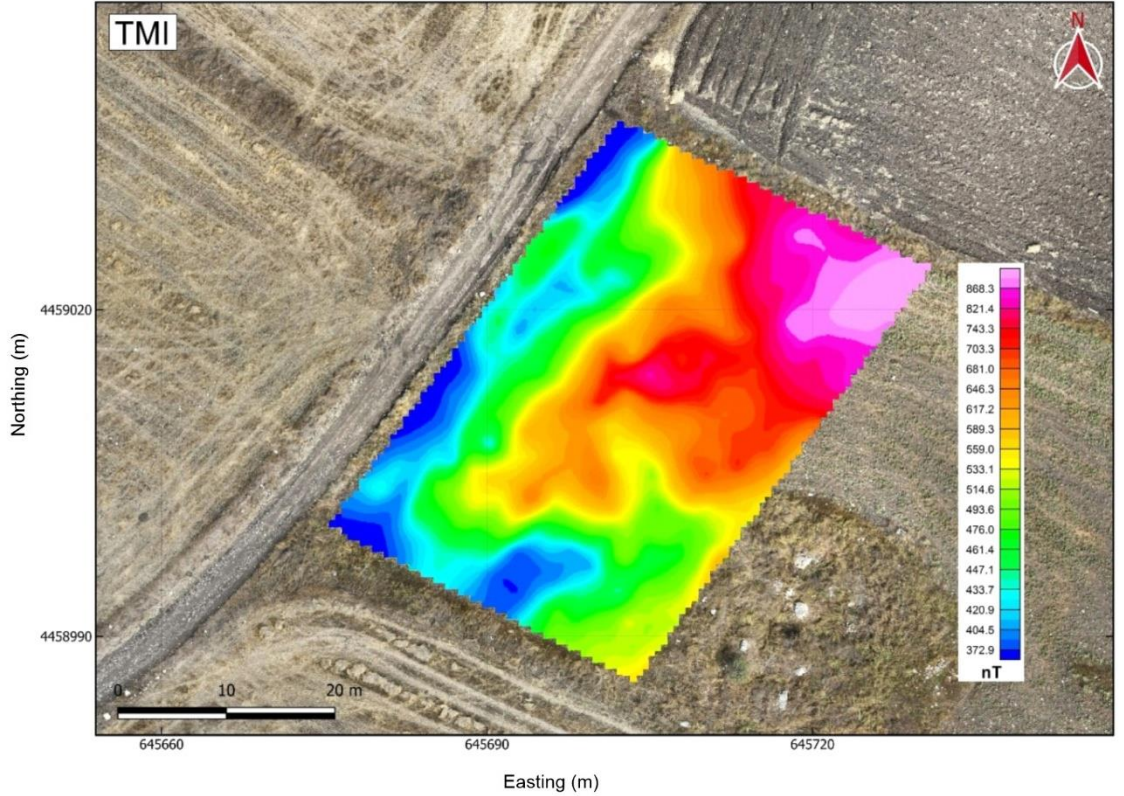


Şekil 14. Çalışma alanında yapılan jeofizik ölçümlerin profilleri. Siyah ile gösterilip P1-P33 arasındaki çizgiler manyetik ve GPR profillerini gösterirken, yeşil ile gösterilen ERT_1 ve ERT_2 isimli kalın çizgiler ERT profillerini göstermektedir.

Toplam manyetik alan ölçümleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Laboratuvarı'nda mevcut olan ELSEC proton manyetometresi kullanılarak yerden 1 metre yukarıdan yapılmış olup, profiller arası 1 metre ve profil içi ölçüm aralıkları 1 metre olacak şekilde 33 profilde alınmıştır. Çalışma alanı civarında seçilen bir nokta, baz noktası olarak alınmış, bir saat ara ile burada periyodik ölçümler alarak baz düzeltmesi grafiği hazırlanmış ve akabinde ham verilere baz düzeltmesi uygulanmıştır. Baz düzeltmesi işlemleri sonrasında bölgedeki yaklaşık IGRF (International Geomagnetic Reference Field) değerleri belirlenmiş ($F=48\,213\text{ nT}$, $D=6.5^\circ$ ve $I=58.5^\circ$)

ve belirlenen şiddet değeri ($F=48\,213\text{ nT}$) toplam alan verilerinden çıkartılmıştır. Daha sonra elde edilen veriler Golden Software, Surfer 12 programında “natural neighbor yöntemi” kullanılarak gridlenmiş ve grid dosyaları oluşturulmuştur. Sonrasında bu grid dosyaları Oasis Montaj programında yeniden WGS84, UTM Zone 36 koordinat düzlemine aktarılarak haritalanmıştır.

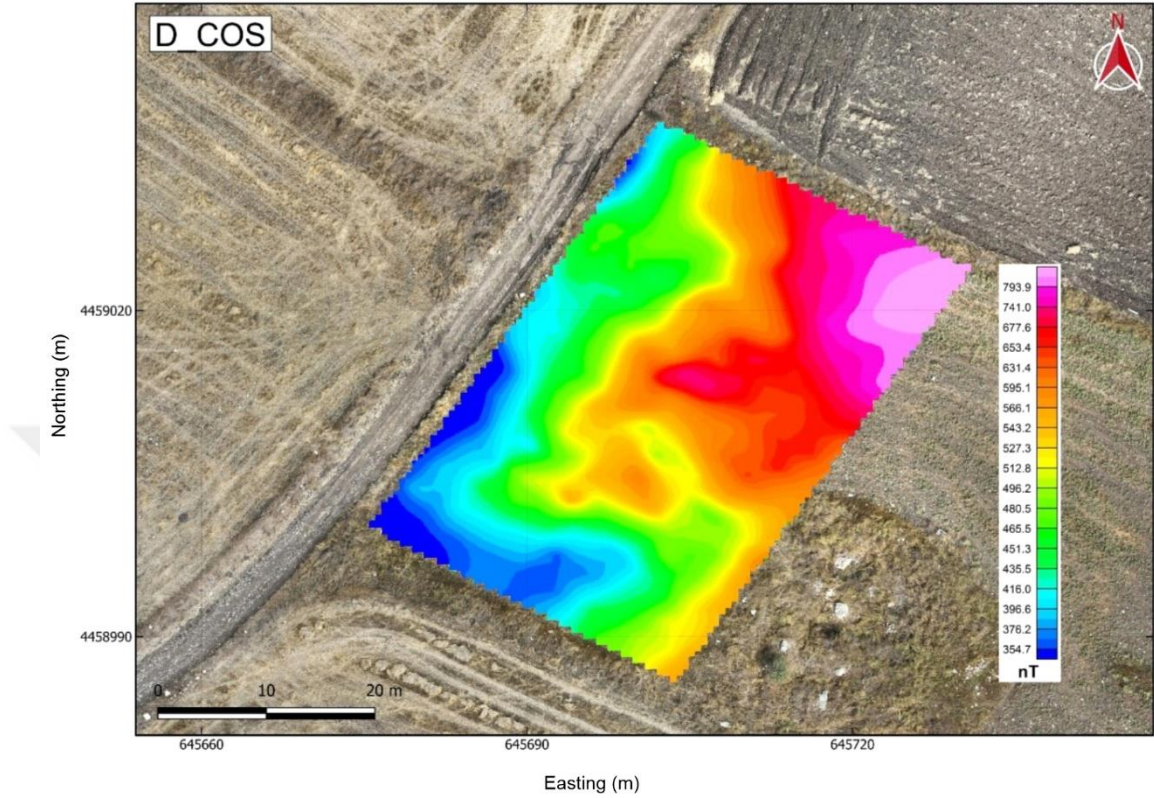
Çalışma alanının toplam manyetik alan haritası, “QGIS” programında, çalışma alanındaki lokasyonuna bindirilmiştir. Toplam manyetik alan (TMI) haritası (Şekil 15) incelendiğinde, verilerin maksimum 868.3 nT ve minimum 372.9 nT arasında değiştiği gözlenmektedir. Yüksek değere sahip anomaliler daha çok pembe renk ile temsil edilirken, düşük değerli anomaliler ise mavi renkli olarak gösterilmiştir. Toplam manyetik alan haritası incelendiğinde, Güneybatı yönünden kuzeydoğu yönüne doğru anomali değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 15. Çalışma alanının Toplam manyetik alan (TMI) haritası

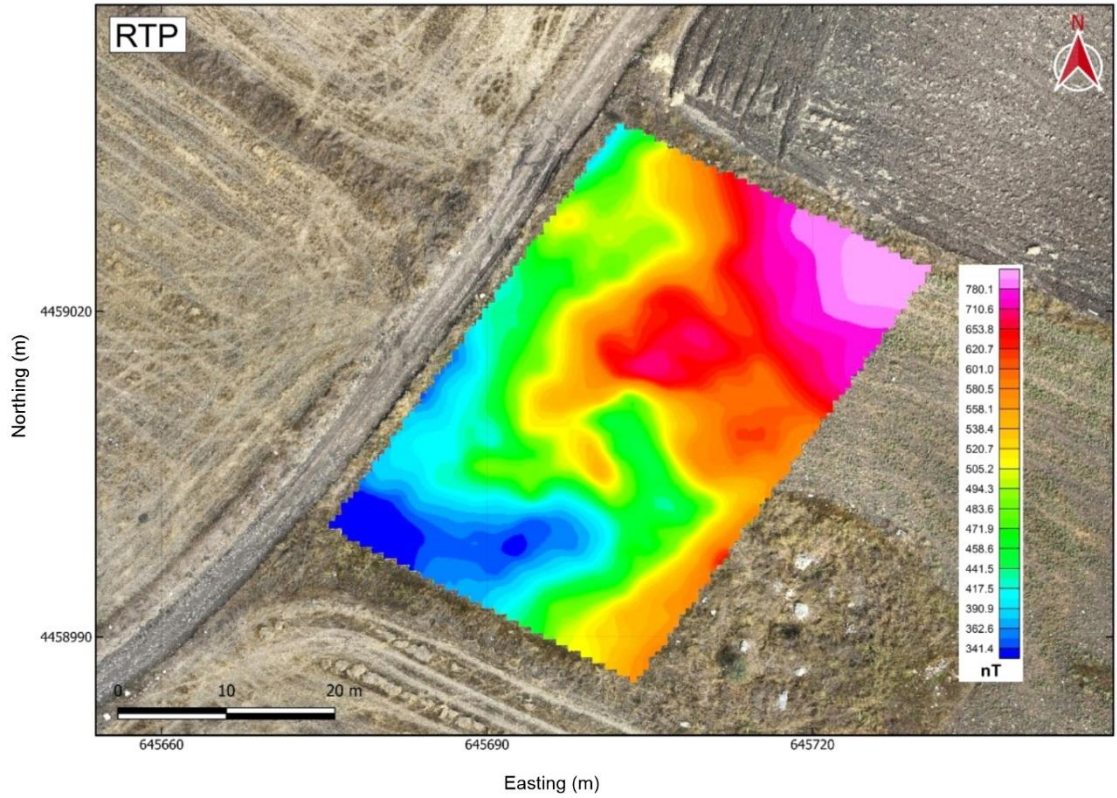
Çalışma alanının Toplam manyetik alan (TMI) haritasına ileri spektral analiz yöntemleri uygulanmış ve özellikle düşey türev haritasında ölçüm doğrultusuna paralel olacak şekilde bozucu anomali oluşumları gözlenmiştir. Bu nedenle toplam manyetik alan verilerine yönlü kosinüs filtresi uygulanmış ve bu bozucu etki giderilmeye çalışılmıştır. Yönlü kosinüs filtresi uygulanmış toplam manyetik alan (D_COS) haritası verileri

incelendiğinde maksimum 793.9 nT ve minimum 354.7 nT arasında değişen anomaliler gözlenmektedir. Daha sonra yönlü kosinüs filtresinden geçirilen verilere Kutba indirgeme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 16. Çalışma alanının Yönlü kosinüs filtresi uygulanmış TMI (D_COS) haritası

