T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

TÜMLEŞİK JEOFİZİK UYGULAMALARDA YER RADARI VERİLERİNİN YORUMUNUN GELİŞTİRİLMESİ

Caner ÖZTÜRK

DANIŞMAN
Prof. Dr. Ali İsmet KANLI

II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Mahmut Göktuğ DRAHOR

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

Ocak, 2023

Doküman No	İlk Yayın Tarihi	Revizyon No	Revizyon Tarihi	Sayfa No
414.1.17F	04.03.2020	00	00.00.0000	1 / 1

Bu çalışma 05.01.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeofizik Mühendisliği Programı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Prof. Dr. Ali İsmet KANLI (Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Mustafa Kemal TUNÇER
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ali PINAR
Boğaziçi Üniversitesi
Kandilli Rasathanesi ve Deprem
Araştırma Enstitüsü

Prof. Dr. Ali Muhittin ALBORA
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Meriç Aziz BERGE
Dokuz Eylül Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Kızım Kumsal'a ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

TÜMLEŞİK JEOFİZİK UYGULAMALARDA YER RADARI VERİLERİNİN YORUMUNUN GELİŞTİRİLMESİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Danışman hocalarım Prof. Dr. Ali İsmet Kanlı ve Prof. Dr. Mahmut Göktuğ Drahor'a doktora sürecimin her aşamasında beni desteklemişler, çok değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol göstermişlerdir. Kendilerine teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitesi üyesi hocalarım Prof. Dr. Ali Pınar ve Prof. Dr. Mustafa Kemal Tunçer ile savunma sınavı jüri üyesi hocalarım Doç. Dr. Meriç Aziz Berge ve Prof. Dr. Ali Muhittin Albora hocalarıma değerli katkıları için teşekkür ederim.

Saha çalışmaları kapsamında hem tümleşik jeofizik verilerin toplanması hem de arkeolojik kazı çalışmalarının başarıyla gerçekleştirilmesinde gerekli olan tüm imkanları sağladıkları için çalışmalar sırasında Şapinuva Antik Kenti'nin kazı başkanı olan Prof. Dr. Aygül Süel hocam ile Arş. Gör. Semih Gerçek başta olmak üzere katkı sunan tüm kazı ekibine teşekkür ederim.

Saha çalışmaları sırasında yardım ve destekleri için Arş. Gör. Dr. Atilla Ongar, jeofizik mühendisleri Mustafa Sadık Yağlıdere ve Buket Ortan'a teşekkür ederim.

Sevgi ve sabırla tüm süreçte yanımda olan değerli eşim Berna Öztürk ile özveriyle beni yetiştiren annem Münevver Öztürk ve babam Ömer Öztürk'e çok teşekkür ederim.

Ocak 2023 Caner ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xvi**
ABSTRACT ..... **xviii**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **3**
2.1. YER RADARI YÖNTEMİNİN ARKEOLOJİK ALANLARDA UYGULAMA ÖRNEKLERİ 3
2.2. TÜMLEŞİK JEOFİZİK ÇALIŞMALARIN ARKEOLOJİK ALANLARDA UYGULAMA ÖRNEKLERİ 9
3. YÖNTEM **12**
3.1. ARKEOLOJİK ALANLARDA KULLANILAN TÜMLEŞİK JEOFİZİK YÖNTEMLER 12
3.1.1. Manyetik Gradyometre Yöntemi 13
3.1.2. Yer Radarı (GPR) Yöntemi 17
3.1.3. Elektrik Resistivite Tomografi (ERT) Yöntemi 33
3.2. ÇALIŞMA ALANI – ŞAPİNUVA ANTİK KENTİ (ÇORUM-ORTAKÖY) 36
3.2.1. Çalışma Alanı ve Çevresinin Jeolojisi 36
3.2.2. Şapinuva Antik Kentinin Arkeolojik Özellikleri ve Tarihi 40
4. BULGULAR **45**
4.1. ŞAPİNUVA ANTİK KENTİNDE ÖNCEKİ JEOFİZİK ÇALIŞMALAR DOĞRULTUSUNDA ÇALIŞMA ALANININ BELİRLENMESİ 45
4.2. TÜMLEŞİK JEOFİZİK VERİLERİNİN TOPLANMASI 46
4.3. TÜMLEŞİK JEOFİZİK VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YORUMLANMASI 49

4.3.1. Manyetik Gradyometre Verilerinin Değerlendirilmesi ve Yorumlanması 49
4.3.2. Elektrik Resistivite Tomografi (ERT) Verilerinin Değerlendirilmesi ve Yorumlanması 52
4.3.3. Yer Radarı Verilerinin Değerlendirilmesi ve Yorumlanması 56
4.4. ARKEOLOJİK KAZI ÇALIŞMALARI 59
4.5. YER RADARI VERİLERİNİN YORUMUNUN GELİŞTİRİLMESİ AMACIYLA TÜMLEŞİK JEOFİZİK VE ARKEOLOJİK KAZI SONUÇLARININ BİRLİKTE YORUMLANMASI 62
5. TARTIŞMA 96
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 100
KAYNAKLAR 105

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Flavia Solva (Avusturya) Roma yerleşmesinden elde edilen yer radarı derinlik kesmeleri (Seren vd., 2004). 5

Şekil 2.2: Flavia Solva (Avusturya) Roma yerleşmesinden elde edilen tüm derinliklerin yer radarı görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen arkeolojik yorum (Seren vd., 2004). 6

Şekil 2.3: Sardis Antik Kenti yer radarı çalışmalarına ait bir kazı plan görüntüsü üzerine yerleştirilmiş derinlik kesme görüntüsü *(Sardis Antik Kenti Kazı Başkanlığı 2021 yılı çalışma raporundan alınmıştır).* 7

Şekil 2.4: Eski Ahlat Şehir Mezarlığı yer radarı çalışmalarına ait bazı görüntüler *(Eski Ahlat Şehri Kazısı 2013 yılı çalışma raporundan alınmıştır).* 8

Şekil 2.5: Carnuntum (Avusturya) Roma yerleşmesinden elde edilen yer radarı görüntüsünün bir bölümü üzerine bindirilen elektrik resistivite görüntüsü ve bu görüntüler yardımıyla elde edilen arkeolojik yorum (Neubauer vd., 2002) 9

Şekil 2.6: Hasankeyf arkeolojik kazı çalışmaları sonrası ortaya çıkan yapılarla manyetik gradyometre sonuçların karşılaştırılması *(Hasankeyf Kazı Başkanlığı 2013 yılı çalışma raporundan alınmıştır).* 10

Şekil 2.7: Conyers (2018) çalışmasına ait Colorado'daki arkeolojik alanda yapılan manyetik gradyometre ve yer radarı çalışmalarının karşılaştırılmalı sonuçları. 11

Şekil 3.1: Gömülü bir fırında manyetik anomalinin oluşum şeması (Smelkalova vd., 2008).. 14

Şekil 3.2: Bazı kayaların manyetik duyarlılık değerleri (Smekalova vd., 2008) 15

Şekil 3.3: Geoscan firmasının ürettiği fluxgate türü manyetik gradyometre cihazı. 16

Şekil 3.4: Antenden çıkan radar dalgalarının yer içindeki yayınımı ve alıcı antene ulaşmasını gösteren basitleştirilmiş şekil (Conyers ve Goodman 1997'den düzenlenmiştir). 17

Şekil 3.5: E elektrik alan, B manyetik alan ve k yayınım doğrultusu ortogonaldir (Annan, 2008'den düzenlenmiştir). 20

Şekil 3.6: Serbest uzayda elektromanyetik dalganın yayınımı (E elektrik alan; H manyetik alan). Daniels, 2004'den düzenlenmiştir. 21

Şekil 3.7: Derinliğe bağlı olarak bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarının yüzeyden başlayarak (a) artış, (b) azalışı için dalga kırılma etkileri (Conyers ve Goodman 1997'den düzenlenmiştir) 23

Şekil 3.8: Sol: Bir GPR sistemine ait ekipmanların gösterimi. Sağ: Yatay tabakalı bir ortamda yayılan bir GPR sinyalinin dalga yayılımın gösterimi (Öztürk, 2013).....24

Şekil 3.9: Farklı merkez frekanslı GPR antenlerinin çeşitli araştırmalarda kullanımı. (a) 270 MHz anten ile altyapı sistemlerinin haritalandırılması; (b) 400 MHz anten ile arkeolojik alan araştırmaları; (c) 100 MHz anten ile karstik boşlukların belirleme çalışmaları; (d) 1600 MHz anten ile bina için taşıyıcı sistemlerin donatı tespiti.....25

Şekil 3.10: Örnekleme etkisini göstermek amacıyla sentetik yolla elde edilmiş hendek biçimli bir yapıya ilişkin üç farklı örnekleme aralığından radargramlar. (a) 25,6 cm, (b) 51,2 cm, (c) 102,4 cm (Conyers ve Goodman 1997'den alınmıştır). 27

Şekil 3.11: Farklı ölçüm aralıklarının karşılaştırılmasının yapıldığı 30-31.5 ns aralığından elde edilmiş radar kesitleri (Neubauer, 2002'den alınmıştır).....28

Şekil 3.12: Sol: PulseEKKO 1000 sistemi, Orta; NOGGIN sistemi, Sağ; GSSI SIR-3000 sistemi (Seren ve diğ., 2007). 29

Şekil 3.13: Düşük-frekanslı antenleri karşılaştırmalı yer radarı derinlik kesme görüntüleri (Seren ve diğ., 2007). 30

Şekil 3.14: Orta-frekanslı antenleri karşılaştırmalı yer radarı derinlik kesme görüntüleri. GSSI SIR-3000 sisteminin ikincisi anten gücünün arttırılması sonrasına aittir (Seren ve diğ., 2007). 31

Şekil 3.15: Yüksek-frekanslı antenleri karşılaştırmalı yer radarı derinlik kesme görüntüleri. GSSI SIR-3000 sisteminin ikincisi anten gücünün arttırılması sonrasına aittir (Seren ve diğ., 2007).....32

Şekil 3.16: Arkeolojik alanlarda yaygın olarak kullanılan resistivite elektrot dizilimleri.....34

Şekil 3.17: a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger ve c) dipol-dipol dizilimlerinin 100 Ωm'lik homojen ortam için hesaplanmış duyarlılık kesitleri (Berge, 2011'den düzenlenmiştir). 34

Şekil 3.18: Çok-kanallı elektrik resistivite verilerinin Wenner dizilimine göre toplanması (Griffiths ve Barker, 1993).....35

Şekil 3.19: Orta Anadolu bölgesi ve Çankırı-Çorum baseninin basitleştirilmiş jeolojisi ve bölgedeki önemli fayları gösteren harita. Açıklamalar: A: Ankara, Ça: Çankırı, Ç: Çorum, 1: Tersiyer çökel basen, 2: Rodop-Pontit bloğu, 3: Sakarya kıtası, 4: Galatya volkanik kompleksi, 5: Ofiyolitik melanj, 6: Kırşehir kıtası, 7: Toros bloğu (Karadenizli, 2011'den alınmıştır). 37

Şekil 3.20: (a) Taymaz ve diğ, 2007'den düzenlenen batimetri kabartmalı Doğu Akdeniz gölgesinin tektonik haritası. (b) Şapinuva ile diğer Hitit kentlerinin konumlarını ve bölgedeki aktif fayları gösteren tektonik harita (Drahor ve diğ., 2023'den alınmıştır). 39

Şekil 3.21: Şapinuva arkeolojik alanında G Binası olarak adlandıran yapısında yapılan arkeosismolojik çalışmalar sonucunda elde edilen deprem izlerinin fotoğraflar üzerinden gösterimi (Drahor ve diğ., 2023'den alınmıştır).....40

Şekil 3.22: Şapinuva Hitit yerleşmesinin genel kent planının uydu görüntüsü üzerinden gösterimi. 43

Şekil 3.23: Tepelerarası mevkiinin iki ayrı bakış açısından hava fotoğrafı. Kazılmış alan A binasını, yakınındaki kapalı kısım B ve sırasıyla C ile D binaları görülmektedir (Şapinuva Kazı Ekibinden alınmıştır). 43

Şekil 3.24: Ağılönü mevkiinin iki ayrı bakış açısından hava fotoğrafı. Alanın üst kısmında taş döşem, bunun güneyinde ise kazılmış alanlar görülmektedir. Bu alanların doğu kısım ile bunun güneyindeki kısımlar kapatılmıştır (Şapinuva Kazı Ekibinden alınmıştır). 44

Şekil 4.1: Şapinuva Tepelerarası mevkii manyetik gradyometre görüntüsü ve tez kapsamında tümleşik jeofizik çalışmanın yapıldığı alanın gösterimi 46

Şekil 4.2: Jeofizik çalışma alanlarının gridlenmesi çalışmasına ait bazı saha fotoğrafları. 47

Şekil 4.3: Şapinuva tümleşik jeofizik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen manyetik gradyometre çalışmasına ait bazı saha fotoğrafları. 48

Şekil 4.4: Şapinuva tümleşik jeofizik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen yer radarı çalışmasına ait bazı saha fotoğrafları 48

Şekil 4.5: Şapinuva tümleşik jeofizik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen ERT çalışmasına ait bazı saha fotoğrafları 48

Şekil 4.6: Araştırma alanına ait manyetik gradyometre görüntülerinin düzeltme ve değerlendirme aşamaları. 51

Şekil 4.7: Araştırma alanına ait ERT çalışmalarına ait 2-boyutlu ERT ters-çözüm modelleri. 54

Şekil 4.8: Araştırma alanına ait ERT çalışmalarına ait 2-boyutlu ERT ters-çözüm modellerinden oluşturulan derinlik kesme görüntüleri. 55

Şekil 4.9: Yer radarı çalışmalarıyla elde edilen radargramların değerlendirme aşamaları. 58

Şekil 4.10: Yer radarı çalışmalarına ait derinlik kesme görüntüleri. 59

Şekil 4.11: 2018 yılı kazı çalışmaları kapsamında açılan 6 açmanın son görüntüleri. 60

Şekil 4.12: 2018 yılı kazı çalışmaları sırasında ortaya çıkartılan mimari parçaların teknik çizimi (Şapinuva Kazı Ekibi tarafından yapılmıştır). 61

Şekil 4.13: 1 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 65

Şekil 4.14: 2 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 66

Şekil 4.15: 3 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 69

Şekil 4.16: 4 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 70

Şekil 4.17: 5 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 71

Şekil 4.18: 6 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 73

Şekil 4.19: 7 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 74

Şekil 4.20: 8 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 76

Şekil 4.21: 9 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 77

Şekil 4.22: 10 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 79

Şekil 4.23: 11 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 80

Şekil 4.24: 12 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması 82

Şekil 4.25: 13 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 83

Şekil 4.26: 14 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 85

Şekil 4.27: 15 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 86

Şekil 4.28: 16 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 88

Şekil 4.29: 17 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 89

Şekil 4.30: 18 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 91

Şekil 4.31: 19 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması 92

Şekil 4.32: 20 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması. 93

Şekil 4.33: Arkeolojik kazı sonrası ortaya çıkartılan yapıların havadan fotoğrafı ve mimari çizimiyle jeofizik (manyetik gradyometre, yer radarı ve ERT) yöntemlerle elde edilen görüntülerin birlikte gösterimi.....95

Şekil 5.1: Arkeolojik kazı sonrası çekilen hava fotoğrafının manyetik gradyometre, ERT ve yer radarı derinlik kesme görüntüleri üzerine oturtulmuş karşılaştırmalı görüntüleri.....97

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Farklı yeraltı ortamlarının bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı, elektrik iletkenlik σ ve sönümlenme α değerleri (Daniels, 2004'den düzenlenmiştir). 18

Tablo 4.1: Tümleşik jeofizik çalışmalarının veri toplama parametreleri. 49

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

ε_r : Bağıl dielektrik geçirgenlik
σ : Elektriksel iletkenlik
μ_r : Bağıl manyetik geçirgenlik
α : Sönümlenme katsayısı
v : Yer radarı dalga hızı
c : Işık hızı
f : Frekans
ω : Açısal frekans
Ω : Ohm
z : İnterpolasyon noktasındaki radar yansıma gücü.
E : Elektrik Alan
H : Manyetik Alan
D : Elektrik akı
B : Manyetik akı

Kısaltmalar **Açıklama**

GPR : Ground Penetrating Radar (Yer Radarı)
ERT : Elektrik Resistivite (Özdirenç) Tomografi
ha : Hektar
m : Metre
cm : Santimetre
km : Kilometre
GIS : Geographical Information Systems (Coğrafi Bilgi Sistemleri)
GPS : Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
CORS : Sürekli Çalışan Referans İstasyonları
nT : Nanotesla
TWT : Two-way traveltime (sehayat süresi)

ns : Nanosaniye
EM : Elektromanyetik
MHz : Megahertz
K : Kuzey
G : Güney
D : Doğu
B : Batı
MTA : Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
KAFZ : Kuzey Anadolu Fay Zonu
NAFZ : North Anatolian Fault Zone
MAFZ : Orta Anadolu Fay Zonu
ASZ : Amasya Makaslama Zonu
KF : Kazankaya Fayı
UF : Uğurludağ Fayı
BUF : Buğdaylı Fayı
AF : Almus Fayı
ÇF : Çekerek Fayı
SF : Sungurlu Fayı
EF : Ezinepazarı Fayı
EITZ : Elmadağ Bindirme Zonu
MÖ : Milattan önce

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TÜMLEŞİK JEOFİZİK UYGULAMALARDA YER RADARI VERİLERİNİN YORUMUNUN GELİŞTİRİLMESİ

Caner ÖZTÜRK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Ali İsmet KANLI

II. Danışman : Prof. Dr. Mahmut G. DRAHOR

Yeraltında gömülü arkeolojik yapılar ile katmanların özelliklerinin hasar vermeyen (non-destructive) tekniklerle belirlenmesi amacıyla dünyada en yaygın kullanılan araştırma tekniği jeofizik araştırma yöntemleridir. Şapinuva arkeolojik alanı gibi arkeolojik bağlam ile mimari yapı elemanlarının karmaşık özellik gösterdiği alanlarda ise jeofizik araştırma yöntemlerinin tümleşik (farklı birden fazla yöntemle) uygulanması daha yorumlanabilir ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi bakımından önemlidir. Jeofizik yöntemlerin tümleşik olarak uygulanması, gömülü arkeolojik nesnelerin yerini, derinliğini, boyutunu ve karakterizasyonunu belirlemek için daha faydalı sonuçlar verir. Kullanılan jeofizik yöntemlerin başarısı, aynı zamanda, yeraltındaki katmanlar ile gömülü arkeolojik yapılar arasındaki ilgili fiziksel karşıtlıklara da bağlıdır. Bu kapsamda Şapinuva arkeolojik alanı Tepelerarası bölgesinde geniş ölçekli manyetik gradyometre görüntülerinin irdelenmesi ile belirlenen 300 m² (10x30 m) boyutlarındaki bir alanda, yer radarı (GPR) ve elektrik resistivite tomografisi (ERT) yöntemleri uygulanmıştır. Alanda uygulanan bu yöntemler ile yeraltına ait farklı fiziksel özelliklerin

tanımlanması ve özellikle yer radarı verilerinin yorumunun geliştirilmesi amaçlanmıştır. Jeofizik çalışmalar sonrasında arkeolojik kazı çalışmaları başlatılmış ve jeofizik görüntüler ile karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, jeofizik görüntülerden tanımlanan gömülü arkeolojik yapılar ile kazılar sonucu gün yüzüne çıkarılan arkeolojik yapılar arasında büyük bir uyumun olduğunu göstermiştir. Manyetik gradyometre görüntülerindeki negatif izler ile ERT görüntülerindeki yüksek resistiviteli izlerin mimarı yapı duvarlarına karşılık geldiği belirlenmiştir. Buna karşın yer radarı yöntemiyle elde edilen sonuçlarda mimari yapı dağılımı belirgin olarak tespit edilememiştir. Arkeolojik kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu sonuçların elde edildiği manyetik gradyometre ve ERT yöntemlerinin sonuçlarıyla birlikte yer radarı verileri sunulan tez kapsamında detaylı olarak irdelenmiştir. Bu çalışma sonucunda yer radarı verilerinin yorumlanmasında önemli gelişmeler sağlanmıştır.