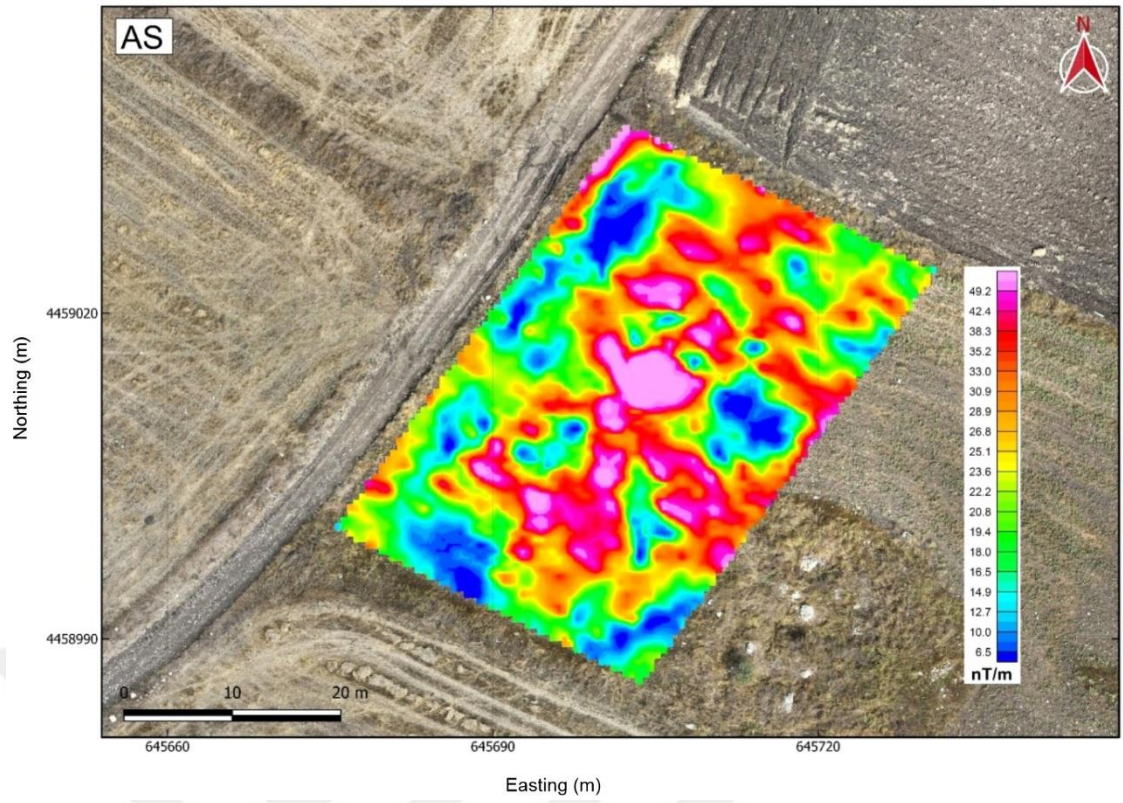
Çalışma alanı, önceki paragraflarda belirtildiği üzere Çorum ili Alaca ilçesi yakınlarında bulunmaktadır (40.26° K, 34.71° D). Bu nedenle hem yer manyetik alanının yönünün, hem de anomaliye sebep olan kütlelerin mıknatıslanma yönünün etkisi nedeniyle çalışma alanında elde edilen manyetik anomaliler, bu anomalilere sebep olan kütlelerin üzerinde değildir. Bu anomalileri, anomaliye sebep olan kütlelerin tam üzerine getirmek için, yönlü kosinüs filtresi uygulanan toplam manyetik alan verilerine kutba indirgeme işlemi uygulanmıştır (Şekil 16). Kutba indirgeme işlemi sırasında kullanılan çalışma alanı civarının IGRF değerleri $D=6.5^{\circ}$ ve $I=58.5^{\circ}$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen kutba indirgeme haritası incelendiğinde verilerin 780.1 nT ile 341.4 nT arasında değiştiği görülmektedir. Bu haritaya göre çalışma alanının kuzeydoğu kesimlerinde yüksek anomaliler, güneybatı kesimlerinde ise daha düşük anomaliler gözlenmektedir.



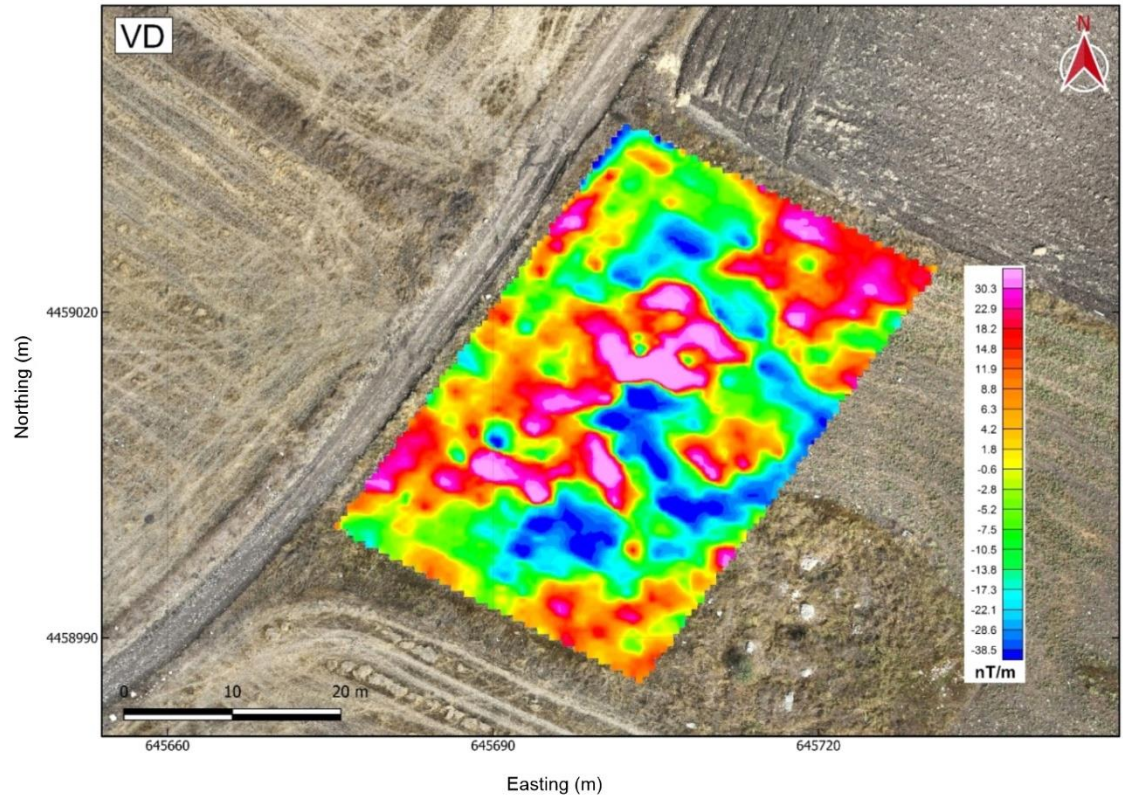
Şekil 17. Çalışma alanının Kutba indirgeme (RTP) haritası

Çalışma alanındaki kutba indirgenmiş verilere analitik sinyal (AS) veri işlem adımı uygulanmıştır (Şekil 18). Analitik sinyal haritası incelendiğinde verilerin 6.5 - 49.2 nT/m aralığında değiştiği görülmektedir. Bunun yanında yüksek değere sahip anomalilerin çalışma alanının ortalarında olduğu, kenarlarda daha düşük değerlere sahip anomalilerin olduğu gözlenmektedir.

Kutba indirgenmiş verilere diğer bir türev yöntemi olan birinci düşey türev (VD) yöntemi uygulanmıştır. Çalışma alanının birinci düşey türev (VD) haritasında veriler - 38.5 nT/m ile 30.3 nT/m arasında dağılım gösterdiği görülmektedir. Şekil 18 incelendiğinde anomalilerin, analitik sinyal haritasına benzer olarak ölçüm alanının orta kısımlarında yüksek değerlere sahip oldukları görülmektedir. Bununla birlikte orta kısımdaki anomalide güneybatı / kuzeydoğu yönünde yönelim de mevcuttur.



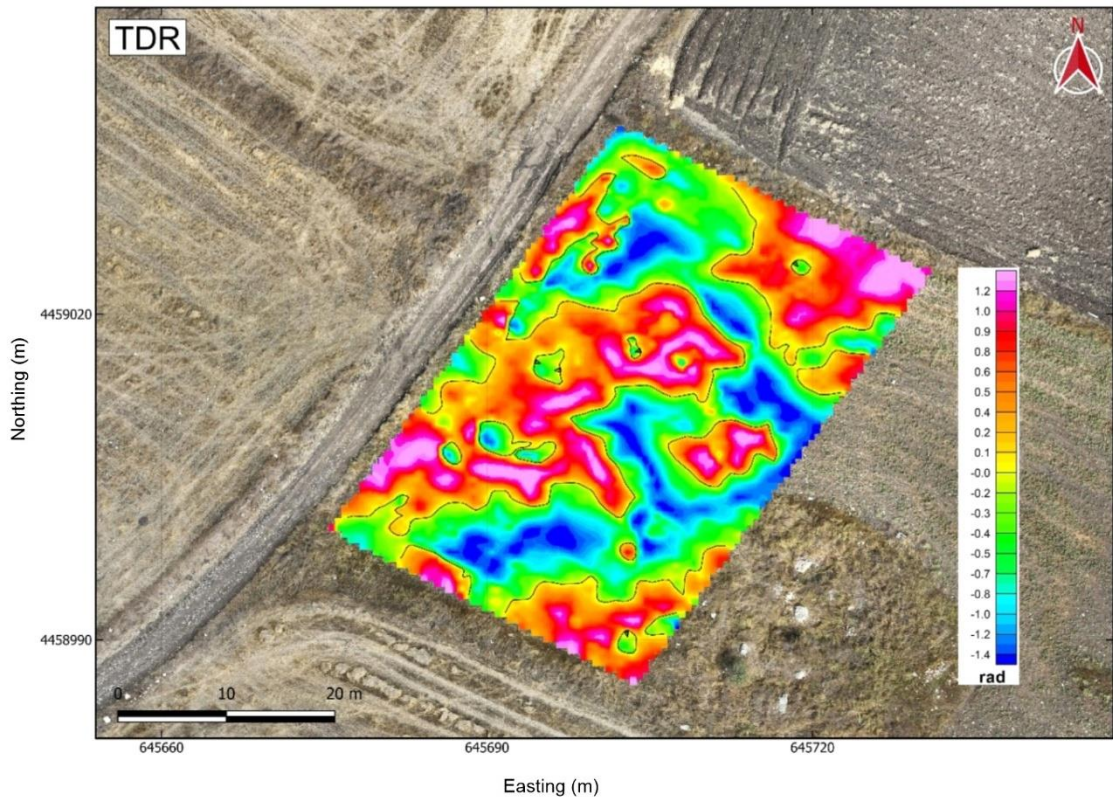
Şekil 18. Çalışma alanının Analitik sinyal (AS) haritası