Ocak 2023 , 131 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yer radarı, GPR, Tümleşik jeofizik, Manyetik gradyometre, Elektrik resistivite tomografi, Şapinuva

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

IMPROVEMENT OF INTERPRETATION OF GROUND PENETRATING RADAR DATA IN INTEGRATED GEOPHYSICAL APPLICATIONS

Caner ÖZTÜRK

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Geophysical Engineering

Name of Programme

Supervisor: Prof. Dr. Ali İsmet KANLI

Co-Supervisor: Prof. Dr. Mahmut Göktuğ DRAHOR

Geophysical methods are the most widely used research technique in the world in order to determine the properties of buried archaeological structures and layers with non-destructive techniques. The application of integrated geophysical methods (with more than one method) in areas where the archaeological soil layer and architectural building elements are complex, such as the Şapinuva archaeological site, is important in terms of obtaining more interpretable and reliable results. The integrated application of geophysical methods yields more useful results for determining the location, depth, size and characterization of buried archaeological structures. The success of the geophysical methods used also depends on the relevant physical contrasts between the underground layers and the buried archaeological structures. In this context, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) methods were applied in an area of 300 m² (10x30 m), which was determined by examining large-scale magnetic gradiometer images in the Tepelerarası area of the Sapinuwa archaeological site. With these methods applied in the field, it is aimed to define different physical properties of the

underground and especially to improve the interpretation of GPR data. After the geophysical studies, archaeological excavations were started and comparisons were made with geophysical images. The results obtained showed that there is a great agreement between the buried archaeological structures identified from geophysical images and the archaeological structures unearthed as a result of excavations. It was determined that the negative traces in the magnetic gradiometer images and the high resistivity traces in the ERT images correspond to the architectural building walls. On the other hand, the architectural structure distribution could not be determined clearly in the results obtained with the GPR method. GPR data were interpreted in detail using the comparison of magnetic gradiometer and ERT data, where the results were consistent with the archaeological excavation. As a result of this study, significant improvements have been achieved in the interpretation of GPR data.

January 2023, 131 pages.

Keywords: Ground Penetrating Radar, GPR, Integrated geophysics, Magnetic Gradiometer, Electrical Resistivity Tomography, Sapinuwa

1. GİRİŞ

Yeraltında gömülü nesneleri uzaktan tespit etme olasılığı, yüzyıllar boyunca insanlığı büyülemiştir. Bilim insanları ve mühendislerin büyük çabalarına rağmen yeraltındaki yapıları ve zeminin özelliklerini tek bir uygulama yöntemiyle bulma hedefi doğanın çok çözümlü olmasından dolayı henüz gerçekleşmemiştir. Ancak sismik, elektrik resistivite, indüklenmiş polarizasyon, gravite ve manyetik araştırma, radyometrik, termografik ve elektromanyetik vb. teknikler bu hedefe yaklaşım sağlayan ve yararlı olduğu kanıtlanmış yöntemlerdir. Yer radarı (GPR) yöntemi ise bu hedefe yakınlaşan en ilgi çekici seçenektir (Daniels, 2004).

Yeraltında gömülü arkeolojik yapılar ile katmanların özelliklerinin hasar vermeyen (non-destructive) tekniklerle belirlenmesi amacıyla dünyada en yaygın kullanılan araştırma tekniği jeofizik araştırma yöntemleridir. Bazı alanlarda özellikle arkeolojik örtü toprağı ile mimari yapı elemanlarının karmaşık özellik gösterdiği alanlarda ise jeofizik araştırma yöntemlerinin tümleşik (farklı birden fazla yöntemle) uygulanması daha yorumlanabilir ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi bakımından önemlidir. Jeofizik yöntemlerin tümleşik olarak uygulanması, gömülü arkeolojik nesnelerin yerini, derinliğini, boyutunu ve karakterizasyonunu belirlemek için daha faydalı sonuçlar verir. Kullanılan jeofizik yöntemlerin başarısı, aynı zamanda, yeraltındaki katmanlar ile gömülü arkeolojik yapılar arasındaki ilgili fiziksel karşıtlıklara da bağlıdır. Manyetik gradyometre, yer radarı (GPR) ve elektrik resistivite tomografi (ERT) yöntemleri, arkeolojik alanlardaki gömülü yapıların araştırılmasında ve bu kapsamda arkeolojik kazı planlanmasında yaygın bir kullanıma sahip jeofizik yöntemlerdir (Drahor, 2005).

Bu tez çalışması kapsamında, Çorum ili, Ortaköy ilçesinin yaklaşık 2 km güneybatısında bulunan Şapinuva Hitit yerleşimi alanında tümleşik jeofizik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Alanda kazılar 1990 yılında kurtarma kazıları olarak başlamış olup, 1993 yılından beri Bakanlar Kurulu kararı ile sürekli kazı olarak Ağılönü ve Tepelerarası mevkilerinde devam etmektedir. Yerleşmenin çok geniş bir alana yayılmış olması nedeniyle bu alandaki arkeolojik kazı çalışmasının planlanması amacıyla geniş-ölçekli manyetik gradyometre çalışmalarıyla yaklaşık 10.7 ha alanda ölçümler alınmıştır. Elde edilen manyetik gradyometre görüntülerinin irdelenmesi ile belirlenen 300 m² (10x30 m) boyutlarındaki bir alanda, manyetik gradyometre verilerine ilave olarak yer radarı (GPR) ve elektrik resistivite tomografisi (ERT) yöntemleri

uygulanmıştır. Bu çalışmada alanda uygulanan bu yöntemlerle birlikte yeraltına ait farklı fiziksel özelliklerin tanımlanması ve özellikle yer radarı verilerinin yorumunun geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Tümleşik jeofizik çalışmalar sonrasında arkeolojik kazı çalışmaları başlatılmıştır. Araştırma alanı öncelikle 5x5 m boyutlarında 12 bölgeye ayrılmıştır. Bunlardan 6 açmada yaklaşık 70 cm derinliğe kadar eşzamanlı olarak arkeolojik kazı ve belgeleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Alanda kazı çalışmaları devam etmekte olup, ilk sonuçlar bu araştırma kapsamında kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, jeofizik görüntülerden tanımlanan gömülü arkeolojik yapılar ile kazılar sonucu gün yüzüne çıkarılan arkeolojik yapılar arasında büyük bir uyumun olduğunu göstermiştir. Manyetik gradyometre, ERT ve yer radarı çalışmalarının verilerinin karşılaştırılması hem 2-boyutlu kesitlerde hem de derinlik kesme görüntüleri üzerinde yapılmıştır. Manyetik gradyometre görüntülerindeki negatif izler ile ERT görüntülerindeki yüksek resistiviteli izlerin yapı duvarlarına karşılık geldiği belirlenmiştir. Buna karşın yer radarı yöntemiyle elde edilen sonuçlarda gömülü yapı dağılımları belirgin olarak tespit edilememiştir. Arkeolojik kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu ve yer radarına kıyasla daha belirgin sonuçların elde edildiği manyetik gradyometre ve ERT yöntemlerinin sonuçları kullanılarak yer radarı verileri detaylı biçimde irdelenmiş, yöntemin bu alandaki dezavantajlı konumu nedenleriyle araştırılmış ve yorumun geliştirmesi için gerekli entegre çalışmalarla önemli bulgulara ulaşılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. YER RADARI YÖNTEMİNİN ARKEOLOJİK ALANLARDA UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Yer radarı (Ground Penetrating Radar-GPR) yöntemi, gömülü sığ yapıların belirlenmesi çalışmalarda yaygın bir kullanıma sahiptir ve özellikle arkeolojik alan çalışmalarında manyetik ve elektrik yöntemlerle birlikte en yaygın uygulanan yöntemdendir. Gömülü bir yapının belirlenmesi amacıyla yapılan ilk çalışma Hulsmeyer (1904) tarafından yapılmıştır. Bunu Lowy (1911) ve Stern (1930) araştırmaları izlemiştir. II. Dünya Savaşı sırasında savunma amaçlı kullanılan radar sistemleri, 1970'li yıllardan sonra yeraltındaki gömülü yapıların araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Drahor, 2007a). Günümüzde yer radarı yöntemi, arkeolojik yapıların ve yaşayan kültürel mirasın incelenmesi, sığ jeolojik çalışmalar (stratigrafi, fay belirlemeleri, heyelan, karstik boşluk belirlemeleri, sığ yeraltı suyu akifer araştırmaları vb.), mühendislik uygulamalar (boru hatları araştırması, tünel-otoyol ve demiryolu hatlarının incelenmesi, bina taşıyıcıları ve temel donatıları ile bina içindeki sorunların araştırılması vb), patlamamış askeri malzeme ve mayın saptama, adli tıp ve doğal felaketler, kirlilik ve yeraltında kimyasal akışkan sızıntılarının belirlenmesi, katı atık alanları üzerinde araştırmalar, maden yatakları tespitleri ve cevher arama ile mermer çalışmaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Nyari ve Kanlı, 2007; Klein ve Santamarina, 2003; Huisman ve diğ., 2003; Lucius ve diğ., 1992; Bristow ve diğ., 2000; Drahor ve diğ., 2011; Drahor ve diğ., 2016; Kanlı ve diğ., 2015; Albora ve diğ., 2004; Uçan ve Albora, 2009; Albora, 2020; Ercan ve Temizsöz, 1998).

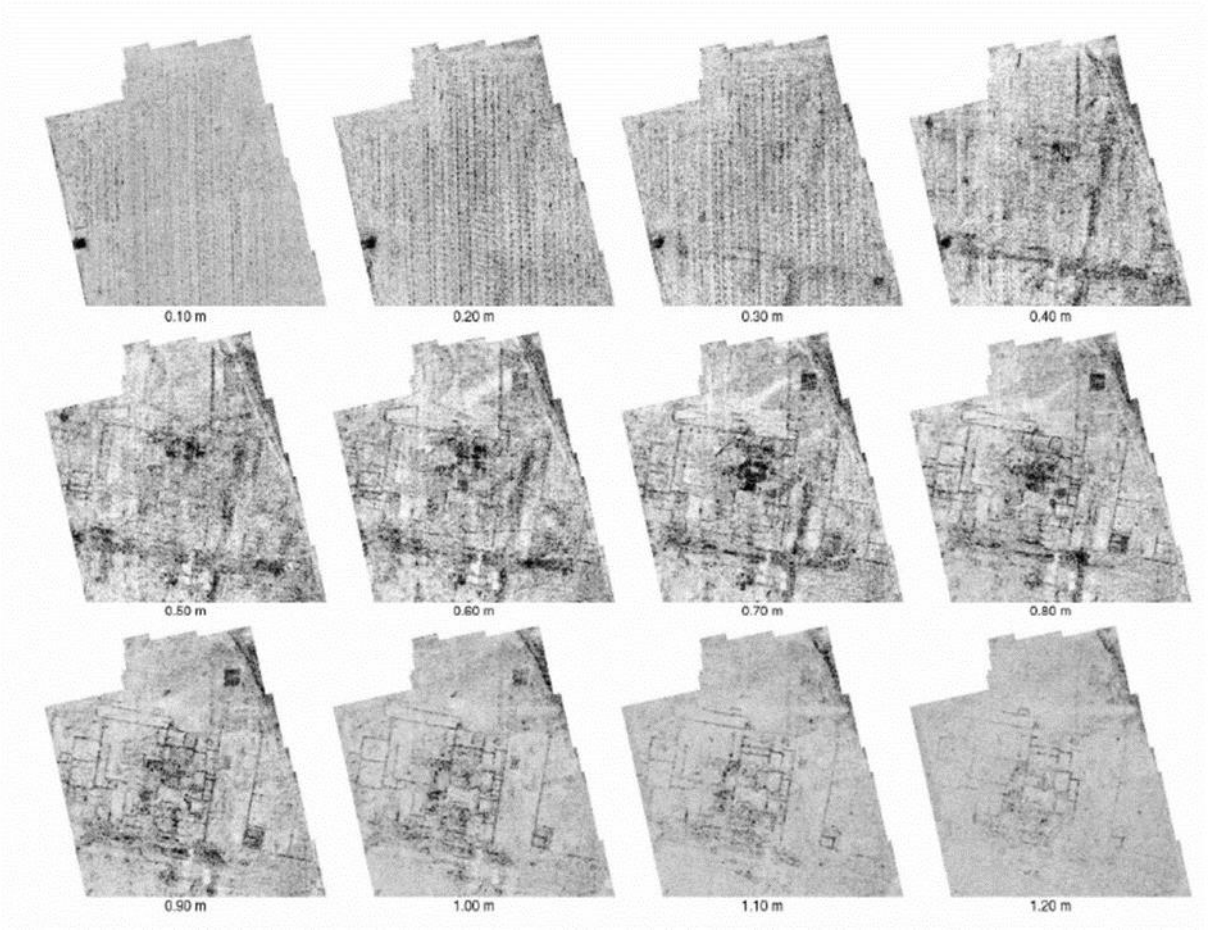
Arkeolojik alanlardaki gömülü yapıların hasar vermeyen (non-destructive) tekniklerle belirlenmesi arkeoloji açısından çok önemlidir. Bu tür teknikler kullanılmadan yapılan arkeolojik kazılar hem zaman hem de maddi kayıplar meydana getirmektedir. Bu sebeplerden dolayı birçok arkeolog, kazı çalışmalarından önce jeofizik çalışmalar yaptırmaktadır (Goodman ve diğ., 2009). Jeofizik yöntemlerden arkeolojik alanlarda en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri yer radarı (GPR)'dır. Yer radarı yönteminin arkeolojide ilk uygulaması, ilk ticari ekipmanın 1970'lerde piyasaya sürülmesinden kısa bir süre sonra gerçekleşmiştir. Yer radarı yönteminin arkeolojik araştırma için en eski belgelenmiş kullanımlarından olan Bevan

ve Kenyon (1975) ve Bevan (1977)'ın çalışmaları arkeolojik yapıların belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ilk çalışmalardandır. Bu çalışmalar gerçek zamanlı yer radarı çalışmaları olup, yer radarı kayıtları kâğıt üzerine çıktı biçiminde elde edilmiştir. Bu veriler üzerine herhangi bir veri-işlem tekniği kullanılması mümkün değildi. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle yer radarı yönteminde hızlı bir gelişim yaşanmıştır. Günümüz yer radarı teknolojisine yakın olan ilk yer radarı ekipmanı Geophysical Survey Systems Inc (GSSI) firması tarafından 1986 yılında üretildi. Günümüzde arkeolojik alanlardan elde edilen yer radarı verilerinin yorumlanmasında kullanılan ve zaman kesmesi (time slice) oluşturulabilen yazılımlar önem taşımaktadır. Bu konuda ilk yazılımlar, Goodman ve Nishimura (1993) ve Goodman ve diğerleri. (1995) tarafından geliştirildi. Bu yazılımlarda ara değer (interpolasyon) tekniği kullanılmış ve böylece gömülü arkeolojik yapıların haritalandırılması mümkün olabilmiştir. Bu çalışmaları birçok araştırmacı takip etmiş farklı ara değer bulma (interpolasyon) teknikleri geliştirilmiştir (örn., Conyers ve Goodman, 1997; Conyers ve Cameron, 1998; Neubauer ve diğ., 1999; Kvamme, 2001; Conyers ve Connell, 2007; Piro ve Goodman, 2009).

Yer radarı, arkeolojik prospeksiyonda son yıllarda verdiği sonuçlar nedeniyle kullanım alanı çok hızlı artan bir tekniktir. Özellikle son yirmi yıl içinde yeraltındaki arkeolojik yapıları cm boyutunda inceleyebilmesi, yüksek ayrımlı bir yöntem olması ve üç boyutlu görüntülendirmeye çok uygun olması gibi nedenlerden dolayı yoğun olarak kullanılmaktadır. Yöntem arkeolojik alanlarda yüzeyden başlayarak tüm inceleme derinliği içinde yeraltının zaman ya da derinlik kesmelerine olanak verdiğinden yorumlamada yapıların kestirilmesi anlamında önemli sonuçlar vermektedir. Böylece yeraltında gömülü durumdaki arkeolojik varlıkları hızlı belirlenmenin yanı sıra cm anlamında derinlikleri de belirlenebilmektedir. Bu durum yapıların üç boyutlu hacimsel yorumlara tabi tutulmasına olanak sağlamaktadır. Bu konuda iyi bir örnek Avusturya'da yapılan yer radarı çalışmasından elde edilen derinlik kesme görüntüleridir. Avusturya'da Flavia Solva adlı bir Roma kentinin bir bölümünde yapılan çalışmadan elde edilen derinlik kesmeleri Şekil 2.1'de verilmektedir. Şekilde 1,20 m derinlik düzeyi aralıkları 10'ar cm olan 12 ayrı derinlik seviyesinde gösterilmiştir. İlk seviyede sadece yüzeydeki tarımsal izler görülmektedir. İkinci seviyede bazı izler belirli belirsiz gözükmekte ve arkeolojik anlamda önemli izler belirgin olarak üçüncü kesitte ortaya çıkmaktadır. Dördüncü kesitte izler biraz daha belirginleşmekle birlikte diğer yapı izleri beşinci derinlik kesmesinde ortaya çıkmaktadır. Daha sonraki kesmelerde yapıların değişik özellikleri kesmelerde belirlenmekte ve yapı tüm planı içinde görünebilir bir durum almaktadır. Böylece bu yapı grubunun derinliğe

bağlı olarak yeraltındaki dağılımı yer radarı çalışmaları ile görünebilir bir duruma getirilmiş olmaktadır. Bu durum yer radarı yönteminin arkeolojik araştırmalarda yoğun olarak kullanılmasına neden olan ana olgulardan biridir.

Yer radarı yönteminin bu tür görüntülenmesinin ve yüksek ayrımlı bir yöntem olmasının getirdiği bu avantajlar nedeniyle yeraltındaki gömülü yapıların arkeolojik yorumlarının yapılması da daha kolay olabilmektedir. Yer radarı yönteminin sunduğu bu olanaklar arkeologların yüzey altındaki arkeolojik yapıları kazmadan ya da çok az bir kazı ile saptamalarına olanak vermektedir.



Şekil 2.1: Flavia Solva (Avusturya) Roma yerleşmesinden elde edilen yer radarı derinlik kesmeleri (Seren vd., 2004).

Bu konuda başka örnek yine aynı çalışmadan alınmıştır ve Şekil 2.2'de verilmektedir. Şeklin solunda tüm derinlik kesmelerinden elde edilen görüntüler üst üste bindirilerek alanın genel bir görüntüsü ve yapı dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu teknik yeraltındaki tüm yapı dağılımlarını birlikte görmeyi ve bunlardan arkeolojik yorum yapmayı kolaylaştırmaktadır.

Şeklin sağında ise yer radarı görüntülerinden elde edilen arkeolojik yorum verilmektedir. Şekilden de görülebildiği gibi, gridli bir kent yerleşimine sahip alandaki her bir grid içindeki yapıların dağılımı ve genel planları açıkça izlenebilmektedir. Bu durum arkeologlara yüzey altını kazmadan yorumlama ve mimariyi belirleme olanağını vermektedir.



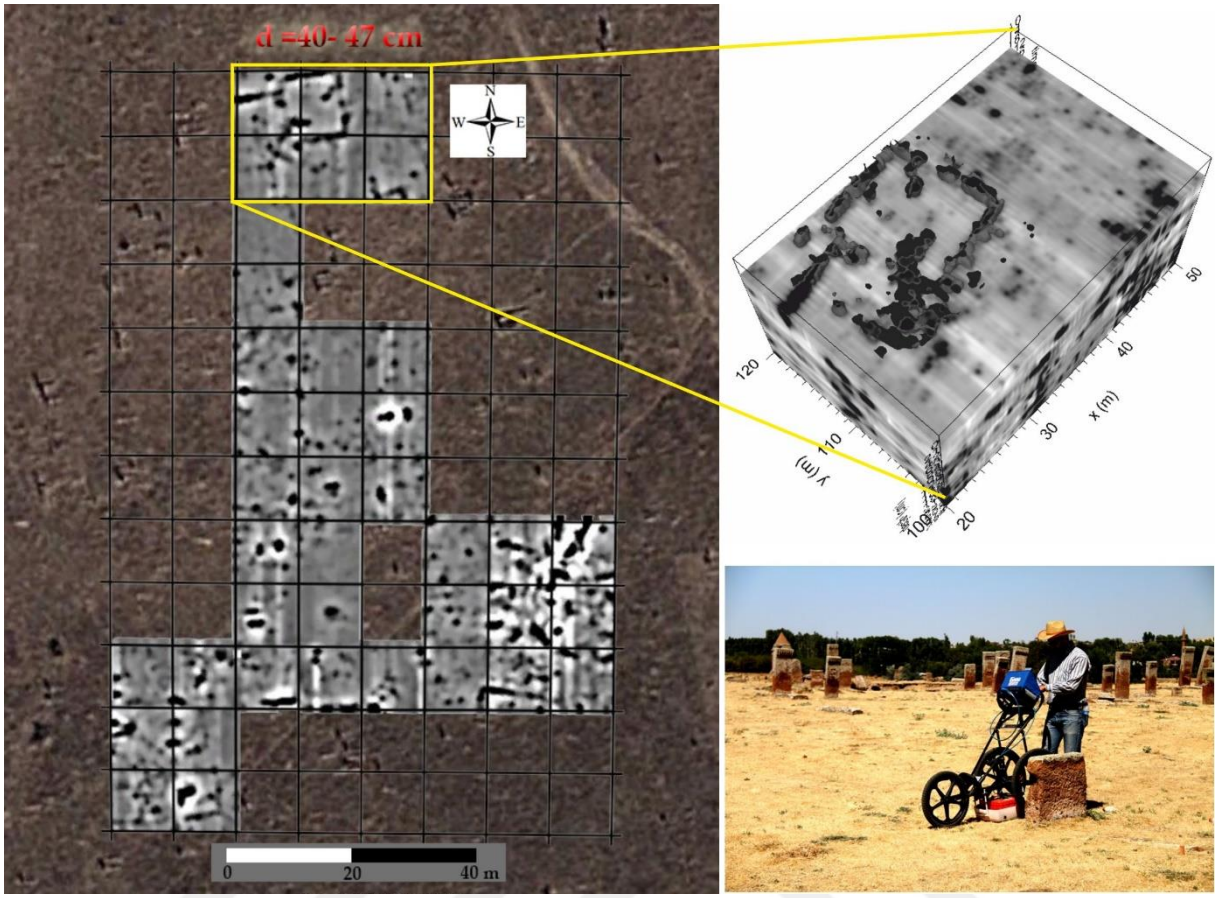
Şekil 2.2: Flavia Solva (Avusturya) Roma yerleşmesinden elde edilen tüm derinliklerin yer radarı görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen arkeolojik yorum (Seren vd., 2004).

Son yıllarda Türkiye'de de arkeolojik alanlarda yer radarı yönteminin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Anadolu coğrafyasında farklı dönemlere ait birçok medeniyetin izleri bulunmaktadır. Ülkemizde T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığa bağlı birçok bilimsel arkeolojik kazı ve yüzey araştırmaları yapılmaktadır. Bu araştırma ve kazı çalışmalarında ise jeofizik tekniklerin önemi ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu bilimsel kazıların bir tanesi bakanlık denetimi ve iznine tabi olarak yaklaşık bir yüzyıldır kazı ve araştırma çalışmaları devam eden Sardis Antik Kenti'dir. Bu alanda uygulanan yer radarı yöntemiyle farklı dönemlere ait birçok gömülü arkeolojik yapı zarar vermeyen (non-destructive) teknikle kazı yapılmadan önce belirlenebilmiştir (Şekil 2.3).



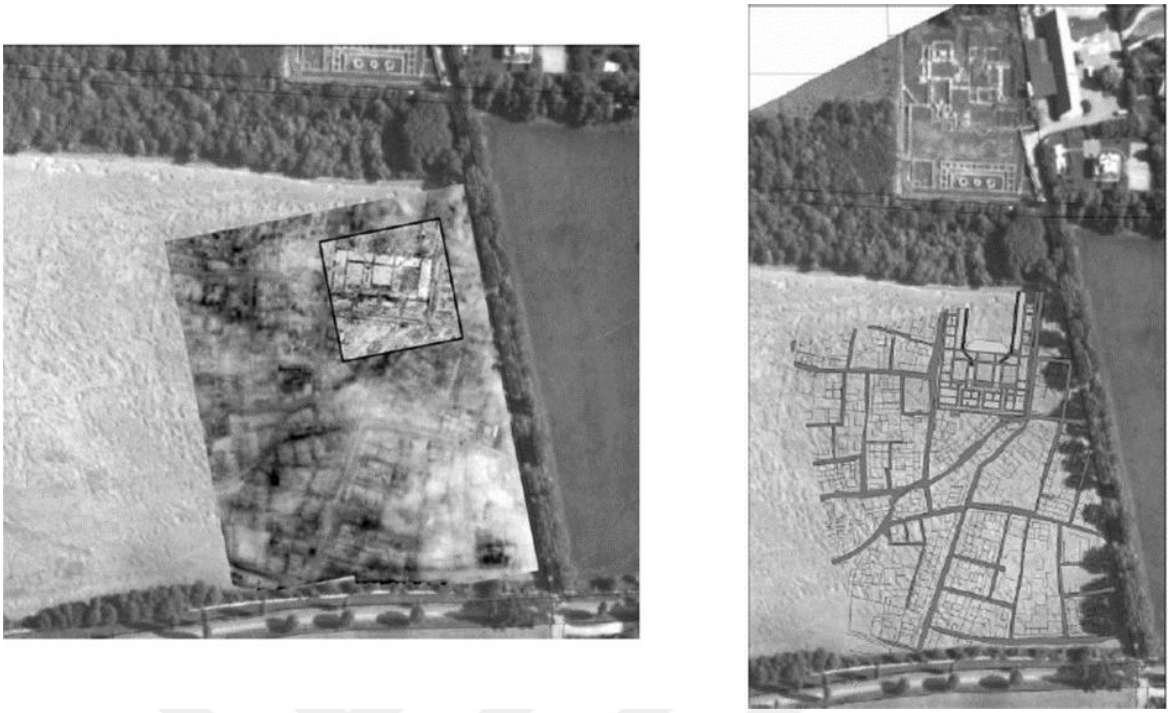
Şekil 2.3: Sardis Antik Kenti yer radarı çalışmalarına ait bir kazı plan görüntüsü üzerine yerleştirilmiş derinlik kesme görüntüsü *(Sardis Antik Kenti Kazı Başkanlığı 2021 yılı çalışma raporundan alınmıştır).*

Bilimsel kazılardan başka bir örnekte Van Gölü'nün kuzeybatısında bulunan Eski Ahlat Şehri Mezarlığı'nda yapılan kazı ve restorasyon çalışmalarıdır. Bu alanda yapılan yer radarı çalışmalarıyla gömülü durumda bulunan birçok akıt türü mezar yapıları ve geç dönem mezar ile mezar taşları belirlenmiştir. Bu çalışmaya ait derinlik kesme ve akıt mezar türüne ait hacimsel yer radarı görüntüleri Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4: Eski Ahlat Şehir Mezarlığı yer radarı çalışmalarına ait bazı görüntüler *(Eski Ahlat Şehri Kazısı 2013 yılı çalışma raporundan alınmıştır).*

Arkeolojik yorumu kolaylaştırmak için jeofizik yöntemlerin tümleşik kullanılması da büyük önem taşımaktadır ve bunlar yer radarı verileri ile birlikte kullanılarak yorumlamayı daha da geliştirebilmektedir. Tümleşik çalışmalara ilişkin iyi bir örnek Şekil 2.5.'de verilmektedir. Avusturya'da Carnuntum Roma yerleşmesinden elde edilen yer radarı çalışmalarının sonuçları ile kentte gömülü yapıları kazmadan görüntüleme olanağı veren bu çalışma ile kentin dağınık gridli yapısı ortaya çıkarılmaya başlamıştır. Buradaki tümleşik sonuçların birleşik yorumu ile yapıların fiziksel özellikleri daha iyi saptanabilmekte ve yapılarda kullanılan taş yapılar hakkında daha ayrıntılı bilgilere ulaşılabilmektedir.



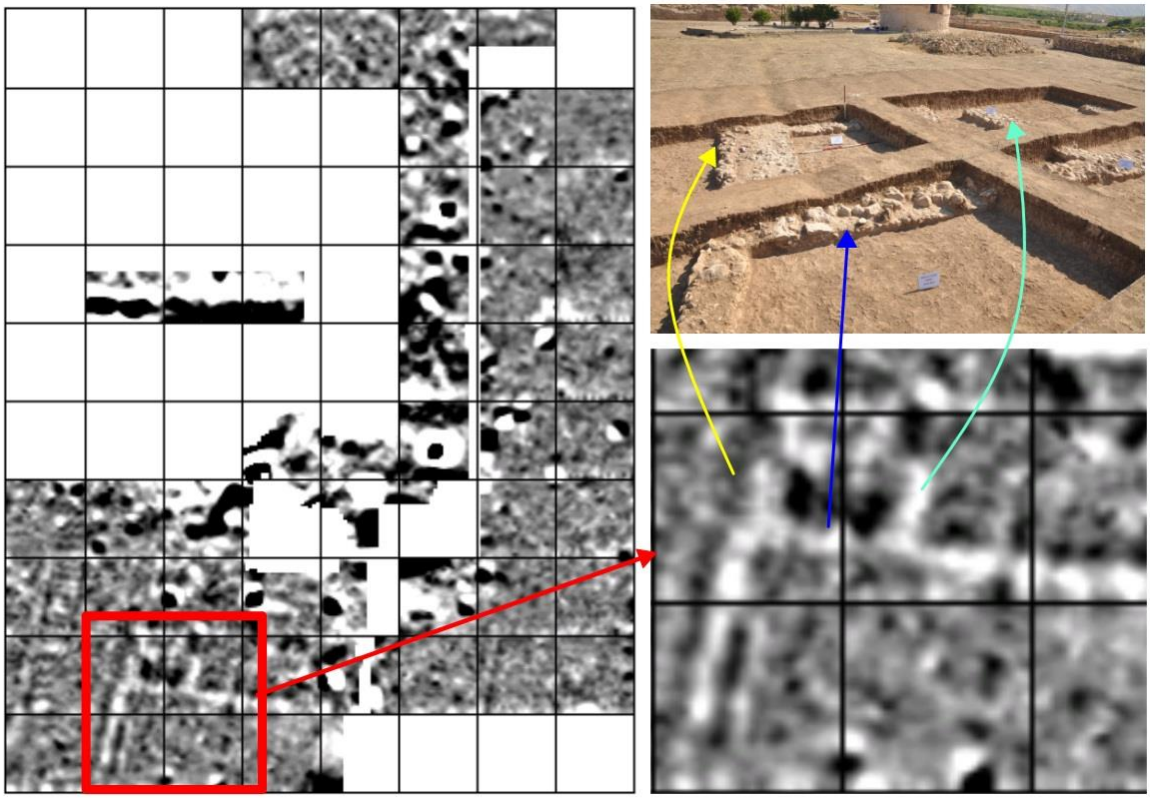
Şekil 2.5: Carnuntum (Avusturya) Roma yerleşmesinden elde edilen yer radarı görüntüsünün bir bölümü üzerine bindirilen elektrik resistivite görüntüsü ve bu görüntüler yardımıyla elde edilen arkeolojik yorum (Neubauer vd., 2002).

2.2. TÜMLEŞİK JEOFİZİK ÇALIŞMALARIN ARKEOLOJİK ALANLARDA UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Yeraltında gömülü arkeolojik yapılar ile katmanların özelliklerinin hasar vermeyen (non-destructive) yöntemlerle belirlenmesi amacıyla dünyada en yaygın kullanılan araştırma yöntemi jeofiziktir. Kültürel örtü toprağı ile mimari yapı elemanlarının karmaşık özellik gösterdiği bazı arkeolojik alanlarda, jeofizik araştırma yöntemlerinin tümleşik (birden fazla farklı yöntemle) uygulanması daha yorumlanabilir ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi bakımından önemlidir. Jeofizik yöntemlerin tümleşik olarak uygulanması, gömülü arkeolojik nesnelerin yerini, derinliğini, boyutunu ve karakterizasyonunu belirlemek için daha faydalı sonuçlar verir. Kullanılan jeofizik yöntemlerin başarısı, aynı zamanda, yeraltındaki katmanlar ile gömülü arkeolojik yapılar arasındaki ilgili fiziksel karşıtlıklara da bağlıdır.