Şekil 19. Çalışma alanının birinci düşey türev (VD) haritası

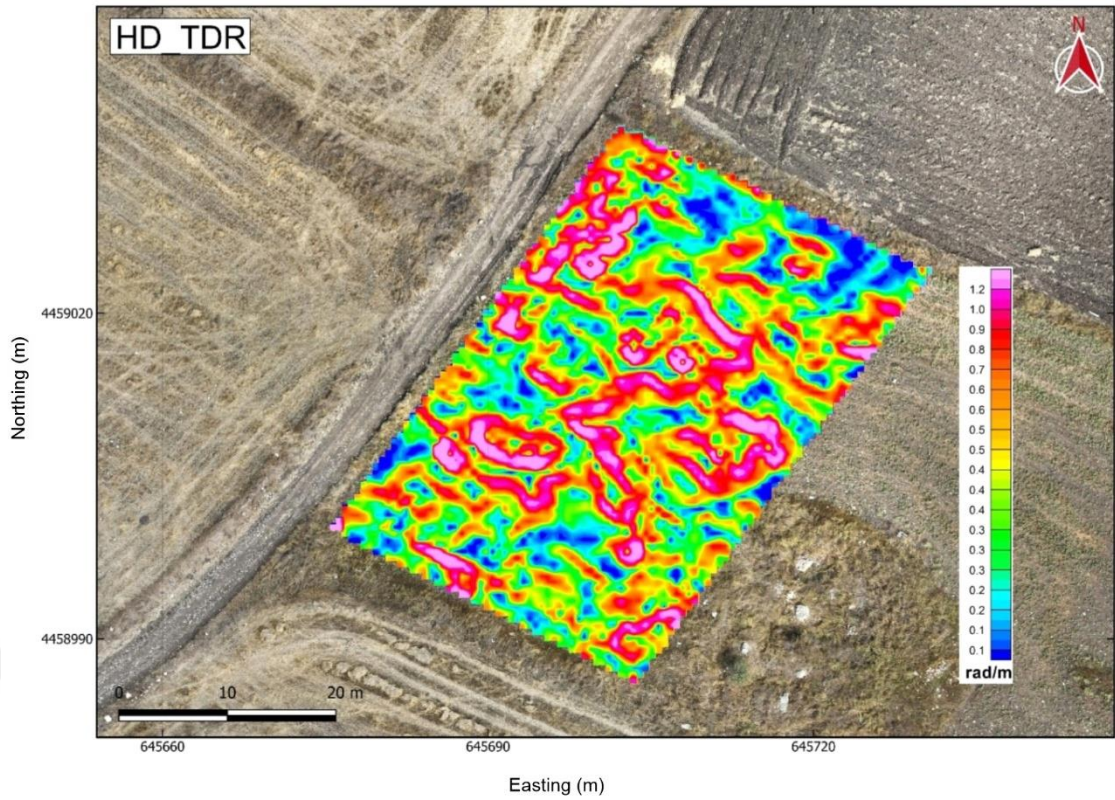
Tilt açısı (TDR) yönteminde 0 konturları genellikle anomaliye sebep olan kütle sınırlarından geçmektedir. Şekil 20’de tilt açısı yönteminde elde edilen harita

gösterilmektedir. Tilt açısı (TDR) haritası veriler -1.4 ile 1.2 rad arasında değişmektedir. Tilt açısı haritasındaki anomaliler, RTP ve VD haritalarındakilere benzer yerlerde gözlenmiştir. Ancak RTP haritasında daha dağınık görünen anomalilerin TDR haritasında daha küçük alanları kapladığı görülmektedir. Bu sonuç, TDR haritasının anomaliye sebep olan kütleyi daha iyi yansıttığını göstermektedir. Bu bağlamda TDR yönteminden elde edilen 0 konturlarının gösterdiği alanlar Şekil 20’de işaretlenmiş olup, çalışma alanının orta kısımlarında anomaliye sebep olan bir kütlenin varlığını düşündüren 0 konturlarının arttığı gözlenmektedir. Düşey türev haritasında gözlemlenen güneybatı / kuzeydoğu yönlü anomali 0 konturlarının çizdirilmesiyle daha belirgin hale gelmiştir. Bu bağlamda çalışma alanı batısından geçen yoldan başlamak üzere 5-8 metre kalınlığında bir anomalinin güneybatı / kuzeydoğu yönünde uzandığı görülmektedir. Dahası çalışma alanının ortalarında bu anomaliden güneydoğu yönünde daha küçük genişlikte çıkıntılar da olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 20. Çalışma alanının Tilt açısı (TDR) haritası

Diğer bir türev yöntemi ise Tilt açısının toplan yatay türevi (HD_TDR) yöntemidir. Tilt açısının toplan yatay türevi (HD_TDR) haritası Şekil 21’de verilmiş olup, çalışma alanının Tilt açısını toplam yatay türev haritası (HD_TDR) 0.1- 1.2 rad/m arasında değişmektedir.

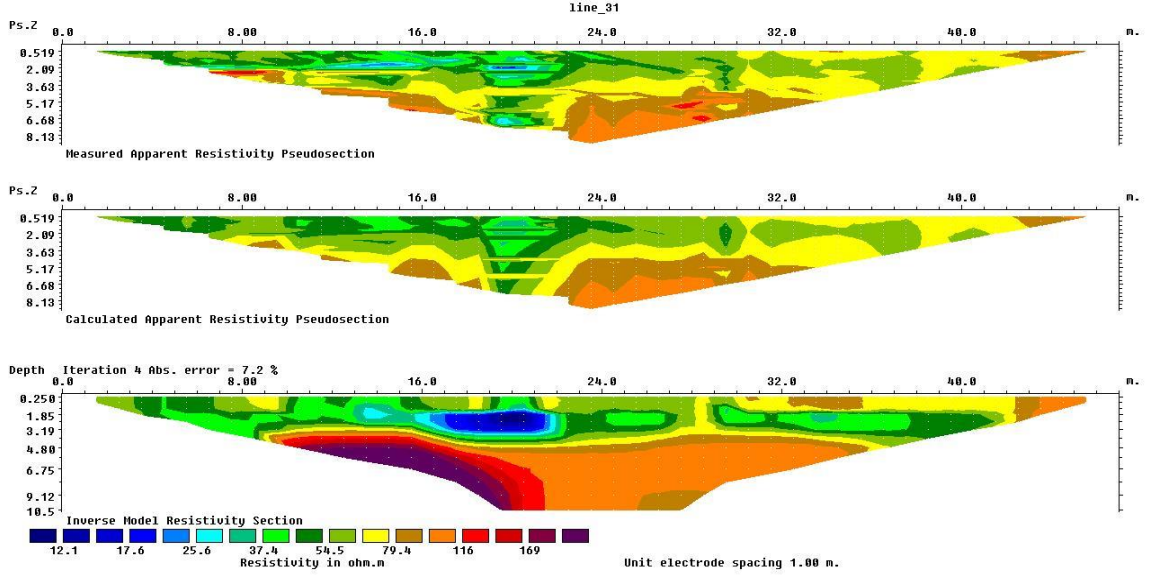


Şekil 21. Tilt açısının yatay türev (HD_TDR) haritası

ERT çalışmaları İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Laboratuvarı'nda mevcut olan "METZ" marka 48 kanallı elektrik rezistivite cihazı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma alanında yaklaşık olarak KD-GB doğrultulu ve 1 metre elektrot aralıklı 2 profil ERT ölçümü ERT ölçümleri alınmıştır. ERT verisi her iki profilde de Wenner - Schlumberger dizilimi kullanılarak toplanmıştır. Veri işlem aşamasında ERT çalışmalarının veri işlemi "Res2Dinv" programında yapılmıştır.

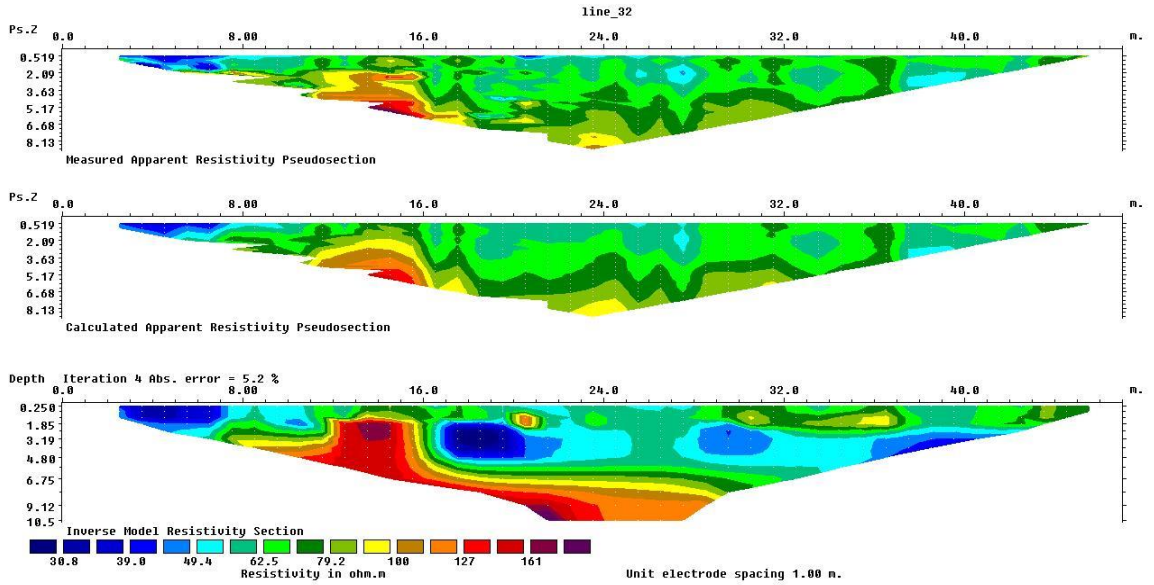
Şekil 22'de ERT1 profilinin ters çözüm işlemi ve 2-B yer elektrik kesiti görülmektedir. ERT1 profiline ait 2-B özdirenç kesitinde elektrik özdirenç değerleri yaklaşık 10 - 170 Ohm.m arasında değişmektedir (Şekil 21). Bu kesitte, özellikle 16 - 22 metreler arasındaki özdirenç kontrastı, o noktalar civarında olduğu düşünülen ve sarnıça su taşıyan büyük bir arkeolojik yapıya karşılık geldiği düşünülmektedir. Profilin 24. metresinden sonra yaklaşık 35. metrelere kadar devam eden ve 2-3 metre derinlikler arasında 35-40 Ohm.m arasında bir anomali gözlenmektedir.

ERT_2 profilinin ters çözüm modelin incelendiğinde profilin hemen başında yüzeye yakın düşük özdirençli bir anomali gözlenmektedir. 12 m ile 15 m arasında kırmızı renkli gözlemlenen anomalinin ERT1 profilinde biraz daha derinde gözlemlenen yapının devamı olabileceği düşünülmektedir. Bunun yanında ERT1 profilinde yüksek kontrast gözlemlenen 16 ile 22 metreler arasında görülen bu anomalilerin derinlikleri de benzer olarak yaklaşık 1.8 m ile 3.2 m arasında bulunmaktadır.

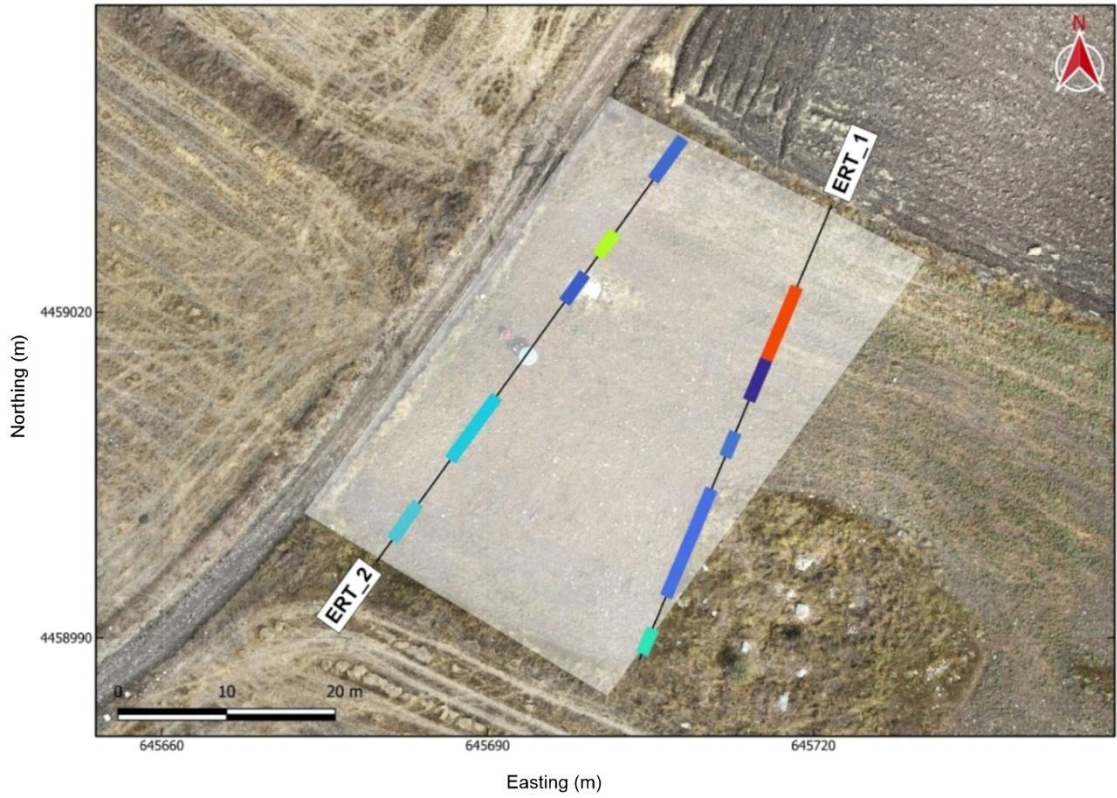


Şekil 22. ERT_1 profilinin görünür öz direnç, hesaplanan görünür öz direnç ve Ters çözüm modeli

Bu anomalilerin düşük öz dirence sahip olması, su muhtevası içirme ihtimali yüksek olduğundan, sarnıç yapısına su taşıyan bir yapı kalıntısı olması ihtimalini güçlendirmektedir. Buna benzer bir anomali de 28-32 metreler arasında benzer derinliklerde gözlenmektedir. Bu anomalilerin tümü yaklaşık 1.5 - 2 metre derinliğinde görülmektedir. Bu irdelenen anomaliler dışında kalan diğer öz direnç anomalileri Şekil 24’de profillerin çalışma sahasında lokasyonlarına oturtularak işaretlenmiştir.