Ülkemizde yapılan tümleşik jeofizik çalışmalara başka iyi bir örnek Hasankeyf arkeolojik kazı sahasında yapılan manyetik gradyometre ve yer radarı çalışmalarıdır. Ilısu Barajı Kurtarma Kazıları kapsamında yapılan baraj su tutmaya başlamadan önce su altında kalacak olan Zeynel Bey Türbesi ve çevresinin incelenmesi amacıyla, türbenin çevresinde iki yöntem kullanılarak tümleşik jeofizik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonrasında elde edilen bulgular ışığında

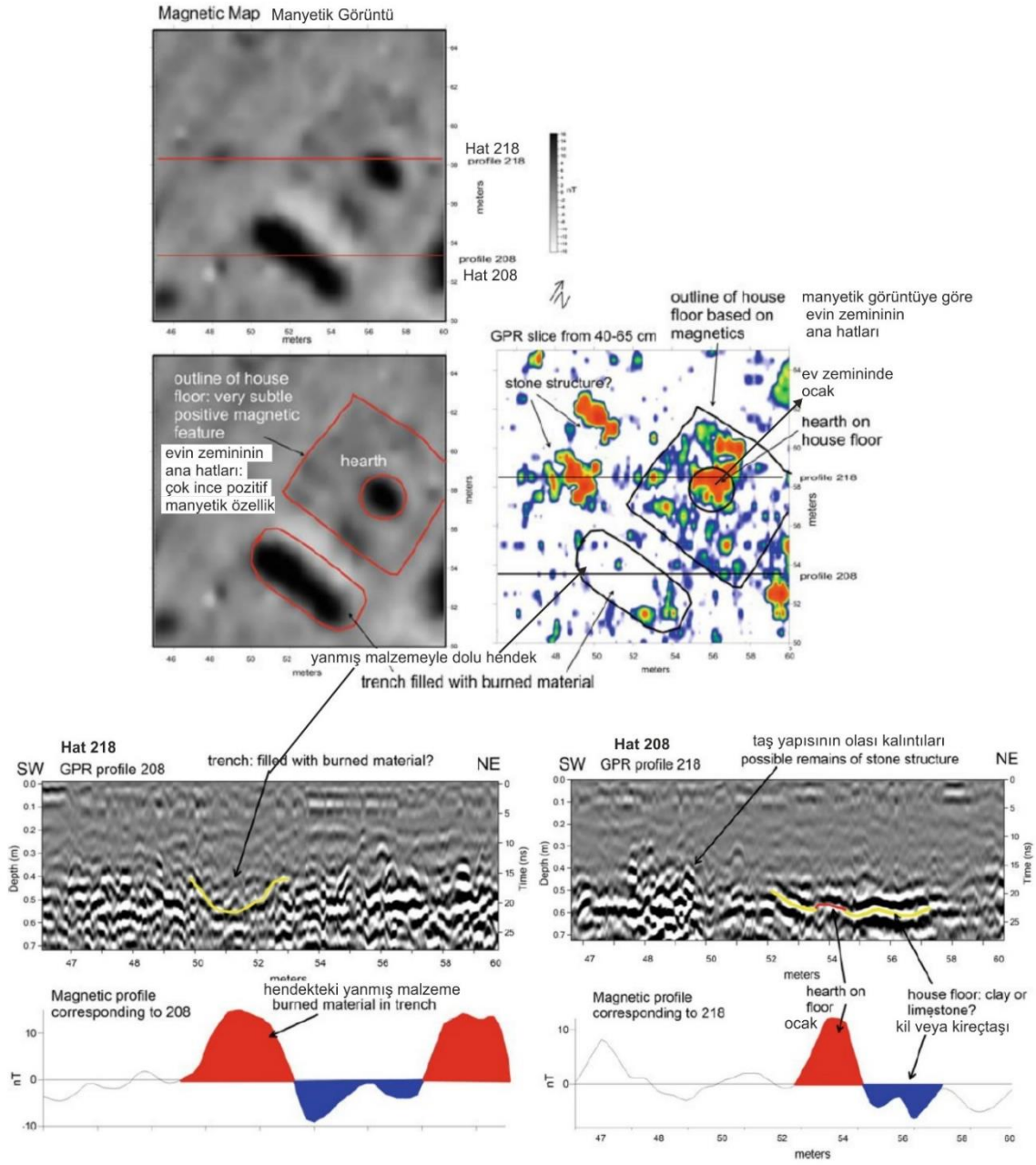
yapılan kazı çalışmaları sonrasında manyetik gradyometre sonuçlarla uyumlu çok uyumlu arkeolojik kazı sonuçları elde edilmiş ve yüzeye yakın olarak gömülü urumdaki yapı temelleri ortaya çıkartılmıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Hasankeyf arkeolojik kazı çalışmaları sonrası ortaya çıkan yapılarla manyetik gradyometre sonuçların karşılaştırılması *(Hasankeyf Kazı Başkanlığı 2013 yılı çalışma raporundan alınmıştır).*

Conyers (2018) gömülü yapıların araştırma yöntemleriyle ilgili olarak yazdığı kitabında tümleşik jeofizik çalışmaların önemi hakkında ayrıntılı bilgiler vermiş ve bazı uygulama örneklerini bir araya getirerek verileri tekrar yorumlamıştır. Bu çalışmalardan biri; Colorado'daki küçük bir derenin yakınında yaklaşık 4000 yıllık avcı-toplayıcı döneme ait bir yerleşim yerine aittir. Alanda yer radarı (GPR) ve manyetik gradyometre çalışmaları tümleşik kullanılmış ve bu durum arkeolojik yorumlamaya önemli katkılar sağlamıştır. Arkeolojik alanda yapılan kazı çalışmalarında birçok buluntu, ocak, fırın ve yaşam yerleri belirlenmiştir. Manyetik yöntem özellikle yanmış alanların belirlenmesinde çok başarılı sonuçlar vermiştir. Örtü toprak ile arkeolojik yapı arasında özellikle bağıl dielektrik geçirgenlik değeri olarak yeterli zıtlığın olduğu alanlarda tek başına kullanımda dahi çok başarılı sonuç veren GPR yöntemi, Colorado'daki bu alanda olduğu gibi manyetik gradyometre yöntemiyle tümleşik

kullanıldığında yorumlanabilir sonuçlar vermektedir. Şekil 2.7'de 15x15 m boyutlarında bir alanda yapılan manyetik gradyometre ve GPR sonuçlarına yer verilmiştir. Bu çalışmalarda yanmış birçok malzemenin biriktirildiği bir hendek ve içinde ocak bulunan bir yapı belirlenmiştir. Manyetik görüntüde bu hendek ve ocak yapısı belirgin olarak belirlenmiştir. Yapının sınırları ise manyetikte zayıf iz şeklinde belirlenebilirken, taş yapı kalıntıları GPR sonuçlarında daha belirgindir.



Şekil 2.7: Conyers (2018) çalışmasına ait Colorado'daki arkeolojik alanda yapılan manyetik gradyometre ve yer radarı çalışmalarının karşılaştırılmalı sonuçları.

3. YÖNTEM

3.1. ARKEOLOJİK ALANLARDA KULLANILAN TÜMLEŞİK JEOFİZİK YÖNTEMLER

Arkeolojik alanlarda gömülü yapıların hasar vermeyen (non-destructive) teknikler kullanarak belirlenmesi arkeolojik prospeksiyon olarak adlandırılmaktadır. Bu bilim dalı dünyada disiplinler arası bir gelişim göstermiş ve belirli bir zamandan sonra arkeolojik alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu araştırma dalı içinde yaygın olarak jeofizik yöntemler kullanılmasına karşın; uzaktan algılama, jeokimya, Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS), konum belirleme (GPS), termal algılama gibi prospeksiyona yönelik dallarda da araştırmalar yapılmaktadır. Günümüzde arkeolojik araştırmalar bu tür tekniklere oldukça fazla gereksinim duymakta ve böylece arkeolojik prospeksiyon bir taraftan kullanım oranını hızla artırırken, diğer taraftan da yöntemlerde önemli gelişimler ortaya çıkmaktadır. Arkeolojik prospeksiyonda en yaygın kullanılan teknik jeofiziktir. Bunun temel nedeni; arkeolojide kullanılan jeofizik yöntemlerin gömülü arkeolojik nesneleri belirlemede gösterdiği başarı ve hızın yanı sıra, herhangi bir bozucu etki oluşturmadan araştırılmasıdır. Arkeolojik alanlar genelde kalın bir toprak örtüsüyle kaplı olduğundan, bir arkeolojik alanı kazmadan önce iyi bir kazı stratejisi ortaya koymak oldukça zordur. Günümüzde arkeologların kazı yönetimi ve planlama stratejilerini gerçekleştirmelerinde jeofizik etkin bir rol almaktadır (Drahor, 2005). Aynı alanda birden fazla jeofizik yöntemin birlikte kullanılması (tümleşik jeofizik) ise özellikle son yirmi yıl içinde hızlı bir artış görmüştür (Kanlı ve diğ., 2018; Drahor ve diğ., 2011; Drahor ve diğ., 2015; Kvamme, 2003; Donati ve diğ., 2017; Vafidis ve diğ.,. 2005).

Tümleşik jeofizik çalışmaların amacı, arkeolojik alanlardaki karmaşık toprak özellikleri ile yeraltı dağılımının özelliklerine ilişkin daha güvenilir ve daha detaylı yorumlar içeren sonuçlar elde etmektir. Arkeolojik alanlar, insan etkinliğiyle oluştuğundan fiziksel ve kimyasal anlamda birçok değişim geçirmektedirler. Jeofiziğin amacı ise bu değişimlerden yararlanarak arkeolojik yapıların görünebilirliğini ortaya koymaktır. Jeofiziğin yararlandığı bu değişimler; ortamın içerdiği kutuplanma, çekim gücü, ortamın iletkenlik ya da dirençliliği, elektromanyetik dalga ve akustik dalgalara karşı gösterdiği davranış, dielektrik özellikleri gibi fiziksel olgulardır. Jeofizik yöntemin başarısı, arkeolojik yapıların boyutlarına ve gömülü olduğu derinliğe bağlı

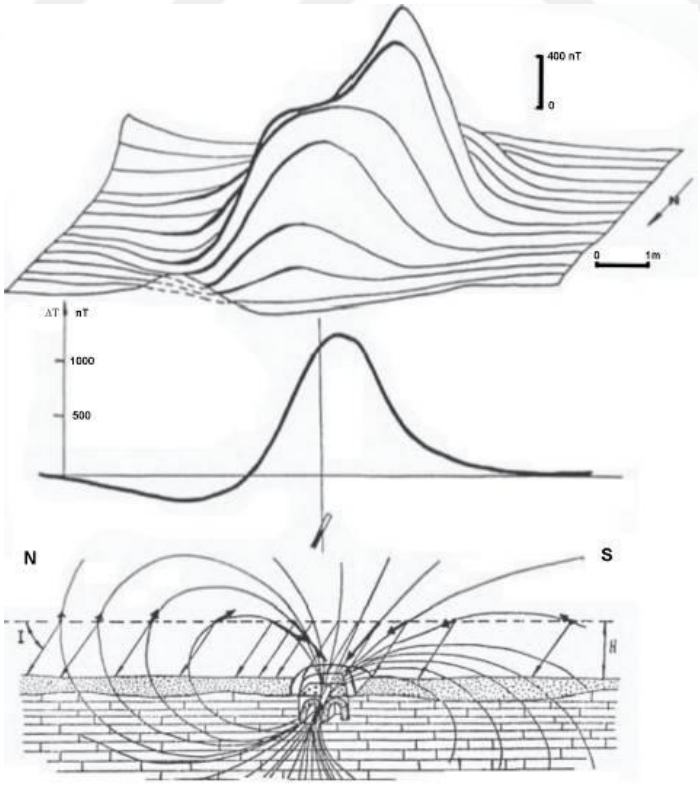
olduğu kadar, gömülü olduğu toprak ile arkeolojik yapı arasındaki fiziksel karşıtlığa bağlıdır (Drahor ve diğ., 2015). Bu yüzden farklı jeofizik tekniklerin birlikte kullanımı arkeolojik konteksin ortaya çıkartılmasında önemlidir. Manyetik gradyometre, yer radarı ve elektrik resistivite tomografi (ERT) yöntemleri, arkeolojik alanların tümleşik jeofizik olarak araştırılmasında en çok uygulanan tekniklerdir (Drahor, 2019; Piro ve diğ., 2000; Linford ve diğ., 2015; Tsokas ve diğ., 2015).

3.1.1. Manyetik Gradyometre Yöntemi

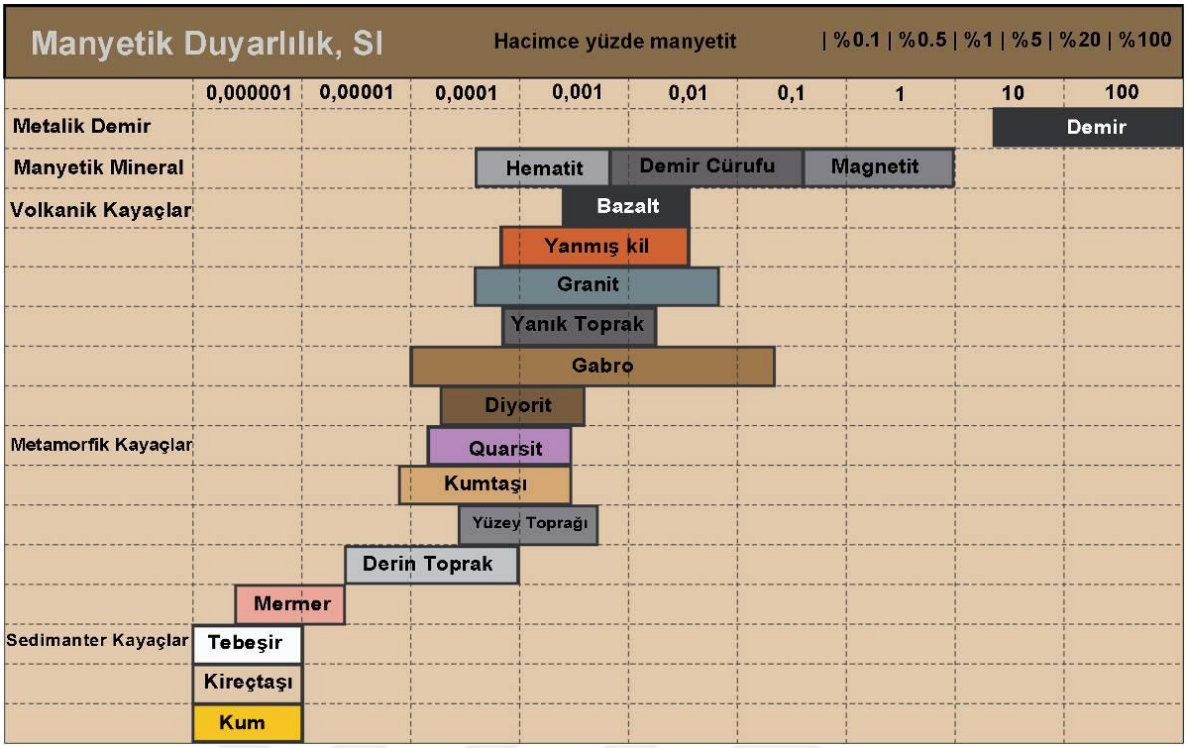
Manyetik yöntem, yerdeki malzemelerin manyetik özelliklerinin bir fonksiyonu olarak Dünya'nın manyetik alanındaki değişiklikleri farklı teknikler kullanılarak ölçen bir jeofizik tekniktir (Conyers, 2018). Manyetik yöntem yardımıyla yer manyetik alanının bileşenleri (düşey, yatay ve toplam) ya da yer manyetik alanı şiddetindeki değişimler ölçülür. Bu değişiklikler yardımıyla mıknatıslanmış cisim ile mıknatıslanmamış cisim birbirinden ayrılabilir. Yöntem manyetik duyarlık yoğunluğuna (indüklenmiş manyetizasyon değişimlerinden dolayı) ve ısıl kalıcı (thermoremanent) ya da viskoz mıknatıslanmanın varlığına duyarlıdır. Kalıcı manyetizasyonun arkeolojik nesnelerin belirlenmesindeki etkisi hemen hemen yokken, ısıl kalıcı manyetizasyon bu nesnelerin belirlenmesindeki en önemli etkendir. Böylece arkeolojik alanlarda oldukça yoğun biçimde bulunan keramik, hammaddesi olan kilin ısıtılması ve soğuması sırasında manyetik bir özellik kazanır (Şekil 3.1).

Arkeolojik alanlardaki jeofizik araştırmalar kapsamında yapılan manyetik araştırmalarda en önemli olgu toprağın manyetik özelliğindeki değişimlerdir (Drahor, 2005). Bu konuda birçok araştırıcı toprağın manyetik özelliklerinde değişim oluşturan demir oksit dönüşümü ve bunu ortaya çıkaran oksidasyon süreci ile ilgili ayrıntılı araştırmalar yapmıştır. Bunun dışında topraktaki bakteri indirgemesi yoluyla oluşan demir oksit dönüşümleri de araştırılmaktadır. Ayrıca jeolojik özelliklere bağlı olarak bazı kayaç birimlerinin içerdikleri yüksek demir oksit nedeniyle bir fermantasyona uğradığı ve bunun da demir oksit dönüşümünde etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Genelde insan etkinliği sonucunda yanmaya uğramış birimler (kil, seramik, ocak vb) ısıl kalıcı bir manyetizasyon kazanırlar. Bu da arkeolojik amaçlı manyetik prospeksiyonda anomali oluşumunun ana nedenlerinden biridir. Çukur, hendek, duvar, yol, boşluk, demir gibi yapı ve malzemeler arkeolojik alanlarda yaygın olarak görülürler. Bu yapı ve maddeler içerdikleri farklı manyetik duyarlık değerleri ya da ısıl bir işlem sonucu kazandıkları ısıl kalıcı manyetizasyon nedeniyle, belirlenebilir bir özellik kazanırlar. Daha sonra bu tür yapılar insan eliyle ya da doğal koşullarla dolar. Dolan bu tür yerler, doldukları

malzemenin özelliklerine bağlı olarak farklı bir manyetik duyarlılığa sahip olacaklardır. Özellikle arkeolojik alanlarda çöplerin atıldığı çukurlar ve benzeri yerler içerdikleri organik maddeler nedeniyle, sonradan bozuşmaya uğrayarak güçlü bir manyetik özellik kazanabilirler ve böylece belirlenebilir duruma gelirler. Ayrıca yeraltı ortamında yanmaya uğramış bölgelerin olmasıyla, ortamdaki fiziksel ve kimyasal değişiklikler bu bölgelerde çok daha yüksek manyetik özelliklerin oluşmasını sağlayabilir. Eğer yapılarda volkanik birimler kullanılmışsa, bu birimlerin olduğu yerlerde yüksek manyetik değerli anomaliler elde edilebilmektedir (Şekil 3.2). Demirin manyetik özelliği yüksektir ve bu genelde arkeolojik aramalarda, özellikle yerleşim planının ortaya çıkarılması gibi durumlarda, sıkıcı sonuçların alınmasına neden olmaktadır. Ancak aranılan hedef demir nesnelerse, bu durumda bunların değişik manyetometreler yoluyla belirlenmesi kolayca yapılabilmektedir. Demirli nesnelerin bir diğer dezavantajı da oldukça keskin ve tanımsız anomaliler üretmesidir. Özellikle çalışılan alanda güncel demirli atık malzemeler yaygınsa, bu durum araştırmanın sağlık derecesini olumsuz olarak etkileyecek ve hatta herhangi bir sonucun elde edilebilmesini engelleyecektir. Böylesi bir durumda, olası ise yüzeyden bir miktar toprağın kaldırılarak, bu tür demirli nesnelerin alandan uzaklaştırılması ve daha sonra araştırmaların sürdürülmesi önerilir (Drahor, 2006).