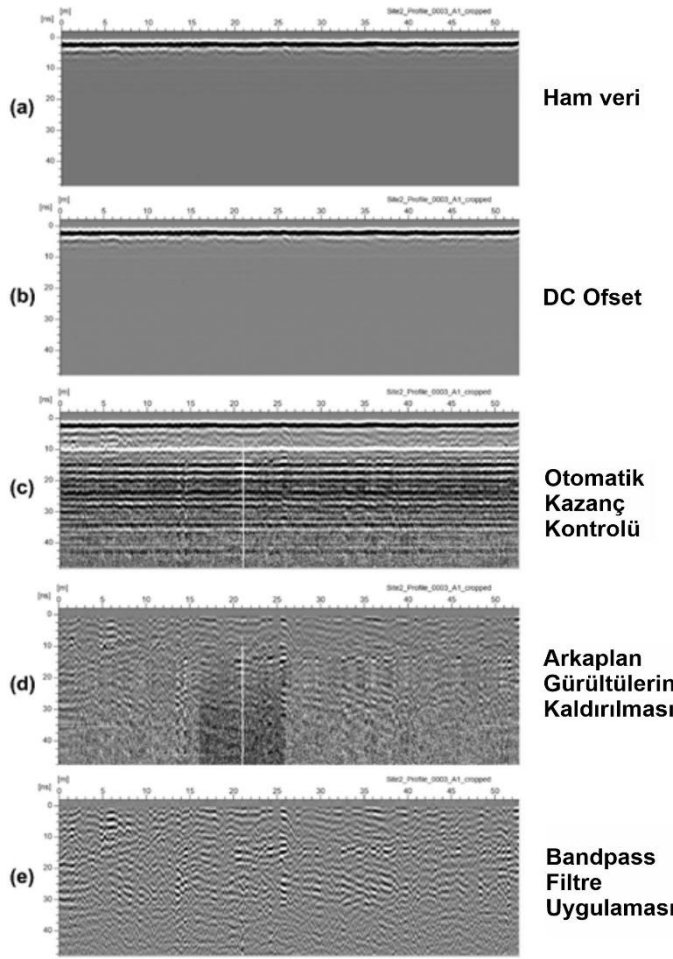
Şekil 23. ERT_2 profilinin görünür öz direnç, hesaplanan görünür öz direnç ve Ters çözüm modeli



Şekil 24. ERT profillerinde gözlemlenen anomalilerin harita düzlemine aktarımı

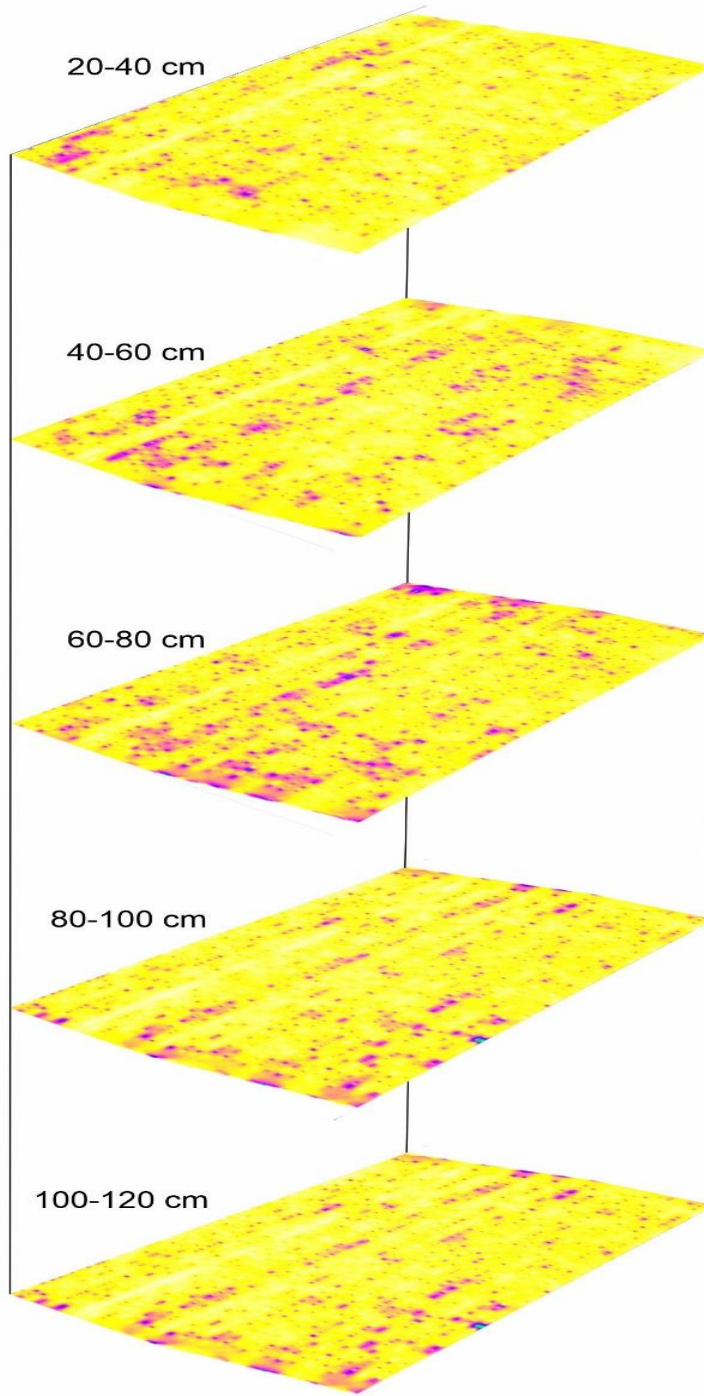
GPR ölçümleri başlamadan önce saha planlaması yapılmıştır. Bu bağlamda GPR ölçümlerinin yapılması için profil aralığı 1m olarak belirlenmiştir. Profilin başlangıç ve bitiş noktalarına çakılan kazıklara ipler bağlanarak ölçüm yönlerinin düzgün olması sağlanmıştır. Aktif kazı alanında yapılan incelemeler doğrultusunda yüzeye çok yakın gömülü yapıların varlığının görülmesine bağlı olarak anten seçimi 2 m derinliğe kadar yüksek çözünürlüklü görüntüleme hedeflenmiş, ölçümlerde MALA marka ProEx ünitesi ve 500 MHz antenler kullanılmıştır. Bir radar izi 2048 örnekten, 4 yığından ve 144 ns uzunluktan oluşmaktadır. Profil yönü genel olarak kuzeydoğu-güneybatı yönündedir. Çalışma alanında toplam 33 profil GPR verisi toplanmıştır.

Ölçümler tamamlandıktan sonra, veri işleme ve 3B görselleştirme için MALA Vision yazılımı kullanılmıştır. İlk aşamada, GPR cihazının içindeki sinyal gecikmesini ve anten ile dünya yüzeyi arasındaki mesafeden kaynaklanan zaman kaymasını düzeltmek için zaman sıfır düzeltmesi uygulanmıştır (Şekil 25). Bu düzeltme, tüm yansımaların derinlikte düzgün bir şekilde hizalanmasını sağlayarak yapı derinliği tahminindeki hataları azaltmaktadır. GPR verilerindeki DC Ofseti, elektronik devreler nedeniyle sinyalin ortalama büyüklüğünün sıfırdan farkıdır. Bu etki, gömülü yapılardan gelen zayıf yansımaları gizleyebilecek yapay sinyal taban çizgisindeki kaymaları önlemek için ortadan kaldırılmıştır. Bu ofseti kaldırarak, ince yeraltı özelliklerine karşılık gelen küçük genlik değişimleri daha ayırt edilebilir hale gelmiştir.



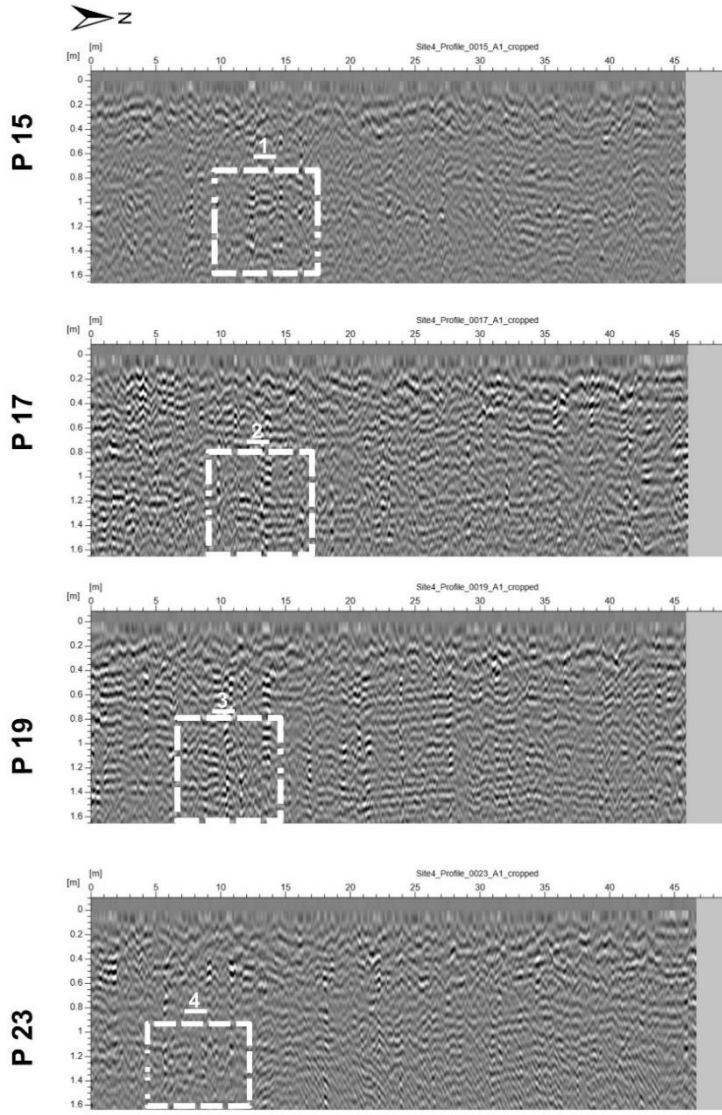
Şekil 25. GPR verilerinin işlenmesi ve görüntülenmesi aşamasında yapılan veri işlem adımları

EM dalgaları, zeminden yayılırken hızla zayıflar. Genlik zayıflaması, sinyalleri belirli bir pencere boyutu içinde dinamik olarak yükselten Otomatik Kazanç Kontrolü (AGC) ile ortadan kaldırılabilir (Annan, 2005). Bu süreç, daha derin yapılardan gelen zayıf yansımaları artırarak bunları radargramlarda görünür hale getirir. GPR sinyalleri, verici antenden alıcı antene doğrudan varışlar (çınlama etkisi), dünyanın yüzeyinden ilk yansıma gibi olgular nedeniyle arka plan gürültüsüne sahiptir. Bu gürültü radargram boyunca düzgün ve doğrusaldır ve basit pencere ortalaması ile giderilebilir. Bu tür arka plan gürültüsünün ortadan kaldırılması, önemli olanların görünürlüğünü artırır ve yorumlamanın istenmeyen eserlerden etkilenmemesini sağlar. Bu işleme adımları, arkeolojik jeofizik araştırmalarında sıklıkla kullanılan yaygın veri işleme teknikleridir (Deiana ve Previato, 2023; Martorana vd., 2023; Milo vd., 2022). Yukarıda belirtilen veri işleme adımlarının örnek bir GPR profili üzerinde sıralı olarak uygulanması Şekil 25'te gösterilmektedir. Veri işlem adımları sonrası elde edilen radargramlar ilerleyen paragraflarda özetlenmiştir. Veri işlem adımları sonrası 20 cm aralıklı olarak hazırlanan derinlik kesitleri ise Şekil 26'da verilmiştir.