Şekil 3.1: Gömülü bir fırında manyetik anomalinin oluşum şeması (Smelkalova vd., 2008).



Şekil 3.2: Bazı kayaların manyetik duyarlılık değerleri (Smekalova vd., 2008).

Arkeolojik amaçlı manyetik çalışmalarda bazı arkeolojik özelliklerin birkaç nT düzeyinde belirti ürettiği göz önüne alındığında, aletlerin duyarlığının bu tür araştırmalarda ne derece önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Teknolojideki gelişimlerin etkisiyle manyetik cihazlarla günümüzde birkaç hektarlık bir alan bir gün içinde ölçülebilmekte ve manyetik görüntüler elde edilebilmektedir. Böylece manyetik yöntem arkeologlara kazı sürelerini kısaltma ve kazı maliyetlerini düşürme gibi iki önemli yardım sağlamaktadır. Arkeolojik alanlardan manyetik verilerin toplanması oldukça kolaydır. Bu işlemde öncelikle çalışılacak alanın araştırma amacına bağlı olarak ölçüm gridlerinin oluşturulması gerekmektedir. Gridlenen alanlar uygun bir manyetometre yoluyla ölçülerek gerekli veriler elde edilebilir. Arkeolojik araştırmalarda yaygın olarak fluxgate ve sezyum türü gradyometreleri kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Bu tür gradyometre cihazları genelde alıcı aralıkları sabit, duyarlık düzeyleri yüksek ve hızlı ölçüm alabilen cihazlardır (Drahor, 2006).

Gömülü arkeolojik yapıları belirlemede diğer önemli bir etken de uygun değerlendirme ve görüntülendirme tekniklerinin kullanılmasıdır. Herhangi bir noktada ölçülen manyetik alan o noktada derinden yüzeye değin tüm yapıların etkisini içinde barındırır. Bu nedenle kullanılacak alıcı yüksekliğinin aranılan hedefi belirlemede büyük önemi vardır ve toplanan veri, uygun sinyal analiz teknikleri ile değerlendirildikten sonra aranılan hedef daha iyi bir biçimde

belirlenebilmektedir. Arkeolojik bir alandan toplanan manyetik veriler yaklaşık 2 m gibi sığ derinlikteki hedeflerin etkisini yansıtmaktadır. Ancak yine de süzgeçleme (alçak, yüksek, band geçiş gibi) teknikleri kullanılarak, yüzeye yakınlığı konusunda bazı nicel yorumlara olanak sağlanabilir. Ayrıca, manyetik verilerin değerlendirilmesinde kullanılan diğer tüm sinyal analiz yöntemlerini de (aşağı-yukarı analitik uzanım, manyetik kuzey kutba indirgeme, ters süzgeçleme, güç spektrumu gibi) kullanma olanağı bulunmaktadır. Verinin yorumlanmasında görüntülendirme tekniklerinin büyük önemi bulunmaktadır. Bu işlemlerde pixel analizleri yapılarak, anomalilerin kenar çizgilerinin belirlenmesi, bulanıklıkların giderilmesi, gölgelendirme ve ışıklandırma rölyeflerinin kullanılması gibi birçok yöntem yardımıyla, görüntü en uygun biçime getirilmeye ve böylece daha fotografik bir görüntü elde edilmeye çalışılır. Bu tür teknikler, arkeolojik bir alandan sağlanan manyetik verinin görüntü kalitesinin yükseltilmesi ve daha etkili bir yeraltı görüntülerinin oluşturulmasında büyük öneme sahiptirler (Drahor, 2006).

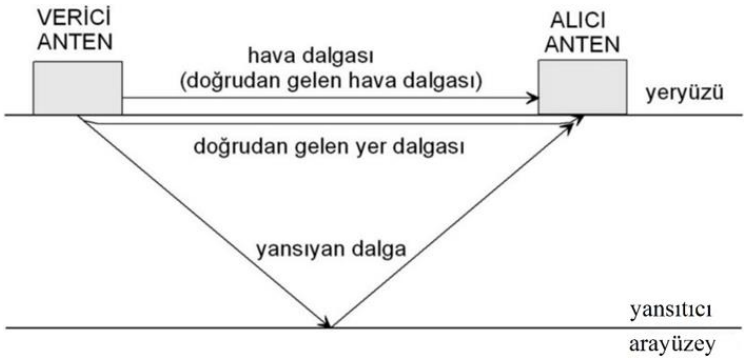


Şekil 3.3: Geoscan firmasının ürettiği fluxgate türü manyetik gradyometre cihazı.

3.1.2. Yer Radarı (GPR) Yöntemi

Yer radarı, arkeolojik saha incelemesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Yöntem, kentlerdeki arkeolojik ve diğer yeraltı hedeflerini belirlemek için de kullanılır. Bu tür problemler için çok hızlı ve uygun maliyetli bir tekniktir. Yöntem, ortamın dielektrik geçirgenliği, elektriksel iletkenliği ve manyetik geçirgenliği özelliklerinden etkilenmektedir (Annan, 2001). Uygun koşullar altında, yer radarı yeraltı yüzeyine gömülü, manyetik olmayan veya plastik bile olsa çeşitli malzemeleri tespit etmek için kullanılabilir. Ayrıca tarihi ve sanatsal öneme sahip anıtsal nitelikteki kültürel yapıların araştırılmasında da GPR yöntemi büyük öneme sahiptir (Kanli ve diğ., 2015; Leckebusch, 2000; Leucci, 2002; Drahor ve diğ., 2011). Restorasyon ve koruma projeleri kapsamında, bu yöntem yapı içindeki çatlaklar ve kırıklar dâhil olmak üzere yapının özellikleri hakkında temel bilgileri elde etmek için uygulanmaktadır (Kanlı ve diğ., 2015; Drahor ve diğ., 2011, Tsokas ve diğ., 2008).

Yer radarı yöntemi genel anlamda, verici antenden yeraltına gönderilen yüksek frekanslı (10-3000 MHz) radar sinyali yeraltında ilerlerken yansıtıcı bir süreksizlikle karşılaştığında enerjisinin bir kısmı yansıyıp alıcı antende kaydedilmesi prensibine dayanır. Radar sinyallerinin verici antenden çıkıp, alıcı antene ulaşıncaya değin geçen seyahat süresinin (two-way traveltime-TWT) ns mertebesinde ölçülür (Şekil 3.4). Bu olayda elektromanyetik dalganın yayınım özellikleri ve bununla ilişkili kuramın yanı sıra geometrik optik kurallarda büyük önem taşır. Ayrıca yeraltındaki materyallerin dielektrik geçirimlilik, elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri de yeraltında seyahat eden dalga alanları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Tablo 3.1).



Şekil 3.4: Antenden çıkan radar dalgalarının yer içindeki yayınımı ve alıcı antene ulaşmasını gösteren basitleştirilmiş şekil (Conyers ve Goodman 1997'den düzenlenmiştir).

Tablo 2.1. Farklı yeraltı ortamlarının bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı, elektrik iletkenlik σ ve sönümlenme α değerleri (Daniels, 2004'den düzenlenmiştir).

Malzeme	ε_r	σ (mSm^{-1})	α (dBm^{-1})
Hava	1	0	0
Asfalt (kuru)	2-4	1-10	2-15
Asfalt (ıslak)	6-12	0,1-10	2-20
Kil (kuru)	2-6	100-10^3	10-50
Kil (ıslak)	5-40	100-10^3	20-100
Kömür (kuru)	3,5	0-100	1-10
Kömür (ıslak)	8	0-10	2-20
Beton (kuru)	4-10	0-100	2-12
Beton (ıslak)	10-20	0-10	10-25
Tatlı su	81	10^{-3}-10	0,01
Tatlı su buzu	4	0,1-0	0,1-2
Granit (kuru)	5	10^{-5}-10^{-3}	0,5-3
Granit (ıslak)	7	0-10	2-5
Kireçtaşı (kuru)	7	10^{-5}-10^{-3}	0,5-10
Kireçtaşı (ıslak)	8	10-100	1-20
Donmuş toprak	4-8	0,01-10	0,1-5
Kaya tuzu (kuru)	4-7	0,1-10	0,01-1
Kum (kuru)	2-6	10^{-3}-0	0,01-1
Kum (ıslak)	10-30	0-10	0,5-5
Kumtaşı (kuru)	2-5	10^{-3}-10^{-2}	2-10
Kumtaşı (ıslak)	5-10	0,1-10	4-20
Deniz suyu	81	10^5	100
Deniz-su buzu	4-8	10-100	1-30
Killi şist (kuru)	4-9	0-10	1-10
Killi şist (doygun)	9-16	0-100	5-30
Kar (sert)	6-12	10^{-3}-10^{-2}	0,1-2
Killi toprak (kuru)	4-10	10-100	0,3-3
Killi toprak (ıslak)	10-30	0-10^3	5-50
Tınlı toprak (kuru)	4-10	0,1-0	0,5-3
Tınlı toprak (ıslak)	10-30	10-100	1-6
Kumlu toprak (kuru)	4-10	0,1-10	0,1-2
Kumlu toprak (ıslak)	10-30	10-100	1-5

Öztürk, 2013'de radar dalgalarının yayınımı ve fiziksel özellikleri detaylı olarak irdelenmiştir. Yer radarının temelleri elektromanyetik (EM) teoride yatmaktadır. Maxwell denklemleri EM alanlarının fiziğini matematiksel olarak tanımlarken, malzemenin özelliklerini nicel olarak tanımlar. Bu ikisini birleştirme, GPR sinyallerini nicel olarak tanımlamanın temellerini sağlar. Maxwell vektör eşitlikleri niceliksel olarak uzamsal ve birbirine bağlı elektrik ve manyetik alanları ve onlar arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bağıntılar, frekans spektrumunun tümü için geçerlidir ve tüm materyaller için EM enerji yüklenme ve kayıp proseslerini tanımlar. Bunlar klasik anlamda zaman ortamında aşağıdaki biçimde tanımlanır (Annan, 2008).

$$\bar{\nabla} \times \bar{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{3.1}$$

Bu ifade Faraday Kanunun matematiksel ifadesidir. E- elektrik alan kuvvet vektörü (V/m); B- manyetik akı yoğunluk vektörünü (Tesla-T) gösterir. Bu denklemin anlamı, elektrik alanın vektörel kaynağının, manyetik akının zamanla değişen bir özelliğini göstermesidir. Herhangi bir kapalı eğri üzerinde elektrik alanın sirkülasyonu (dolaşımı), eğrinin çevrelediği yüzey üzerindeki manyetik akının negatifinin zamanla değişimine eşittir.

Maxwell'in ikinci eşitliği, Ampere Kanununun matematiksel ifadesidir ve aşağıdaki biçimde gösterilir;

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \tag{3.2}$$

H- manyetik alan kuvvet vektörü (A/m); D- elektrik akı yoğunluk vektörü (C/m2); J- akım yoğunluğu vektörü (A/m2) gösterir. Bu denklemin anlamı, manyetik alanın kapalı bir halka boyunca çizgisel integrali, o halka içinde kalan akım ile orantılıdır

Üçüncü eşitliği, Gauss Yasası olarak bilinir ve genel gösterimi aşağıda verilmektedir.

$$\bar{\nabla} \bullet \bar{D} = \rho \tag{3.3}$$

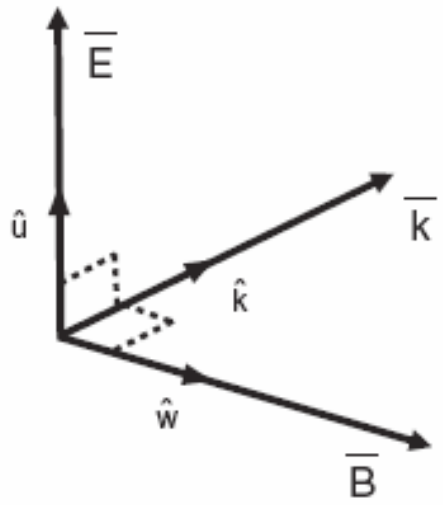
D- elektrik akı yoğunluk vektörü (C/m²); ρ - şarj yoğunluğu (C/m³) ifade eder. Bu denklemin anlamı elektrik alanın skaler kaynağının yük yoğunluğu olduğudur veya elektrik alanın noktasal olarak yüklerde sonlandığını belirtmektedir. Herhangi bir kapalı yüzeydeki elektrik alanın akısı o yüzeyin içindeki toplam yükle doğru orantılıdır.

Aynı şekilde dördüncü eşitlikte de manyetik alanın skaler kaynağının olmadığı (manyetik yük yoktur) ifade edilir.

$$\bar{\nabla} \bullet \bar{B} = 0 \qquad (3.4)$$

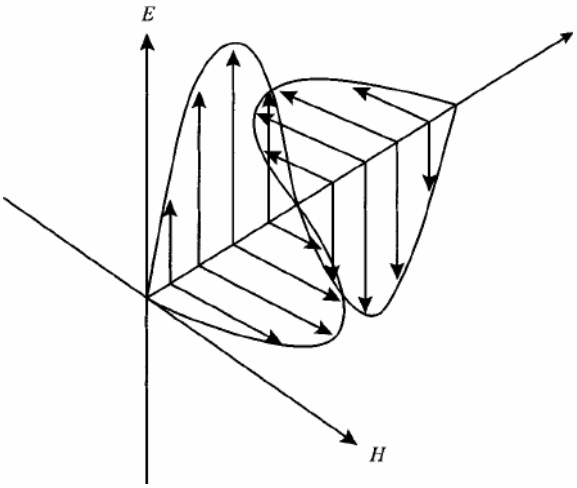
Bu denklemin anlamı, manyetik alanın hep kendi üzerine sonlandığıdır. Herhangi bir kapalı yüzeydeki manyetik alanın akısı sıfırdır.

Elektromanyetik dalga, elektrik ve manyetik alanların bileşkesinden oluşur. Elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine ortogonaldir ve dışarıdan gelen herhangi bir etki olmadığı müddetçe aynı fazdadırlar (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: E elektrik alan, B manyetik alan ve k yayınım doğrultusu ortogonaldir (Annan, 2008'den düzenlenmiştir).

Maxwell denklemleri elektrik ve manyetik alan çiftinin zamanla değişmesi olgusunu tanımlar. Serbest uzayda bu dalganın yayınımı Şekil 3.6'da verilmiştir. Enerji yitimi (iletkenlik ile ilişkili) ve enerji yüklenmesinin (elektriksel ve manyetik geçirgenlikle ilişkili) göreli büyüklüğüne bağlı olarak alanlar dalga olarak yayılır ya da saçılır. GPR yönteminde koşullar dalga benzeri bir yanıtı ortaya çıkardığı zaman tutarlı olur.



Şekil 3.6: Serbest uzayda elektromanyetik dalganın yayınımı (E elektrik alan; H manyetik alan). Daniels, 2004'den düzenlenmiştir.