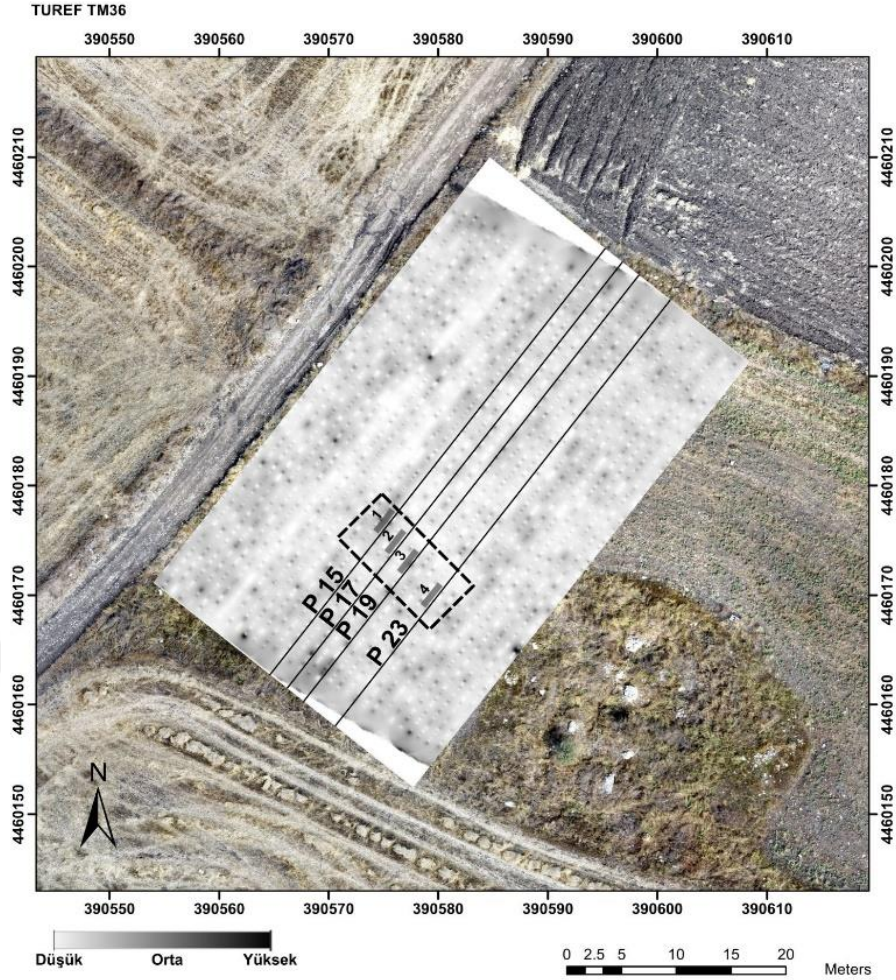


Şekil 26. Yer radarı derinlik kesitleri

Şekil 27’de verilen GPR profillerine bakıldığında 15, 17,19 ve 23 no’lu profillerde benzer bölgelerde sıralı profillerde gözlenen anomaliler işaretlenmiştir. İşaretlenen bu alanlarda tekrarlı yansımalar içeren bu anomaliler formasyondaki bir süreksizlik ya da arkeolojik bir yapının varlığına karşılık geldiği düşünülmektedir. Şekil 27 incelendiğinde sözü edilen anomalilerin yaklaşık olarak 0.8 ile 1 metre derinlikte olduğu gözlemlenmektedir. Bu profillerin çalışma alanındaki konumları da Şekil 28’de verilmiştir.

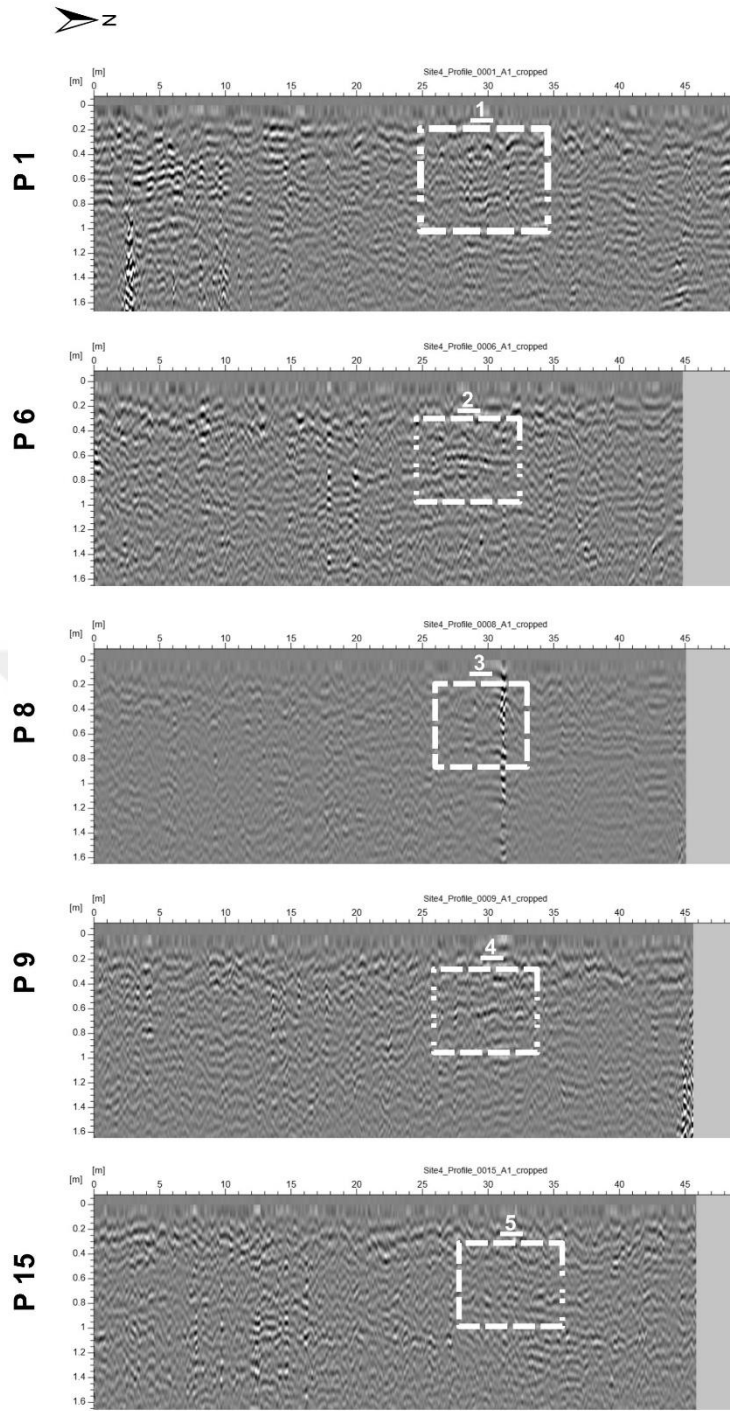


Şekil 26. 1 no'lu anomalinin gözlemlendiği işaretlenen GPR profilleri

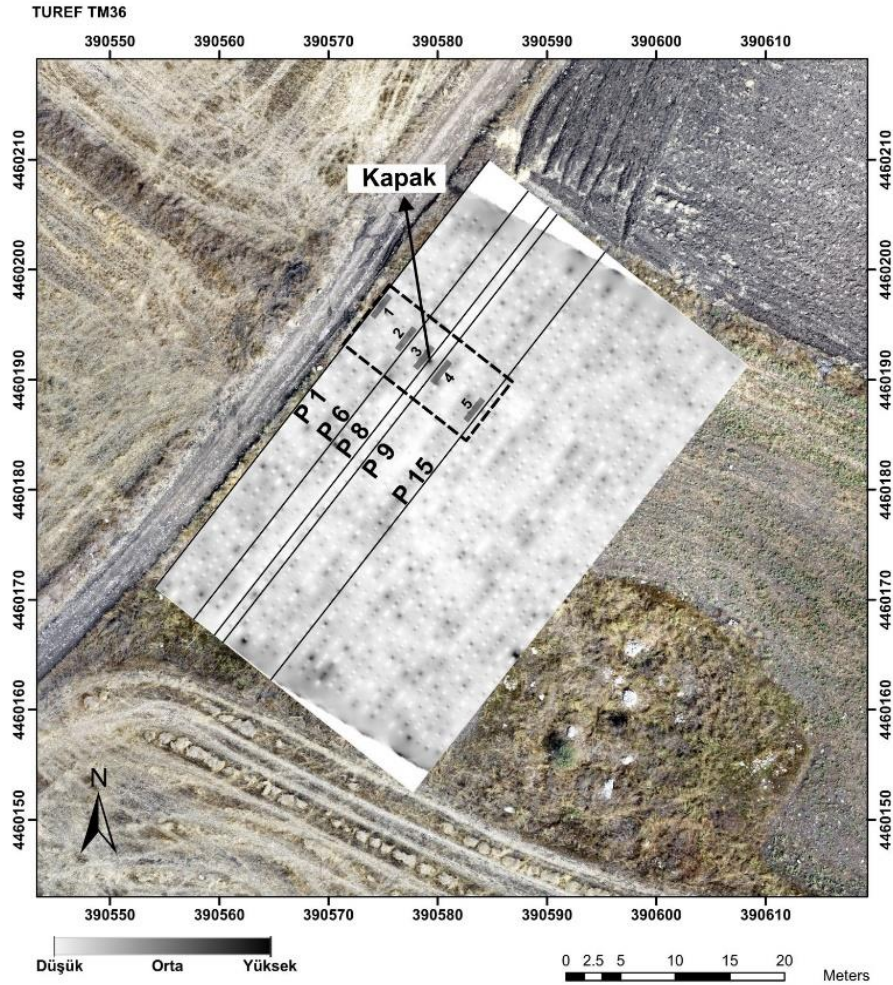


Şekil 27. 1 no'lu anomalinin gözlemlendiği hatların çalışma alanındaki lokasyonu

Çalışma alanında birbirini takip eden profillerde gözlemlenen diğer bir anomali ise 2 nolu anomalidir (Şekil 29). Bu anomali incelendiğinde 1, 6, 8, 9 ve yine 15 no'lu profillerde gözlemlendiği ve 2 no'lu bu anomali kümesinin çok sığda yerden yaklaşık 0.3 m derinde olduğu Şekil 29'dan görülmektedir. Bu anomalilerin çalışma alanındaki konumları da çalışma alanını hemen batısında bulunan yoldan çalışma alanını ortasına doğru gözlenmekte olup Şekil 30'da verilmiştir.