Maxwell eşitlikleri elektrik ya da manyetik alanlar denklemlerinden biri yok edilerek yazıldığı zaman, dalga karakteri belirgin olacaktır. Böylece elektrik alan denklemi enine vektör dalga eşitliği (3.5) bağıntısıyla elde edilir (Annan, 2008).

$$\overline{\nabla}\, x\overline{\nabla} x\bar{E} + \mu\sigma * \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon * \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \qquad (3.5)$$

Bir elektromanyetik dalga olan yer radarı dalgası havada ışık hızında (0,3 m/ns) yayılır. Ancak yeraltında radar dalgasının hızı ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik (ε_r), elektriksel iletkenlik (σ) ve bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r) değerlerine bağlı olarak azalır. Birçok yer radarı uygulamalarında, radar dalgalarının yayınımı sırasında bağıl dielektirk geçirimlilik ve elektriksel iletkenlik parametrelerinin çok önemli olduğu, manyetik geçirgenlik parametresinin ise bazı ortamlarda etkili olduğu görülmüştür (Annan, 2008). Yer radarı dalgasının hızı;

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r \frac{1+\sqrt{1+(\sigma/\omega\varepsilon)^2}}{2}}} \qquad (3.6)$$

Burada; "c" boşluktaki radar dalgasının hızı (ışık hızı), $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ dielektrik geçirgenlik ve ε_0 boşlukta dielektrik geçirgenlik, ω = 2πf açısal frekanstır ve σ / ωε kayıp faktörünü ifade eder. Kayıp faktörünün az olduğu ortamlarda $\sigma/\omega\varepsilon \approx 0$ ve μ_r=1 olarak kabul edilir. Böylece radar dalgasının hızı aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3.7}$$

Bazı durumlarda elektromanyetik sinyalin gücünde azalmalar meydana gelir. Bu azalmayı etkileyen en önemli faktörler radar dalgasının sönümlenmesi ve saçılması durumlarıdır. Sönümlenme, ortamın ε_r, σ, ve μ_r gibi fiziksel parametrelere bağlı olduğu gibi kullanılan antenin frekansıyla ilişkilidir. Radar dalgasının sönümlenme katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\alpha = \omega \sqrt{\varepsilon\mu \frac{\sqrt{1+(\sigma/\omega\varepsilon)^2}-1}{2}} \tag{3.8}$$

Kayıp faktörünün az olduğu ortamlarda $\sigma/\omega\varepsilon \approx 0$ kabul edilir. Bu durumda sönümlenme katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Griffiths, 1989).

$$\alpha = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tag{3.9}$$

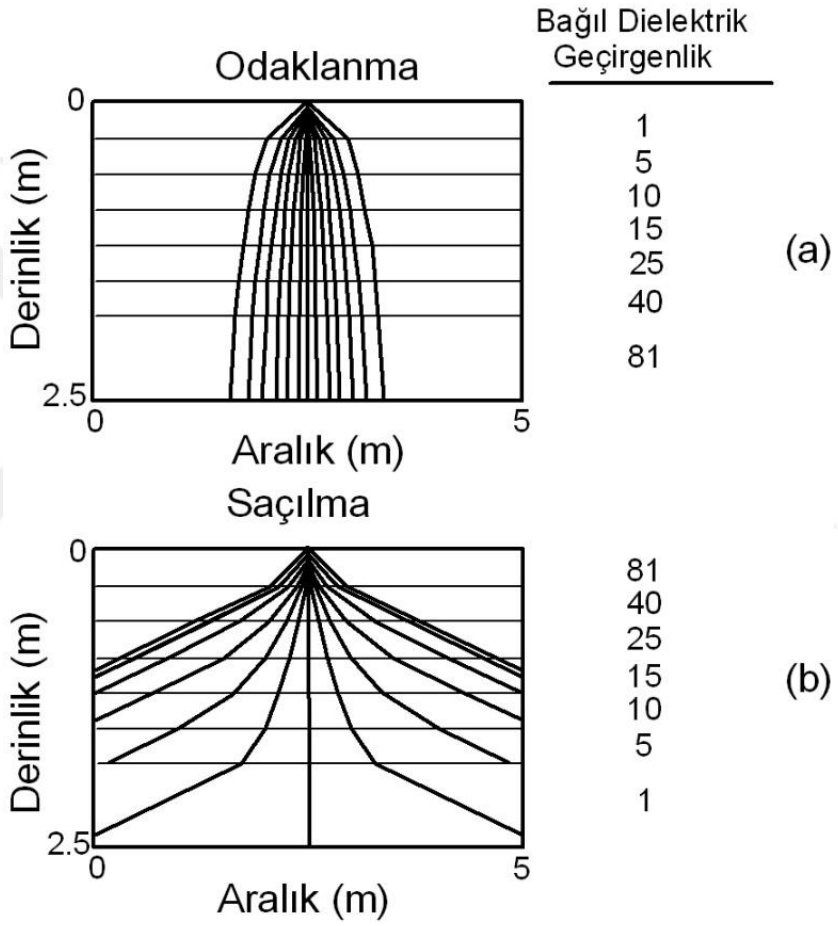
Manyetik geçirgenlik (μ) değeri birçok uygulamada yer radarı sinyalinin sönümlenmesi ve yayılma hızı açısından önemsiz veya ihmal edilebilir olarak kabul edilmektedir. Bu durumlarda, sönümlenme ve yayılma hızı, malzemenin iletkenlik ve dielektrik geçirgenlikle ilişkili olur. Ancak demir açısından zengin topraklar, magmatik kökenli kayaçlar gibi manyetik özelliği olan ortamlarda bu parametre göz ardı edilmemelidir (Cassidy, 2001).

Yer radarı uygulamalarında penetrasyon derinliği, anten frekansı ve çalışma alanındaki toprağın elektriksel iletkenliği ile belirlenir (Daniels, 2004). Toprağın iletkenliği arttıkça, radar sinyalleri daha hızlı sönümlenir ve penetrasyon derinliği azalır. Bu durum yer radarı çalışmalarını önemli bir oranda engelleyen bir durumdur. Toprağın elektriksel iletkenliği, hacimsel su içeriği, tuzluluk oranı ve kil içeriğiyle artan bir parametredir (Doolittle, 2007).

Elektriksel iletkenlik topraktaki suyun miktarı, dağılımı, kimyasal bileşimi ve fazıyla (katı, sıvı veya gaz) doğrudan ilişkilidir (McNeill, 1980). Belirli bir frekansta, elektromanyetik enerjinin sönümlenmesi artan nem içeriği ile artar (Daniels, 2004). Arkeolojik alanlarda yer radarı yöntemiyle; arkeolojik karman kalınlığı, gömülü duvarlar, altyapı sistemleri, yollar, yıkıntı durumda bulunan moloz yapılar belirlenebilinir. Radar dalgasının hızı ve nüfuz etme derinliği, toprağın özelliklerine ve nem koşullarına bağlı değişmektedir (Kvamme, 2003). Nem içeriği

yüksek killer gibi yüksek iletkenlikli birimler, radar dalgalarının penetrasyon derinliğini sınırlayabilir veya engelleyebilir.

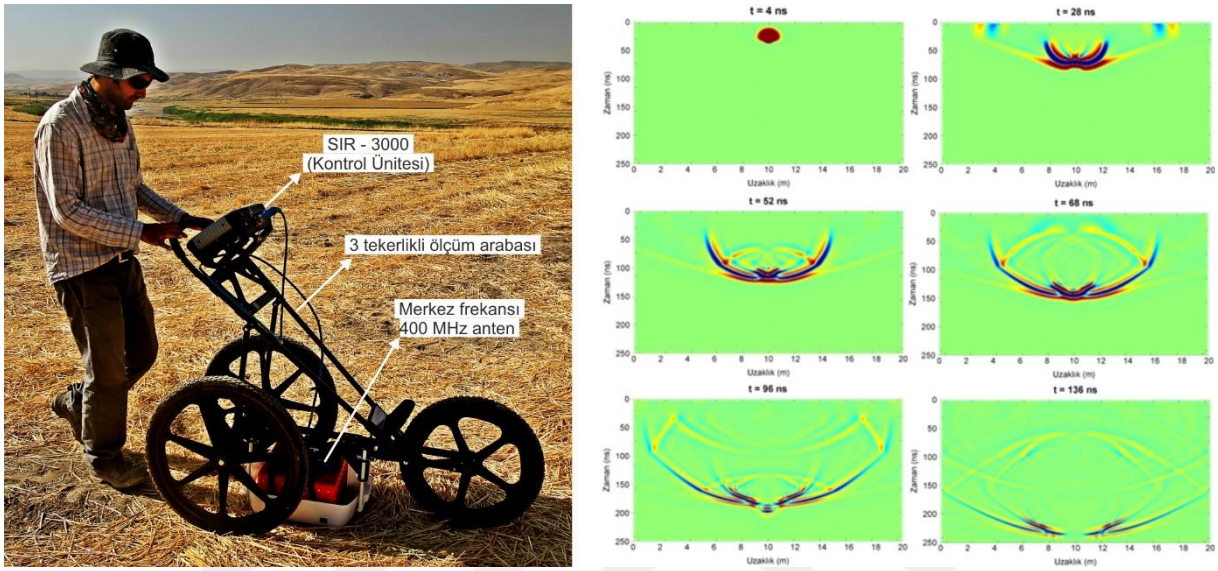
Radar dalgaları, dielektrik değişkene bağlı olarak odaklanır veya saçılır. Şekil 3.7'de yatay tabakalı bir ortamda radar sinyalinin dielektrik değişkene bağlı olarak odaklanma ve saçılma durumları irdelenmiştir. Dielektrik değişken derinlikle doğru orantılı arttığında radar sinyalinin yer içinde odaklandığı, tersi durumda ise saçılıma uğradığı görülmektedir (Conyers ve Goodman 1997).



Şekil 3.7: Derinliğe bağlı olarak bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarının yüzeyden başlayarak (a) artış, (b) azalışı için dalga kırılma etkileri (Conyers ve Goodman 1997'den düzenlenmiştir).

Yer radarı sistemi, verici ve alıcıyı içeren bir anten ve bir kayıt cihazından oluşur (Şekil 3.8). Verici, tekrarlayan kısa süreli EM sinyallerini, yer yüzeyine hareket eden bir antenden toprağa yayar. Elektromanyetik dalgalar, farklı dielektrik sabitleri olan malzemeler arasındaki arayüzlerden alıcıya geri yansır. Yansıyan sinyalin yoğunluğu, arayüzdeki dielektrik sabiti

kontrastına, malzemenin iletkenliğine ve sinyal frekansının fonksiyonuna bağlıdır. Bu tür yansımalara neden olabilecek yüzeyaltı özellikleri şunlardır: 1) Çökel bileşimindeki değişiklikler, tabakalanma ve birikme yüzeyleri, boşluklar ve su içeriği gibi doğal jeolojik koşullar; 2) insan yapımı malzemeler veya toprak dolgusu, gömülü atıklar, tanklar, boru hatları ve kamu hizmetleri gibi yeraltı yüzeyindeki değişiklikler (Annan, 2001).

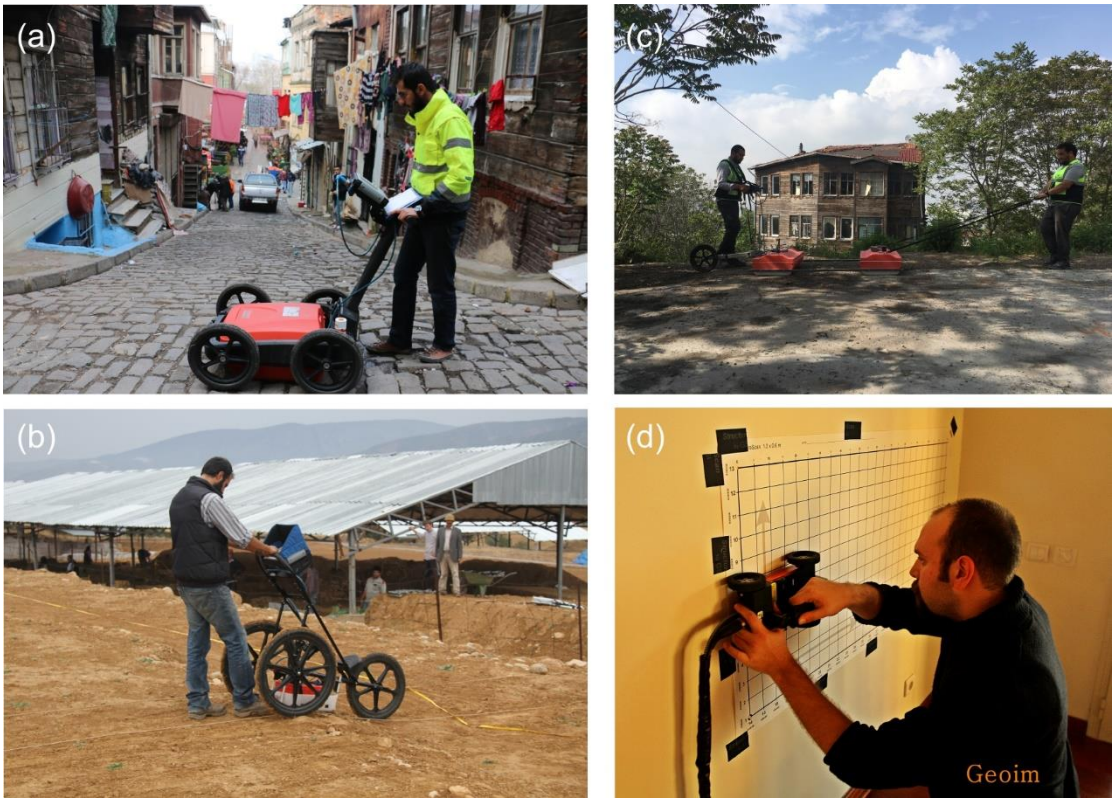


Şekil 3.8: Sol: Bir GPR sistemine ait ekipmanların gösterimi. Sağ: Yatay tabakalı bir ortamda yayılan bir GPR sinyalinin dalga yayılımın gösterimi (Öztürk, 2013).

Bir GPR sinyalinin araştırma derinliği, alanın özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır ve yeraltı malzemelerinin elektriksel özelliklerinin sinyal atenüasyonu ile sınırlıdır. Sinyal atenüasyonu genellikle yeraltının elektriksel iletkenliği ile ilgilidir. Sinyal atenüasyonu, kil ve tuzlu yeraltı suyu gibi nispeten yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerde en yüksek, doymamış kum veya kaya gibi nispeten düşük iletkenlikteki materyallerde en düşük seviyededir. Maksimum inceleme derinliği aynı zamanda anten frekansına da bağlıdır ve genellikle azalan merkez frekansı ile artar; ancak, daha küçük özellikleri belirleme yeteneği, frekans azaldıkça azalır.

Bir yer radarı araştırması, bir anteni önceden belirlenmiş enlemesine hatlar boyunca zemin üzerinden çekerek gerçekleştirilir. Anten ya bir kişi tarafından ya da bir aracın arkasına bağlanarak çekilebilir. GPR ekipmanını kalibre etmek ve genel saha koşullarını karakterize etmek için ön GPR test ölçümleri yapılır. Böylece çalışmanın amacına ve alanın özelliklerine uygun olarak zaman penceresi ile buna bağlı olarak araştırma derinliği ve yatay ile düşey örnekleme aralığı seçilir. Çalışmalar, önceden belirlenmiş birbirine dik veya paralel hatlar boyunca gerçekleştirilir. Ölçüm hatlarının düzenlemesi, hedef yapının geometrisi ve boyutuna

ile alanın boyutlarına göre düzenlenir. Ölçüm hatlarının başlangıç ve bitiş noktaları ve grid kesişme noktaları veya düğümleri, zeminde sprey boya veya bayraklar gibi nesnelerle sağlanan işaretlemelerle yapılır (Şekil 3.9). Hatlar boyunca elde edilen radar kesitleri (radargramlar) veri işlem teknikleri kullanılarak değerlendirilir. Ayrıca değerlendirilmiş radargramların birleştirilmesiyle alanın zaman/derinlik kesmeleri ve 3-boyutlu hacimsel görüntüleri oluşturulabilir.



Şekil 3.9: Farklı merkez frekanslı GPR antenlerinin çeşitli araştırmalarda kullanımı. (a) 270 MHz anten ile altyapı sistemlerinin haritalandırılması; (b) 400 MHz anten ile arkeolojik alan araştırmaları; (c) 100 MHz anten ile karstik boşlukların belirleme çalışmaları; (d) 1600 MHz anten ile bina için taşıyıcı sistemlerin donatı tespiti.

Yer radarı yöntemi, farklı problemlerin çözülmesi ve araştırılmasında kullanılmaktadır. Bu çalışma alanları; arkeolojik alan araştırmaları, sığ yer altı suyu araştırmaları, glasiyer (buzul) araştırmaları, aktif fayların belirlenmesi, çevresel olarak kirlenmiş alanların belirlenmesi, maden aramaları, boru ve kablo gibi altyapı sistemlerinin haritalandırılması, bina içi taşıyıcı ve temel sistemlerinin araştırılması, tünel ve otoyol çalışmaları, jeolojik özellikleri belirlenmesi ve araştırılması gibi birçok farklı disiplini kapsamaktadır (Öztürk, 2013).

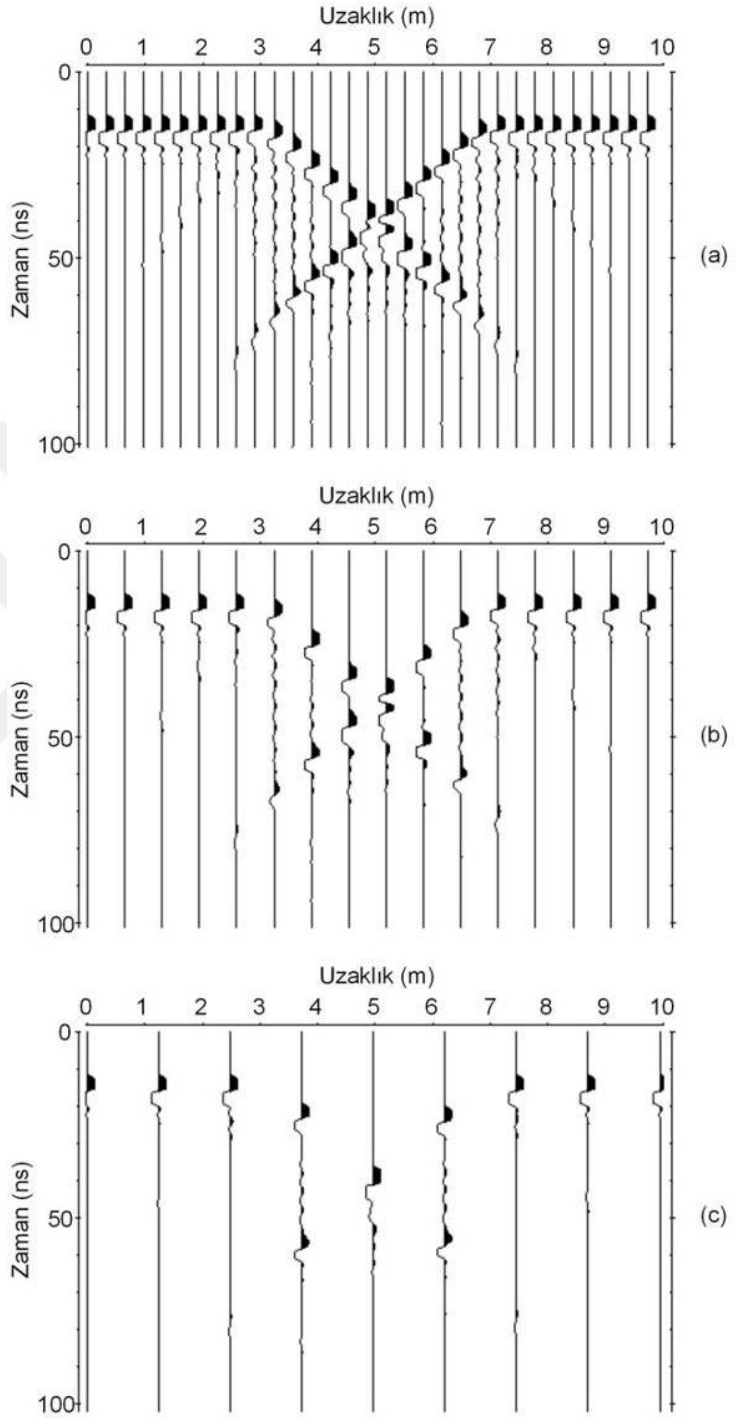
GPR yöntemi ayrıca sığ yapıların ve derinliklerinin belirlenmesinde genel olarak kullanılan diğer jeofizik araştırma yöntemlerinden daha yüksek uzamsal görüntüleme çözünürlüğüne sahiptir. Yeraltının 3-boyutlu görüntüleri, arkeolojik alanlardaki gömülü yapılar hakkında ayrıntılı bilgi elde etmek, yüzey altındaki arkeolojik kontekst hakkında kapsamlı bilgi sağlamak için kullanılabilir (Conyers ve Goodman, 1997; Leckebusch, 2003; Piro ve diğ., 2003; Drahor, 2019).