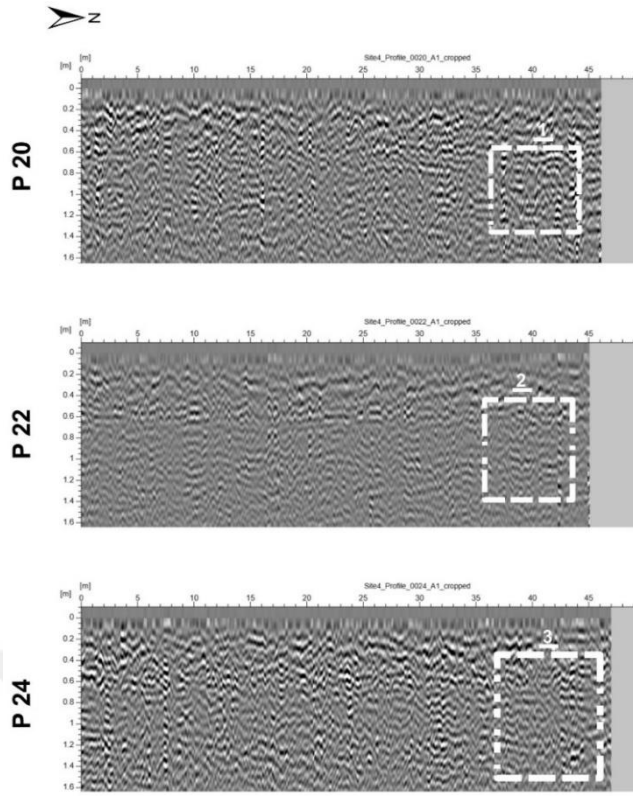
Şekil 28. 2 no’lu anomalinin gözlemlendiği işaretlenen GPR profilleri



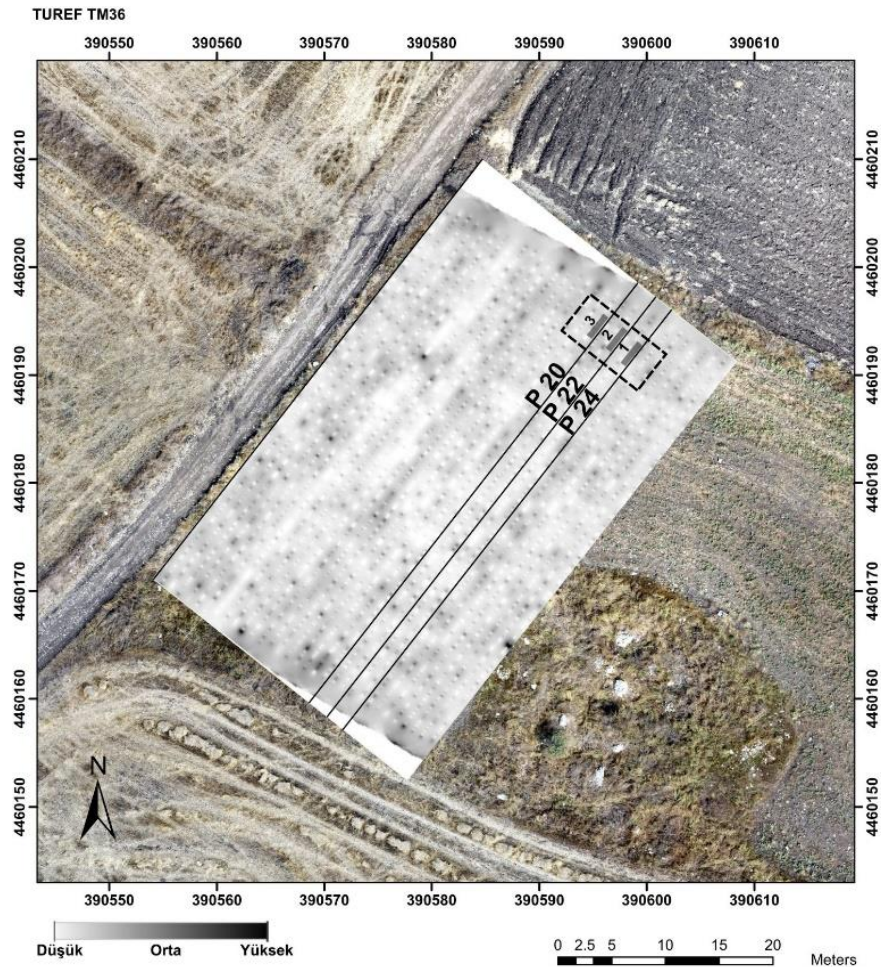
Şekil 30. 2 nolu anomalinin gözleendiği hatların çalışma alanındaki lokasyonu

Çalışma alanından alınan GPR verilerinin analizi sonucunda elde edilen diğer bir anomali ise 3 numaralı anomali (Şekil 31). Burada birbirini takip eden 3 profile gözlemlenen bu anomalinin derinliği ise 0.6 ile 0.3 m derinliklerde değişmektedir. Şekil 32’de 3 no’lu anomali kümesinin çalışma alanındaki lokasyonu verilmiştir.

GPR verilerinden elde edilen derinlikler, EM sinyalin yer altındaki gömülü nesnelerden yansıyan sinyallerinden oluşmaktadır. Buna bağlı olarak elde edilen derinlikler yeraltındaki yapıların, üst kısımlarının derinlikleri olduğu unutulmamalıdır. Çalışma alanında olduğu düşünülen arkeolojik yapının içerisinde su muhteva ettiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak su muhteva eden yapılarda EM dalganın yansıma yapamayacağı, soğurulacağı da bilinmektedir. Bu bağlamda GPR verilerinden çalışma alanında gözlemlenen anomalilerin, çalışma alanındaki konumları ve üst derinlikleri tespit edilmiştir.



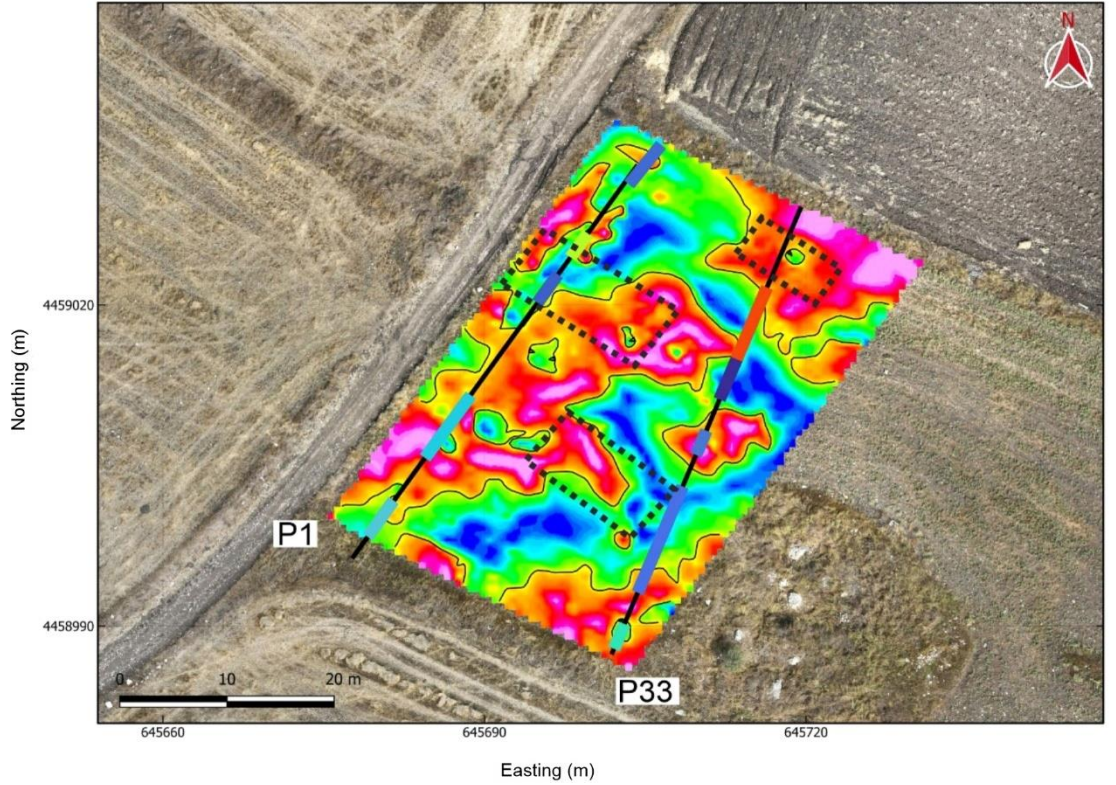
Şekil 29. 3 nolu anomalinin gözlemlendiği işaretlenen GPR profilleri



Şekil 30. 3 nolu anomalinin gözlemlendiği hatların çalışma alanındaki lokasyonu

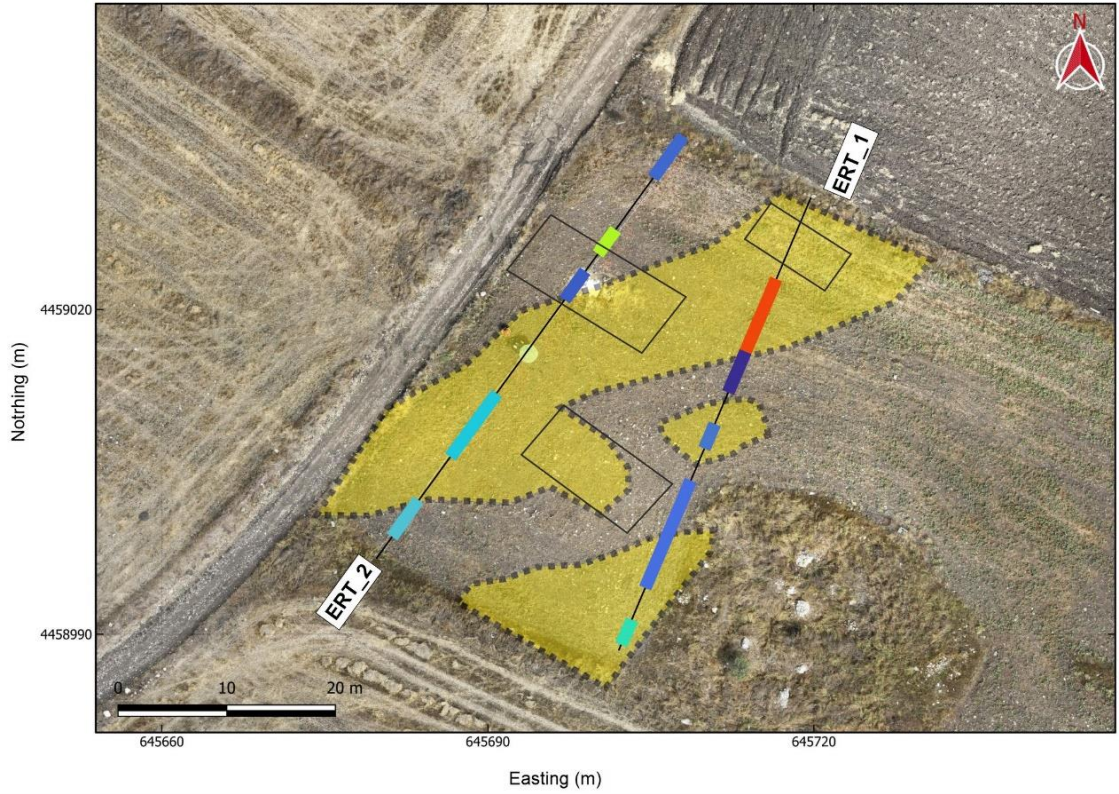
6.TARTIŞMA

Bu tez çalışmasından elde edilen çok yöntemli arkeojeofizik verilerinin daha sonraki analizi, anomali gözlenen alanların detaylı bir şekilde tanımlanmasını sağlamıştır. Sonuçların genel değerlendirmesi için, her bir jeofizik yöntemde işaretlenen anomaliler bir harita üzerinde bir araya getirilmiş ve birbirleriyle olan korelasyonlarına göre gruplandırılmıştır (Şekil 33 ve 34). Bu gruplamalara bağlı olarak en az iki farklı yöntemde anomalilerin gözlemlendiği alanlar numaralandırılmış ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir (Şekil 34). Bu anomalilerin yorumları ilerleyen paragraflarda verilmiştir.