Yer radarı çalışmalarında başarılı sonuçlar elde edilmesinde en önemli aşama veri toplamadır. Bu aşamada hatların yönü, hatlar arasında mesafe, örnekleme, anten ve zaman penceresi seçimi başarılı sonuca ulaşmada önemli etkenlerdir. Örneğin bir nekropol (mezar alanı) alanında çalışırken mezarların güney-kuzey doğrultulu olduğu biliniyorsa ölçüm hatlarının doğu-batı yönlü seçilmesi doğru olacaktır. Mezarın ya da herhangi bir arkeolojik yapının uzun eksenine dik yönlü ölçümler almak, daha başarılı sonuçlar elde etmeyi sağlayacaktır. Ölçüm hatları arası mesafenin hedef yapının boyutunun en az yarısı olması yapının tespiti olasılığını arttıracaktır (Goodman, 2009).

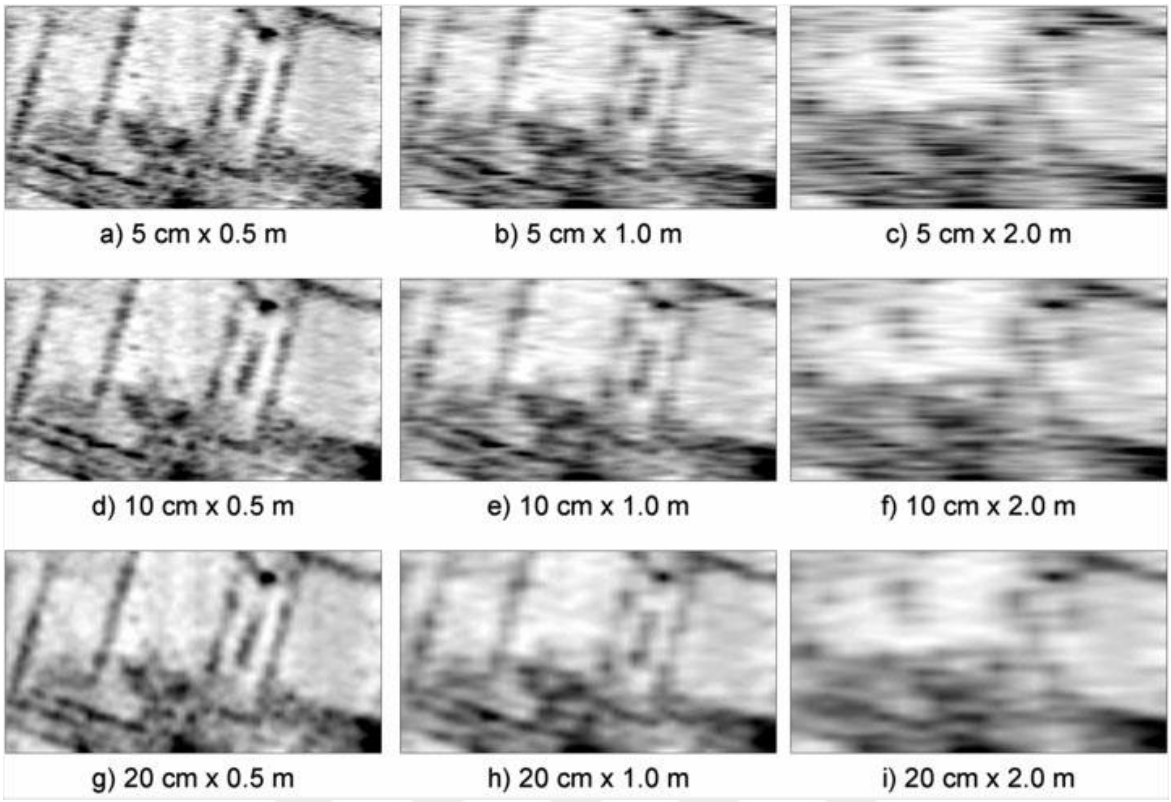
Yer radarı verilerinin toplaması ve yorumunda örnekleme ve hat aralıklarının etkisi son derece önemlidir. Bu önemi ortaya koymak için Şekil 3.10'da verilen ve sentetik yolla elde edilmiş bir hendek biçimli yapıya ilişkin üç farklı örnekleme aralığına sahip radargram verilmektedir. İlk radargramda örnekleme aralığı 25,6 cm'dir ve hendek biçimli yapının etkisi açıkça görülmektedir. Aynı yapı örnekleme aralığı 51,2 cm ile toplanırsa, hendek türü yapının etkisi görülebilmekle birlikte ayrımlılığı azalmaktadır. Eğer örnekleme aralığı 102,4 cm seçilirse, bu yapıyı belirleyebilmek olanaklı olmamaktadır. Buradan da açıkça görülebildiği gibi, örnekleme aralığı yapı belirleniminde etkili bir faktördür. Bu nedenle aranılan yapının boyutlarına bağlı olarak örnekleme aralığının belirlenmesi önem taşır. Ayrıca bu aralık radargramlarda izlerin daha iyi izlenmesine de olanak tanır.

Ölçümler sırasında ölçüm hatları arasındaki mesafe de önem taşıyan bir diğer unsurdur. Bu durumun etkisini görebilmek amacıyla Şekil 3.11'de verilen 30-31,5 ns aralığından farklı hat aralıkları ile elde edilmiş görüntüler verilmektedir. Bu görüntülerde örnekleme aralıklarının etkisi şekil sıralanmalarında yukarıdan aşağıya değişirken, hat aralıklarının etkisi soldan sağa doğru sıralanmaktadır. Görüntülerden de açıkça görülebildiği gibi hat aralıkları seçimi anomalinin belirlenmesi ve ayrımlılığında büyük öneme sahiptir. Hat aralıkları açıklığı çok açıldığında yeraltındaki yapıları gösteren anomalilerde önemli bozulmalar ortaya çıkmaktadır.

Bu nedenle arkeolojik aramalarda 1m'nin üzerinde hat aralıkları kullanmak yapı belirlenimi açısından olumsuz durumlar oluşturabilir.



Şekil 3.10: Örnekleme etkisini göstermek amacıyla sentetik yolla elde edilmiş hendek biçimli bir yapıya ilişkin üç farklı örnekleme aralığından radargramlar. (a) 25,6 cm, (b) 51,2 cm, (c) 102,4 cm (Conyers ve Goodman 1997'den alınmıştır).



Şekil 3.11: Farklı ölçüm aralıklarının karşılaştırılmasının yapıldığı 30-31.5 ns aralığından elde edilmiş radar kesitleri (Neubauer, 2002'den alınmıştır).

Yer radarı yöntemiyle arkeolojik alanlarda başarılı sonuç elde etmenin bir başka etkeni hedef yapıya uygun anten ve zaman penceresi seçimidir. Hedef yapının boyutu ve gömülü derinliğine bağlı olarak uygun anten kullanılması gerekmektedir. Arkeolojik alanlarda genelde 200 ile 900 MHz merkez frekanslı anten kullanılmaktadır. Ancak merkez frekansı 200 MHz altı antenlerde derin yapıları tespit edilmesi için kullanılabilinir. Örneğin 15 m'den daha derin bir araştırma yapılacaksa 100 MHz veya daha düşük frekanslı bir anten tercih edilmelidir. Mozaik bir yüzey üzerinden yapının içindeki değişimler cm mertebesinde araştırılmak isteniyorsa 1500 MHz ve üzeri antenleri kullanılması uygun olacaktır (Goodman, 2009). Veri toplamaya başlamadan önce kullanılan anten ve araştırma derinliğine bağlı zaman penceresi doğru belirlenmesi gerekmektedir. Zaman penceresinin az belirlenmesi hedef yapı tespit edilememesine, fazla seçilmesi ise sonuçların özellikle düşeyde çözünürlüğünü azaltacaktır.

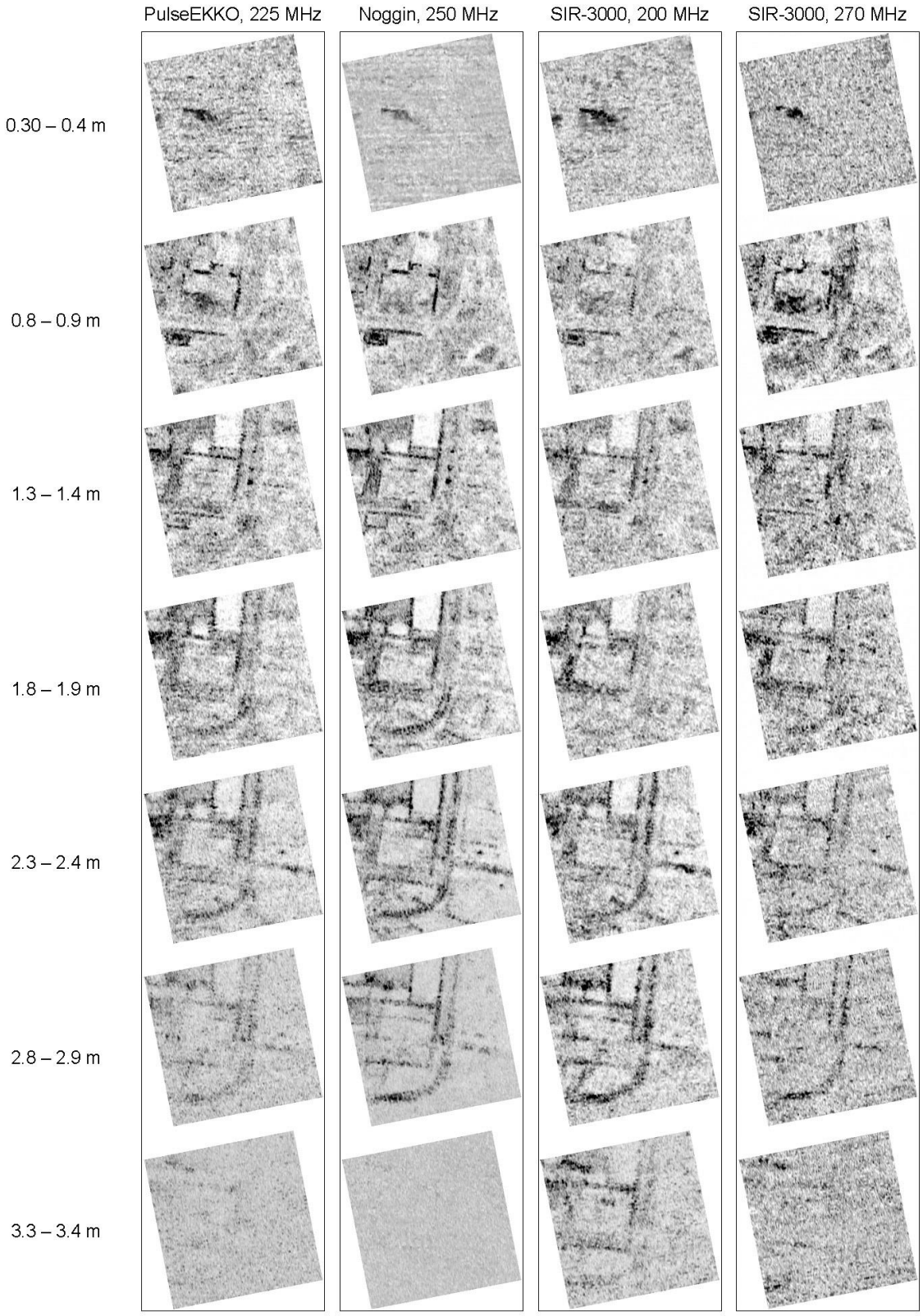
Yer radarı çalışmalarında başarılı bir sonuç elde edilebilmesi için uygun yer radarı sistemleri kullanılması önemlidir. Bu kapsamda, Seren ve diğ. (2007)'de farklı üreticiler tarafında geliştirilen yer radarı sistemleri bir arkeolojik alanda test edilmiştir. Roma'nın Carnuntum bölgesinde yapılan çalışmada farklı cihaz ve antenlerin avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir.

Bu çalışmalar sonrasında bazı yer radarı sistem üreticileri antenlerinin gücünü arttırma gereksinimi duymuştur. Test çalışması kapsamında Sensors & Software PulseEKKO ve NOGGIN cihazları ile GSSI SIR-3000 sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.12) Diğer üreticilerin cihazları için gerekli izinler alınamadığı için test kapsamında dahil edilmemiştir. Yapılan ilk çalışma Seren tarafından 2005 yılında yapılmış ve sonuçlar üretici firmalar ile paylaşılmıştır. 2005 yılındaki ilk test çalışmasından sonra GSSI firması 400 ve 900 MHz antenlerini yüzde 43 daha fazla iletim gücüne sahip olacak şekilde yeniden yapılandırmıştır.

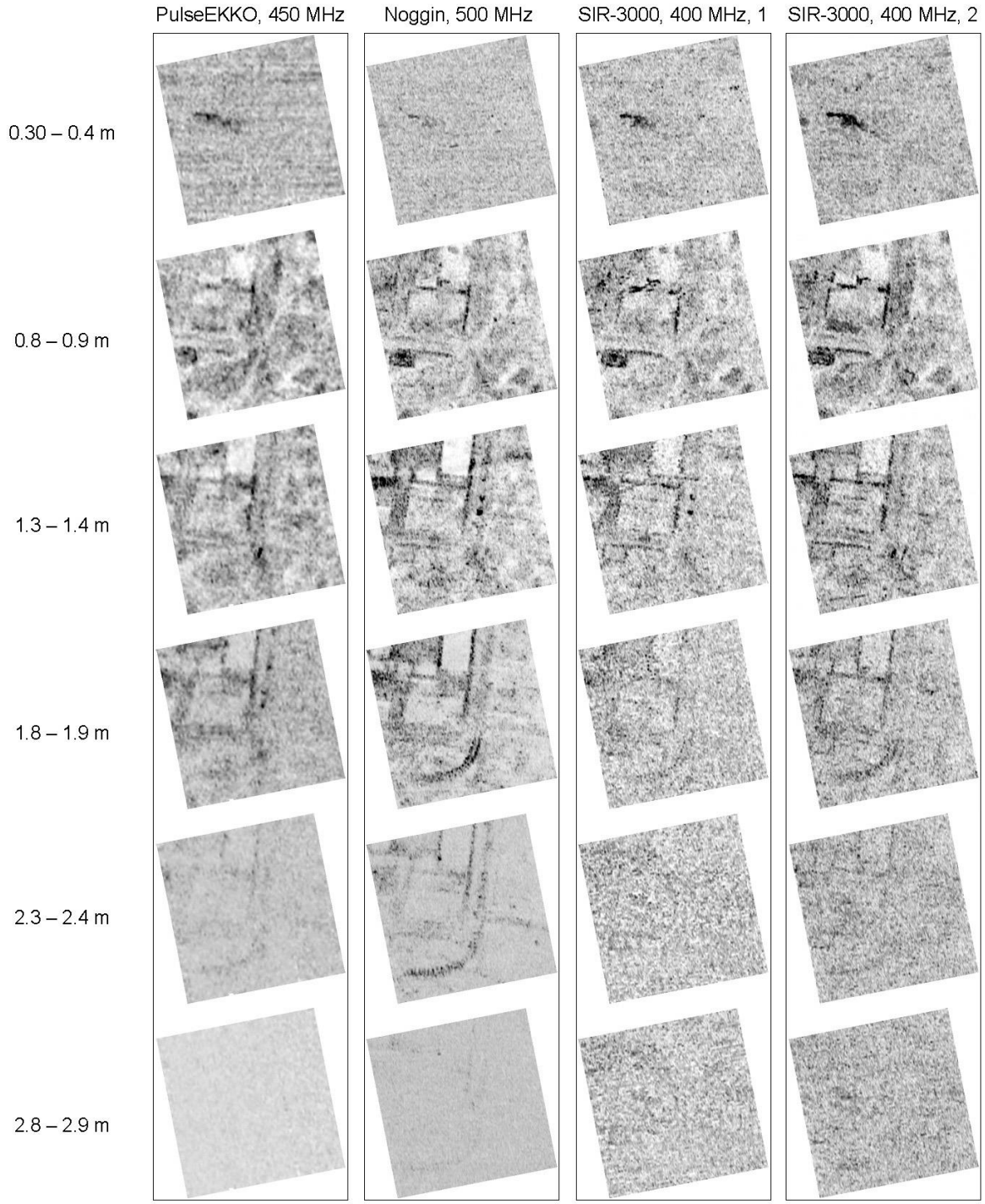


Şekil 3.12: Sol: PulseEKKO 1000 sistemi, Orta; NOGGIN sistemi, Sağ; GSSI SIR-3000 sistemi (Seren ve diğ., 2007).