Şekil 31. Manyetik, ERT ve GPR yöntemlerinden elde edilen anomalilerin çalışma alanındaki toplu gösterimi. Taban harita manyetik, siyah çizgiler GPR ve iki hat boyunca siyah profil çizgileri ise ERT profillerindeki anomalileri göstermektedir.

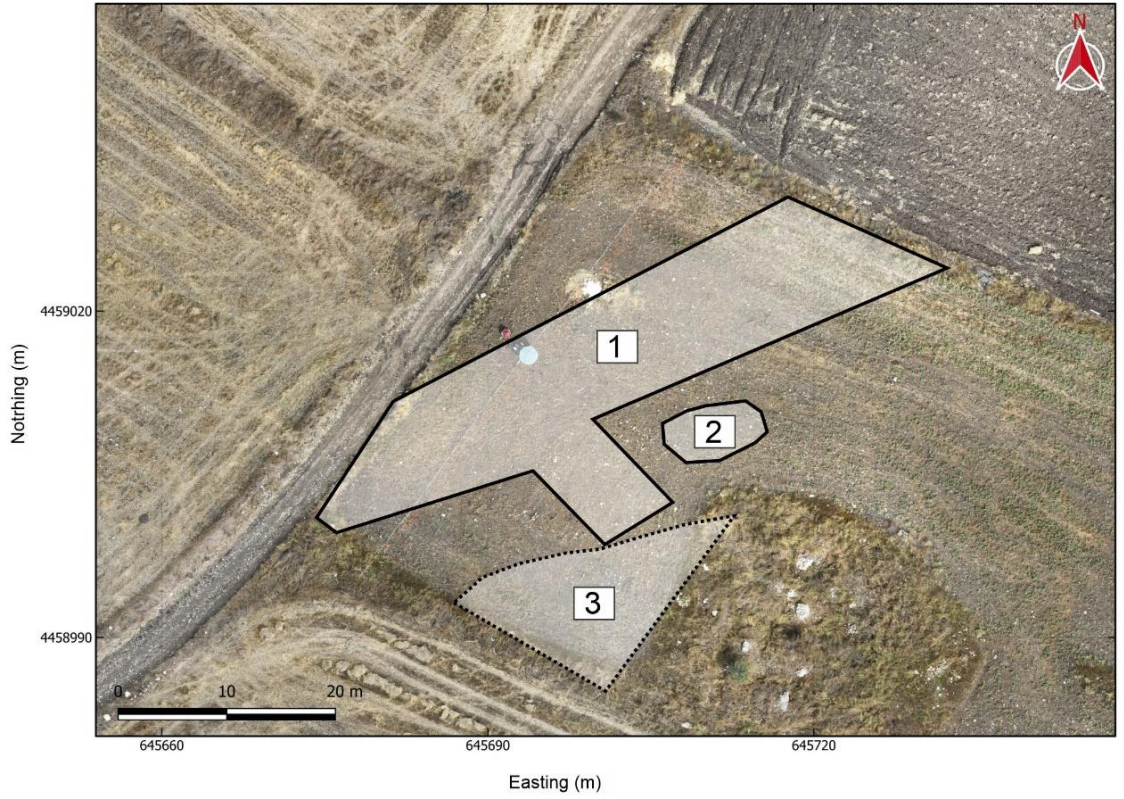
Çalışma alanında bulunan ve birden fazla jeofizik yöntemde anomalilerin üst üste bindiği [1] ve [2] numara ile numaralandırılmış anomaliler manyetik yöntemde daha net gözlemlenirken, GPR yönteminde kısmi olarak gözlemlenmiştir (Şekil 35). Bunun yanında bu alanda bulunan ERT profillerinde de bu anomaliler görülmektedir. Buna bağlı olarak bu anomalilerin çalışma alanının hemen doğusunda bulunan hamam yapısına su getiren/götüren geniş kanallara karşılık geldiği düşünülmektedir.



Şekil 32. Tez kapsamında kullanılan jeofizik yöntemlerden veri işlem aşamaları sonrasında gözlemlenen anomalilerin üst üste bindirilmesi. Kesik çizgili sarı renkli olan anomaliler manyetik yöntemden elde edilen, siyah içi boş dikdörtgenler GPR yönteminden elde edilen ve iki hat boyunca farklı renkteki düz çizgi ile çevrelenen anomaliler ERT yönteminden elde edilen anomalileri göstermektedir.

[3] numaralı diğer anomali, sadece manyetik yöntemde güçlü anomaliler olarak karşımıza çıkmakta olup diğer yöntemlerle zayıf korelasyon göstermektedir. Bu anomali de gömülü bir yapıya karşılık geliyor olabilir. Buranın, özellikle yıkıntı halinde bulunan hamam yapısının hemen yanında gözlemlendiğinden bu yapı ile ilişkili bir yapı olma olasılığı yüksektir. Ancak diğer yöntemlerle desteklenmediğinden bu alan hakkında bir değerlendirme yapmak çok doğru olmayacaktır.

Arkeolojik çalışmalarda kullanılan jeofizik yöntemler, yüzeyin altında saklı olan kültürel mirasın tahribatsız bir şekilde tanımlanmasında geçmişten günümüze kadar yüksek bir başarı elde etmiştir. Sonuç olarak, kazı alanlarında gömülü arkeolojik tarih katmanlarının ortaya çıkarılması sürecinde aktif bir rol üstlenmekte ve kazı süreci boyunca kılavuzluk yapmaktadır.



Şekil 33. Çalışma alanındaki potansiyel gömülü yapıların ve/veya binaların dağılımı. Belirleme, birden fazla jeofizik yöntemde anomali gösteren yerlerin işaretlenmesi yoluyla yapılmaktadır. Siyah çizgilere sahip poligonlar, üç yöntemde de uyumlu güçlü anomaliler gösterirken (1 ve 2 nolu anomali), soluk kesikli poligonlar (3 nolu anomali) nispeten daha zayıf anomaliler göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, Kalehisar Ören Yeri'ndeki bir sahada, olası sığ arkeolojik kalıntıları ve/veya yapıları tanımlamak ve haritalamak için tahribatsız, yüksek çözünürlüklü çok yöntemli bir jeofizik araştırması yürütülmüştür. Literatürdeki çalışmalar, entegre jeofizik yöntemlerin gömülü arkeolojik yapıların tahribatsız tespitinde avantajlı olduğunu, manyetik, ERT ve GPR yöntemlerinin kullanımının önemli ölçüde başarılı olduğunu göstermektedir.

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışması, Çorum Alaca ilçesi sınırlarında bulunan Kalehisar Ören Yeri'ndeki bir sahada bulunan arkeolojik kalıntıların tahribatsız bir şekilde incelenmesi için çoklu jeofizik yöntemlerin (GPR, ERT ve manyetik) birlikte kullanımı ile tespit edilmesini içermektedir.

Çalışma alanında GPR, ERT ve manyetik yöntemlerinin başarıyla uygulanması sayesinde çalışma alanına hemen komşu olan ve günümüzde döküntü halinde olan hamam yapısına su iletimini sağlayan arkeolojik yapılar belirlenmiştir. Bu bağlamda bu yapıların özellikle manyetik yöntemde yönelimi güneybatı-kuzeydoğu olarak belirlenmiş olup bu ana yönelimli yapıdan hamam yapısına doğru daha ince kanalların olabileceği de GPR ve ERT yöntemlerinden gözlemlenmiştir. Sözü geçen yapıların derinlikleri ERT yönteminde yaklaşık 1.5-2 metre civarında gözlemlenirken GPR yönteminde ise farklı noktalarda 0.3 ila 2 metre arasında derinlikler hesaplanmıştır.

GPR, ERT ve manyetik yöntemlerinin Kalehisar Ören Yeri'nde başarılı bir şekilde uygulanması, kapsamlı kazı ihtiyacını azaltarak arkeolojik saha çalışmalarını önemli ölçüde destekleme potansiyelini de açıkça göstermektedir, böylece zamandan ve maddi kaynaklardan tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca, bu çalışmanın sonuçları gelecekteki arkeolojik araştırmaların planlanması için değerli bir temel oluşturacak ve bölgenin kültürel mirasının hem korunmasına hem de daha derin anlaşılmasına katkıda bulunacaktır.

KAYNAKÇA

- Abouarab, M. A. R., Ibrahim, A., Eldosouky, A. M., Aboalkassim, I., Younes, A., El-Qady, G., Abbas, A. M., El-hemaly, I. A., Awad, A., Wilson, P., Elfadaly, A. ve Lasaponara, R. (2024). Identification of Architectural Roman Remains in the Complex Archaeological Site of Buto ‘Tell El Fara’in’, Northern Egypt, Using Geophysical and Remote Sensing Data. *Archaeological Prospection*, 32(2), 437-457.
- Akca, İ., Balkaya, Ç., Pülz, A., Alanyalı, H. S. ve Kaya, M. A. (2019). Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 163, 22-30.
- Akça, İ. ve Gündoğdu, N.Y. (2010). Samsun-Baruthane Tümülüslerinin Doğru Akım Özdirenç Yöntemi ile İncelenmesi. *Yerbilimleri*, 31 (3): 205–215.
- Akin, U. ve Çiftçi, Y. (2011). *Structural discontinuities of Turkey: Geological and geophysical analysis (gravity and magnetic)*. Monography series, General Directorate of Mineral Research and Exploration, 6, Ankara.
- Arisoy, M. ve Dikmen, Ü. (2013). Edge Detection of Magnetic Sources Using Enhanced Total Horizontal Derivative of the Tilt Angle. *Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*, 34, 73-82.
- Aslanapa, O. (1968). *Kalehisar’da Bulunan Mimari Eserler, Sanat Tarihi Yıllığı-II, 1966-1968*. İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayınları, s.1-5.
- Ateş, A. (2004). *Gravite ve Manyetik Yöntemler ve Uygulamaları*. Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, s.71
- Atkinson, R.J.C. (1952). Methodes Electriques de Prospection en Arceologie, A. Laming (Ed.), *La Découverte du Passé*, Picard, 59–70.
- Avcı, K. (2022). *Samsun Canik Toptepe Tümülüsleri Arkeojeofizik Araştırmaları*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa. İstanbul.
- Balkaya, Ç., Kalyoncuoğlu, Ü.Y., Özhanlı, M., Merter, G., Çakmak, O. ve Güven İ.T. (2018). Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography Studies in the Biblical Pisidian Antioch City, Southwest Anatolia. *Archaeological Prospection*. 25(4), 285-300.

- Baranov, V. (1957). A New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps: Pseudo-Gravimetric Anomalies. *Geophysics*, 22(2), 359-382.
- Baranov, V. ve Naudy, H. (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29(1), 67–79.
- Blakely, R.J. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Pres. Londra.
- Büyüksaraç, A., Bilim, F., Ateş, A. ve Bektaş, Ö. (2006). Investigation of Magnetic Survey Data of Buried Grave Jars in Harmanoren Necropolis (Turkey) Using Linear Transformations and Analytic Signal. *Journal of Archaeological Science*, 33, 910-920.
- Casas, A., Cosentino, P. L., Fiandaca, G., Himi, M., Macias, J. M., Martorana, R., Muñoz, A., Rivero, L., Sala, R. ve Teixell, I. (2018). Non-invasive Geophysical Surveys in Search of the Roman Temple of Augustus Under the Cathedral of Tarragona (Catalonia, Spain): A Case Study. *Surveys in Geophysics*, 39(6), 1107–1124. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9470-6>
- Conyers, L.B. (2012). *Interpreting ground-penetrating radar for archaeology*, Routledge.
- Daily, W., Binley, A.M., LaBrecque, D. ve Ramirez, A. (2004). Electrical resistance tomography. *The Leading Edge*, 23 (5), 438–442.
- Daily, W. ve Owen, E. (1991). Cross-borehole resistivity tomography. *Geophysics*, 56, 1228-1235.
- Daily, W., Ramirez, A., Binley, A. ve LeBrecque, D. (2004). Electrical resistance tomography. *The Leading Edge*, 23(5), 438-442.
- Daily, W.D. (1984). Underground oil shale retort monitoring using geotomography. *Geophysics*, 49, 1701-1707.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar (2nd ed.)*. Institution of Electrical Engineers.
- Di Santalo, A., Scancella, G., Cuomo, V. ve Buongiorno, M. F. (2016). Application of ERT and GPR geophysical testing to the subsoil characterization of cultural heritage sites in Napoli (Italy). *Measurement*, 94, 476–492. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.08.031>
- Drahor, M.G. (2007). Arkeolojik Alan İncelemelerinde Elektrik Öz direnç Prospeksiyonu. *Arkeoloji ve Sanat*, 124.
- Drahor, M.G. (2006). Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 59(3), 205–223. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.10.008>

- Drahor, M. G., Berge, M. A., Kurtulmuş, T. Ö., Hartmann, M. ve Speidel, M. A. (2008). Magnetic and electrical resistivity tomography investigations in a Roman legionary camp site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeological Prospection*, 15(3), 159–186. <https://doi.org/10.1002/arp.332>
- Drahor, M. G., Berge, Meriç. A. ve Öztürk, C. (2011). Integrated geophysical surveys for the subsurface mapping of buried structures under and surrounding of the Agios Voukolos Church in İzmir, Turkey. *Journal of Archaeological Science*, 38(9), 2231–2242. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.03.025>
- Drahor, M. G., Berge, M. A., Öztürk, C. ve Ortan, B. (2015). Integrated geophysical investigations at a sacred Hittite Area in Central Anatolia, Turkey. *Near Surface Geophysics*, 13(6), 523–543.
- Ekinci, Y.L. (2005). *Amorium Antik Kenti'nin Manyetik Yöntem ile Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale
- Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Şeren, A., Kaya, M.A. ve Lightfoot, C.S. (2014). Geomagnetic and Geoelectrical Prospection for Buried Archaeological Remains on the Upper City of Amorium, a Byzantine City in Midwestern Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(1), 015012.
- Erçetin, E. (2023). *Silyon Arkeolojik Kültürel Mirasının Araştırılması ve Korunmasında Jeofizik Çalışmalar*. Yayınlanmamış Doktora Tezi İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul.
- Fernandez, M. G., Lopez, Y. A. ve Las Heras, F. (2019). Autonomous Airborne 3D SAR Imaging System for Subsurface Sensing: UWB-GPR On Board a UAV for Landmine and IED Detection. *Remote Sensing*, 11, 20, 2357.
- Gunn, P. J. (1974). Linear transformations of gravity and magnetic fields. *Geophysical Prospecting*, 23: 300–312.
- Gunn, P., Maidment, D. ve Milligan, P. (1997a). Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 175-185.
- Gunn, P., Minty, B. ve Milligan, P. (1997b). *The Airborne Gamma-Ray Spectrometric Response Over Arid Australian Terranes*. In A. Gubins (Ed.), *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, (s. 733-740). Australia.

- Jiang, F., Dong, L. ve Dai, Q. (2020). Electrical Resistivity Inversion Based on a Hybrid CCSFLA-MSVR Method. *Neural Processing Letters*, 51:2871–2890 <https://doi.org/10.1007/s11063-020-10229-4>
- Karaaslan, H. (2015). *Alabanda Antik Kentin Meclis Binası İçindeki Gömülü Yapıların Elektrik Yöntemlerle Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Kaya, M. A., Ekinci, Y. L., Yiğit, P. ve Lightfoot, C. S. (2007). Magnetic investigation at the Amorium archaeological site, Emirdağ, Afyon, Turkey. *Jour. of the Balkan Geophysical Soc*, 10(1), 1-7.
- Kayın, S. (2010). *Akmonia Antik Kentinde (Banaz/Uşak) Bir Jeofizi Araştırma*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Kayın, S., Aydın, N. G., Apaydın, O. ve İşseven, T. (2025). Integrated Geophysical Survey (GPR, ERT and Magnetometry) at the Kalehisar Archaeological Site in Central Anatolia. *Archaeological Prospection*. (Early View). <https://doi.org/10.1002/arp.70000>
- Koşay, H. Z. (1936). *Türk Tarih Kurumu tarafından yapılan Alaca Höyük hafriyatı: 1936'daki çalışmalara ve keşiflere ait ilk rapor*. Türk Tarih Kurumu.
- Küçükdemirci, M. (2014). *Arkeolojik alanlarda manyetik ve yer radarı (GPR) yöntemi uygulamaları*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi. İstanbul.
- Küçükdemirci, M., Özer, E., Salvatore, P., Baydemir, N. ve Zamuner, D. (2017). An application of integration approaches for archaeogeophysical data: Case study from Aizanoi. *Archaeological Prospection*, 25, 33–44.
- Lager, D. L. ve Lytle, R. J. (1977). Determining a subsurface electromagnetic profile from high-frequency measurements by applying reconstruction-technique algorithms. *Radio Science*, 12(2), 249–260.
- Loke, M. H. (2019). *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*, Geotomo Software, Malaysia. <http://www.geotomosoft.com/coursenotes.zip>
- Miller, H.G. ve Singh, V. (1994). Potential Field Tilt-A New Concept for Location of Potential Field Sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3), 213-217.
- Murdie, R.E., White, R.H., Barratt, G., Gaffney, V. ve Goulty, N. R. (2003). Geophysical surveys of Bury Walls hill fort, Shropshire. *Archaeological Prospection*, 10(4), 249–263. <https://doi.org/10.1002/arp.216>
- 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.

- Neubauer, W., Eder- Hinterleitner, A., Seren, S. ve Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: an approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9(3), 135–156. <https://doi.org/10.1002/arp.183>
- Ogden, J., Tucker, G., Hay, S., Kay, S., Strutt, K., Keay, S., Camardo, D. ve Ellis, S. (2012). *Geophysical prospection in the Vesuvian cities*. Pompeii Archaeological Research Project: Porta Stabia.
- 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 and 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.
- Palacky, G. J. (1987). *Resistivity characteristics of geologic targets*. In M. N. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics: Vol. 1. Theory* (pp. 53–129). Society of Exploration Geophysicists.
- Pan, S.X. ve Kak, A.C. (1983). A computational study of reconstruction algorithms for diffraction tomography: Interpolation versus filtered backpropagation. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions Acoustics, Speech, Signal Processing*, 31, 1262-1275.
- Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Tsokas, G. N. ve Sarris, A. (2006). Two- dimensional and three- dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection*, 13(3), 163–181
- Phillips, J.D., Hansen, R.O. ve Blakely, R.J. (2007). The Use of Curvature in Potential-Field Interpretation. *Exploration Geophysics*. 38(2), 111-119.
- Roest, W. R., Verhoef, J. ve Pilkington, M. (1993). Reply by the authors to N. L. Mohan. *Geophysics*, 58 (8) 1215-1216
- Roest, W. R., Verhoef, J. ve Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116–125.
- Sağın, O.C. (2022). Nevşehir Ürgüp Yeşilöz Köyü Hodul Dağı Arkeojeofizik Çalışmaları. Yayımlanmamış Yüksek Lisans tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi. Isparta.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J. ve Ushijima, K. (2002). Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 231–244.

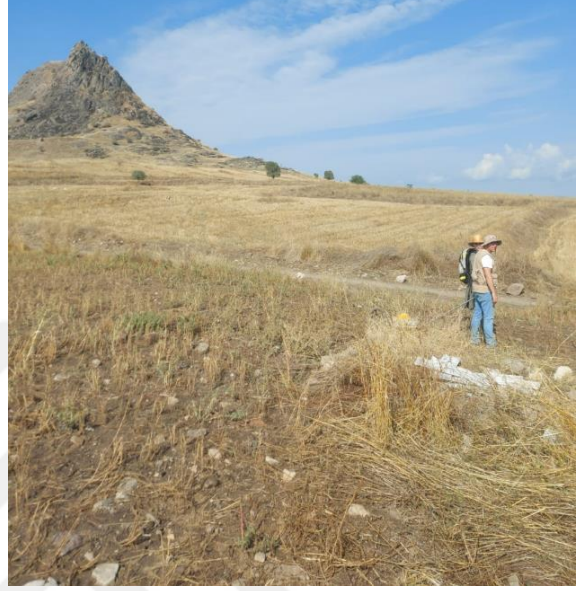
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D. ve Smith, R. (2007). Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *Leading Edge*, 26: 1502–1505
- Schmidt, A. (2007). *Archaeology, magnetic methods*. In D. Gubbins & E. Herrero-Bervera (Eds.), *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_1
- Schmidt, A. (2013). *Earth Resistance for Archaeologists*. Schnauffer,. Plymouth, UK: Altamira Press.
- Seren, S., Eder-Hinterleitner, A., Locker, K., Melichar, P.ve Neubauer, W. (2007). Extended comparison of difference GPR systems and antenna configurations at the Roman site of Carnuntum. *Near Surface Geophysics*. 5(6), 389-394.
- Sünbül, F. (2007), *Balıkesir-Burhaniye-Ören'deki Bergaz Tepe Adremyteion Antik Alanının Arkeojeofizik Yöntemlerle Tespiti*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Şahin, M. K. (2018). Çorum ve çevresinde Anadolu Selçuklu dönemi düşünce ve kültürünün oluşumunda bazı yapılar üzerine yorumlamalar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen - Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi* (44), 177-200.
- Şahin, M. K., Çakar, M., ve Bilgin, A. R. (2021). *2021 yılı Kalehisar arkeolojik kazı çalışmaları [Kazı raporu]*. Anıtlar ve Müzeler Genel Müdürlüğü.
- Şahin, M. K. (2022). Orta Karadeniz’de Bir Anadolu Selçuklu Kenti: Kalehisar’dan Bezemeli Mimari Parçalar Üzerine Çözümlemeler. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi* (55), 214-245.
- Ullrich, B., Freiboth, R., Zoellner, H., Beilke- Voigt, I., Mehner, A. ve Kaufmann, G. (2016). Multi- technique Geophysical Survey in and around the Hillfort Lossow – a Bronze and Iron Age Central Site in Brandenburg, Germany. *Archaeological Prospection*, 23(3), 181–193. <https://doi.org/10.1002/arp.1538>
- Ünyay, M. M. (2019). *Pisidia antiokheia antik kenti aediculus bazilikası ve civarı arkeojeofizik araştırması*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Vaughan, C., J. (1986). Archaeological Site Surveying Program at the University of Nebraska. *Geophysics*, 51(3), 538-552.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M. ve MacKenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *Leading Edge* 23(2), 116–119. <https://doi.org/10.1190/1.1651454>

- Worthington, M.H. (1984). An introduction to seismic tomography. *First Break*, 2 (11), 20-26.
- Yilmaz, S., Öksüm, E., Cakmak O., Doğan, O. ve 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), *Archaeological Prospection*, 25(3), 197-207.
- Zorlu, K. (2017). Arkeojeofizik Yöntemlerle Gömülü Arkeolojik Yapıların Belirlenmesi (Olba, Mersin, Türkiye), *Cumhuriyet Science Journal Supplement*, 184–192.



EKLER

Ek 1. Tez kapsamında yapılan arazi çalışması sırasında çekilen fotoğraflar



Ek 1. (Devamı)



ÖZGEÇMİŞ

Elifnur BAYDIN KAVAKLI. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeofizik mühendisliği bölümünde, lisans eğitimini 2019 yılında tamamlamıştır. Aydın Adnan Menderes Üniversitesinde tezsiz yüksek lisans eğitimini İş Sağlığı ve Güvenliği bölümünden mezun olarak tamamlamıştır. Anadolu Üniversitesi, Açıköğretim Fakültesi, Uluslararası İlişkiler bölümünde eğitim öğretime devam etmektedir. Aynı zamanda Hitit-Jeozemin Araştırma firmasında jeofizik mühendisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk annesidir.