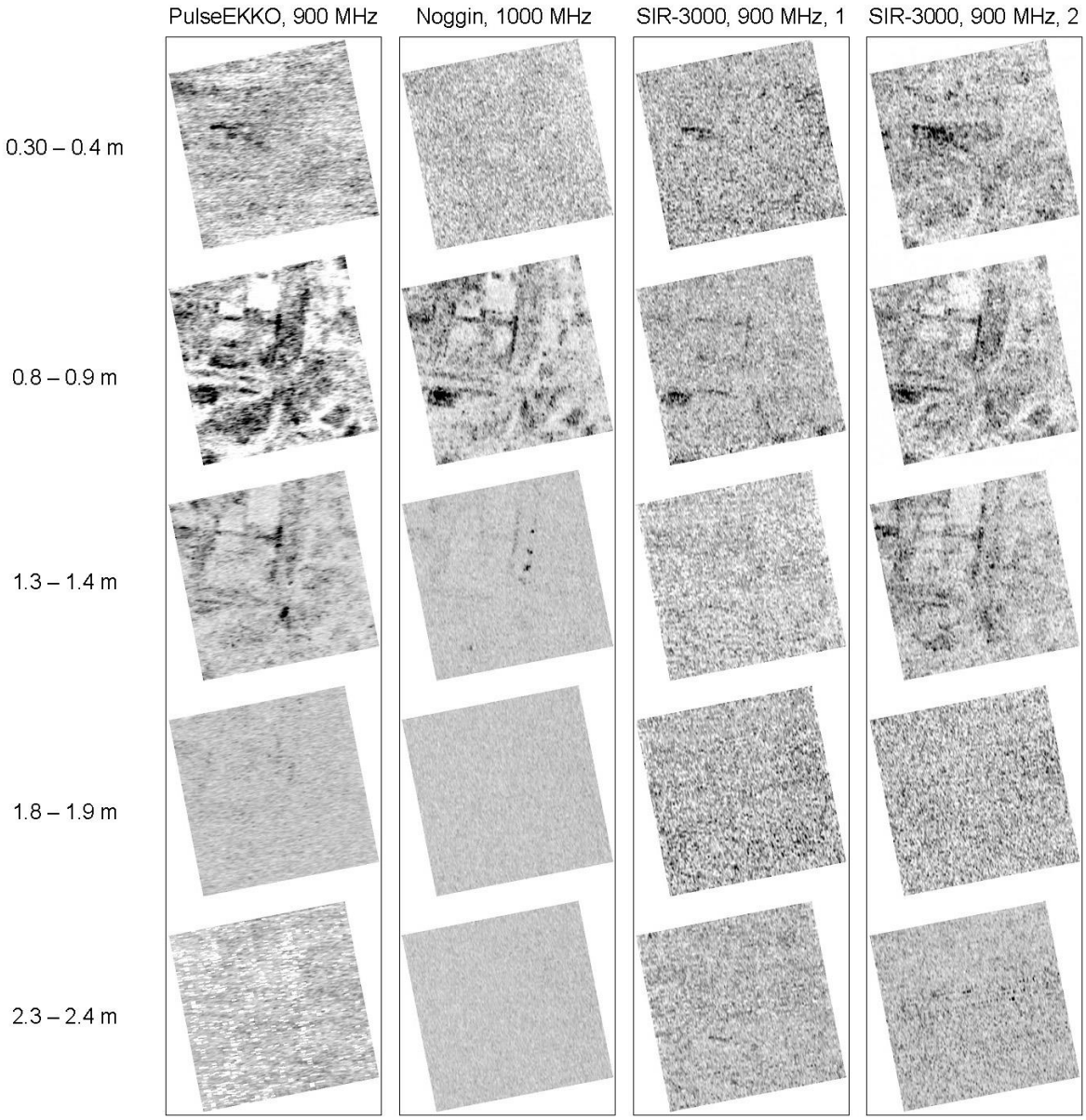
Test çalışmaları, düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç farklı anten grubu için gerçekleştirilmiştir. Düşük frekans grubunda, PulseEKKO'nun 225 MHz, NOGGIN'in 250 MHz ve GSSI'ın 200 MHz ile 270 MHz antenleri kullanılmıştır (Şekil 3.13). Orta frekans grubunda, PulseEKKO'nun 450 MHz, NOGGIN'in 500 MHz ve GSSI firmasının ise 400 MHz anteninin ilk sonuçları ile iletim gücü arttırılarak yeniden yapılandırılan aynı frekanslı anteni test edilmiştir (Şekil 3.14). Son olarak yüksek frekans grubunda, PulseEKKO'nun 900 MHz, NOGGIN'in 1000 MHz ve GSSI'ın yapılandırma öncesi ve sonra olmak üzere 900 MHz antenleri kullanılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.13: Düşük-frekanslı antenleri karşılaştırmalı yer radarı derinlik kesme görüntüleri (Seren ve diğ., 2007).



Şekil 3.14: Orta-frekanslı antenleri karşılaştırmalı yer radarı derinlik kesme görüntüleri. GSSI SIR-3000 sisteminin ikincisi anten gücünün arttırılması sonrasına aittir (Seren ve diğ., 2007).



Şekil 3.15: Yüksek-frekanslı antenleri karşılaştırmalı yer radarı derinlik kesme görüntüleri. GSSI SIR-3000 sisteminin ikincisi anten gücünün arttırılması sonrasına aittir (Seren ve diğ., 2007).

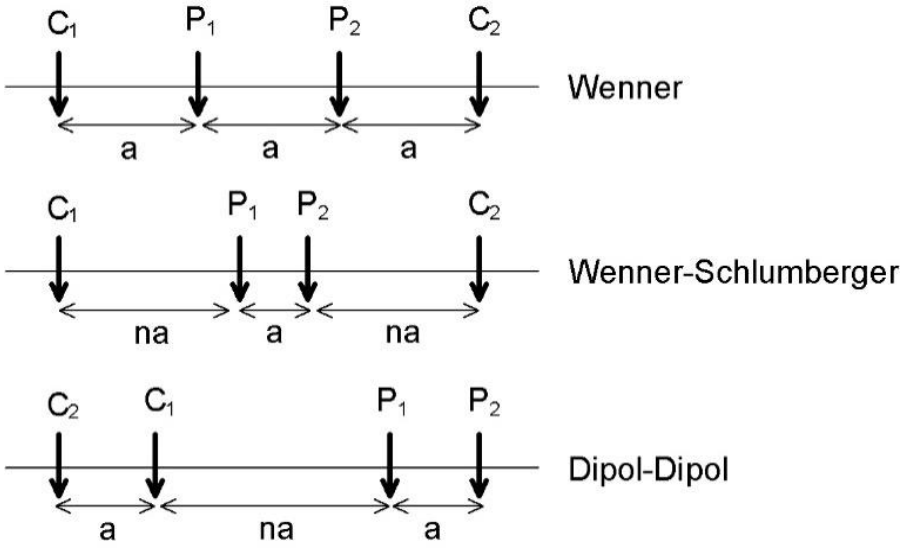
Test çalışması sonrasında ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Tüm test edilen yer radarı sistemleri arasında en iyi penetrasyon derinliğini sağlayan 200 MHz antenli SIR-3000 sistemi olduğu görülmektedir. Ayrıca GSSI firmasının ürettiği antenlerde güç artırımı sonrasında diğer sistemlere göre nispeten iyi penetrasyon derinliğine sahip sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu sistem ile elde edilen verilerde daha fazla gürültü seviyesi mevcuttur. Bu durum bu sistemin en büyük dezavantajıdır. PulseEKKO 1000 sistemiyle elde edilen sonuçlarda, başarılı sonuçlar

vermiştir. Gürültü durumu GSSI ile kıyasla daha az ve sonuçlar daha belirgindir. Aynı firmanın ürettiği NOGGIN sistemiyle ise en keskin sonuçlara veren sistem olarak görülmektedir. Seren (2007)'ye göre GSSI antenlerinde gürültü oranının yüksek olmasının iki nedeni vardır. Birincisi, enstrümanın kendisinin yüksek gürültü üretmesi ve ikincisi, ölçüm arabasından gelen yansımalar olduğu düşünülmektedir. Sinyal gücü arttırıldıktan sonra aynı frekansta üretilen antenler ile daha iyi sonuçlar elde edilebilmiştir (Seren 2007).

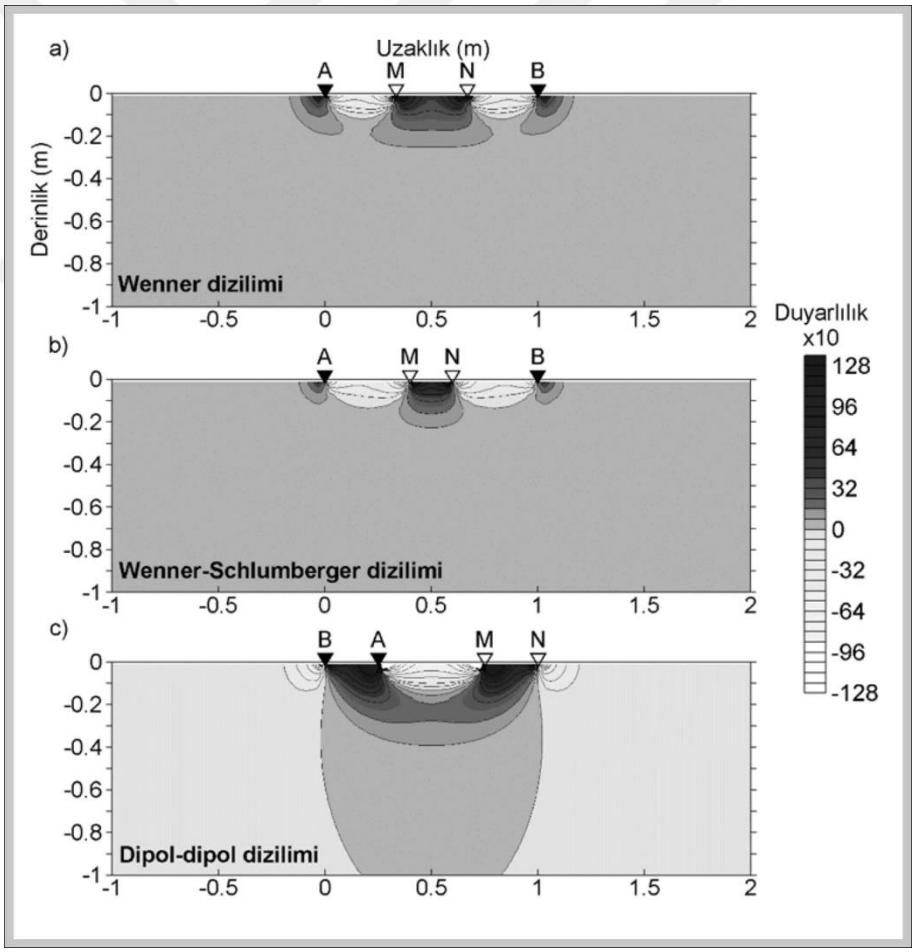
3.1.3. Elektrik Resistivite Tomografi (ERT) Yöntemi

Elektrik resistivite tomografi (ERT), arkeolojik araştırmalarda kullanılan ilk yöntemdir ve özellikle kayaçlardan oluşmuş gömülü yapıların resistivite değeri toprağa göre daha yüksek resistivite değerine sahip olacağı için bu yöntemle kolayca belirlenebilecektir (Atkinson, 1974). Yöntem, toprak altındaki gömülü arkeolojik yapıları elektrik resistivite değerlerine göre belirlemesi prensibine göre uygulanmaktadır. Toprak resistivite ölçümleri hem akım hem de potansiyel olarak dört elektrot ile yapılır. Elektrik resistivite ölçümünün ölçülebilir değeri, görünen resistivitedir. Bu değer, elektrot dizilim türlerine, iklim koşullarına, hedefin gömülme derinliğine ve özelliğin geometrisine bağlıdır. Birçok dizilim tipi resistivite araştırmalarında kullanılır, ancak görünen resistivite değerleri geometrik konumlarına göre değişir. Arkeolojik araştırmalara en popüler dizilim twin probe dizilimidir. Ancak bu dizilimin saha uygulaması zor olmasından dolayı en yaygın kullanılan dizimleri, Wenner, Wenner-Schlumberger ve dipol-dipol elektrot dizilimleridir (Şekil 3.16). ERT yöntemiyle, gömülü duvarlar, yollar, temeller, hendekler ve diğer benzeri yapılar, çöp alanları ve mezarlar gibi birçok arkeolojik yapı, resistivite yöntemi kullanılarak kolayca belirlenebilir (Drahor, 2007b).

Toprak ile ilişkili uygulamalarda, görünen resistivite çoğunlukla toprak nemi, çözülebilir iyon konsantrasyonları ve fiziksel toprak tipinin değişmesinden de etkilenir. Resistivite yönteminde, gömülü yapının özelliklerinin dışında kullanılan elektrot dizilimleri de anomalinin belirlenmesinde önemlidir. Bu nedenle, herhangi bir yer modeli için hesaplanan veya ölçülen görünen resistivite değerleri, farklı elektrot dizilerine göre farklı sonuçlar verecektir (Berge, 2011). Wenner, Wenner-Schlumberger ve dipol dipol dizilimlerinin duyarlılık kesitleri Şekil 3.17'de verilmiştir.

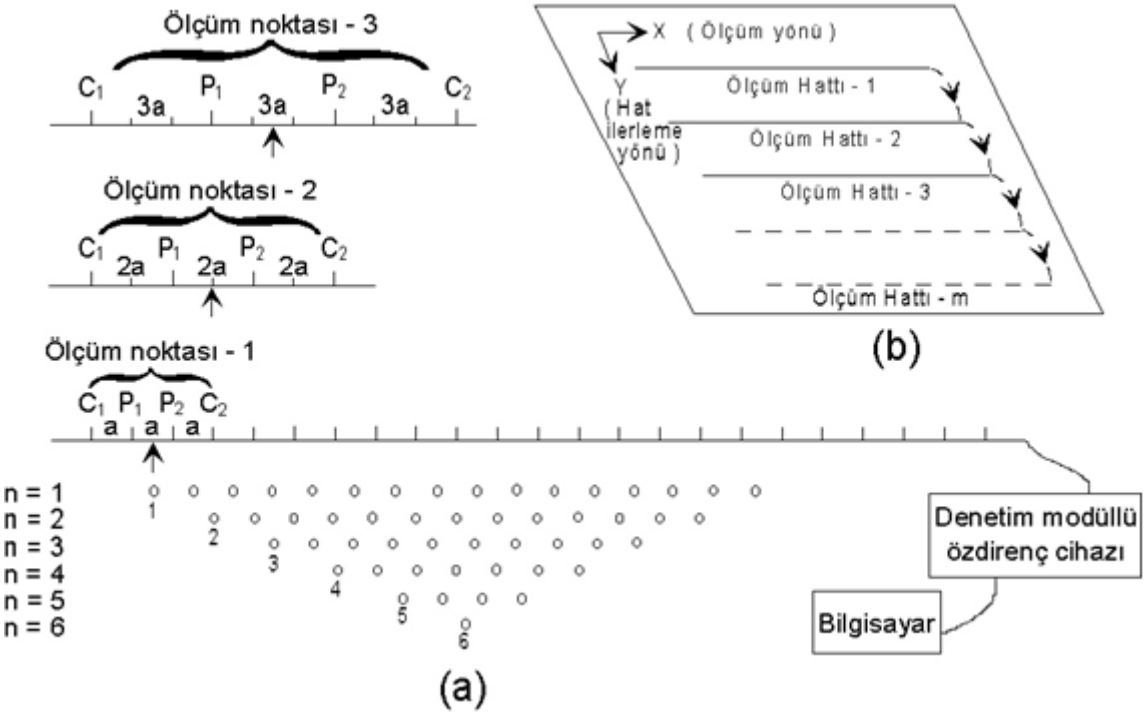


Şekil 3.16: Arkeolojik alanlarda yaygın olarak kullanılan resistivite elektrot dizilimleri.



Şekil 3.17: a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger ve c) dipol-dipol dizilimlerinin 100 Ωm'lik homojen ortam için hesaplanmış duyarlılık kesitleri (Berge, 2011'den düzenlenmiştir).

Resistivite yönteminde, son yıllarda bilgisayar kontrollü veri toplama sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler; resistivite cihazı, bilgisayar, elektrotlar, elektrot kabloları, kablo bağlantıları ve elektrotları kontrol eden bir anahtar devresinden oluşur (Griffiths ve Barker, 1993). Elektrot aralıkları, araştırmacının ihtiyacına bağlı olarak istenen aralıklarda düzenlenir. Arkeolojik araştırmalarda, genellikle 1 m aralıklar yeterlidir. Çalışmalar sırasında elektrotların bağlandığı çoklu kablolar çalışma alanına serildikten sonra, elektrotlar toprağa yerleştirilir ve çoklu kablolar elektrotlara bağlanır ve sistem ölçüme hazırdır. Ölçümler istenen dizilim türleri için kısa sürede yapılır ve ölçüm hattı bir sonraki satıra kaydırılır. Böyle bir sistemi oluşturan ana bileşenler ve ölçüm sistemi, Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18: Çok-kanallı elektrik resistivite verilerinin Wenner dizilimine göre toplanması (Griffiths ve Barker, 1993).

Elektrik resistivite yönteminde, ters-çözüm çalışmaları kullanılarak yeraltının doğruya yakın resistivite dağılımını elde etmek mümkündür. ERT ters-çözümünde amaç, sınırlı sayıda görünür resistivite verisinden doğru bir yeraltı resistivite dağılım modeline ulaşmaktır (Drahor, 2007b). Bu, problemin doğrusal olmayan bir ters-çözüm problemi olarak çözülmesine neden olur. Bu tür sorunları çözmek, gözlemlenen ve kuramsal görünen resistivite verileri arasındaki farkı yinelemeli olarak en aza indirerek bir başlangıç modelinin iyileştirilmesini gerektirir. Başlangıç modelinden başlayarak, ilk aşamada kuramsal bir veri elde edilir ve daha sonra kuramsal ile hesaplanan model parametrelerinin yinelemeli ters-çözüm aşaması ile

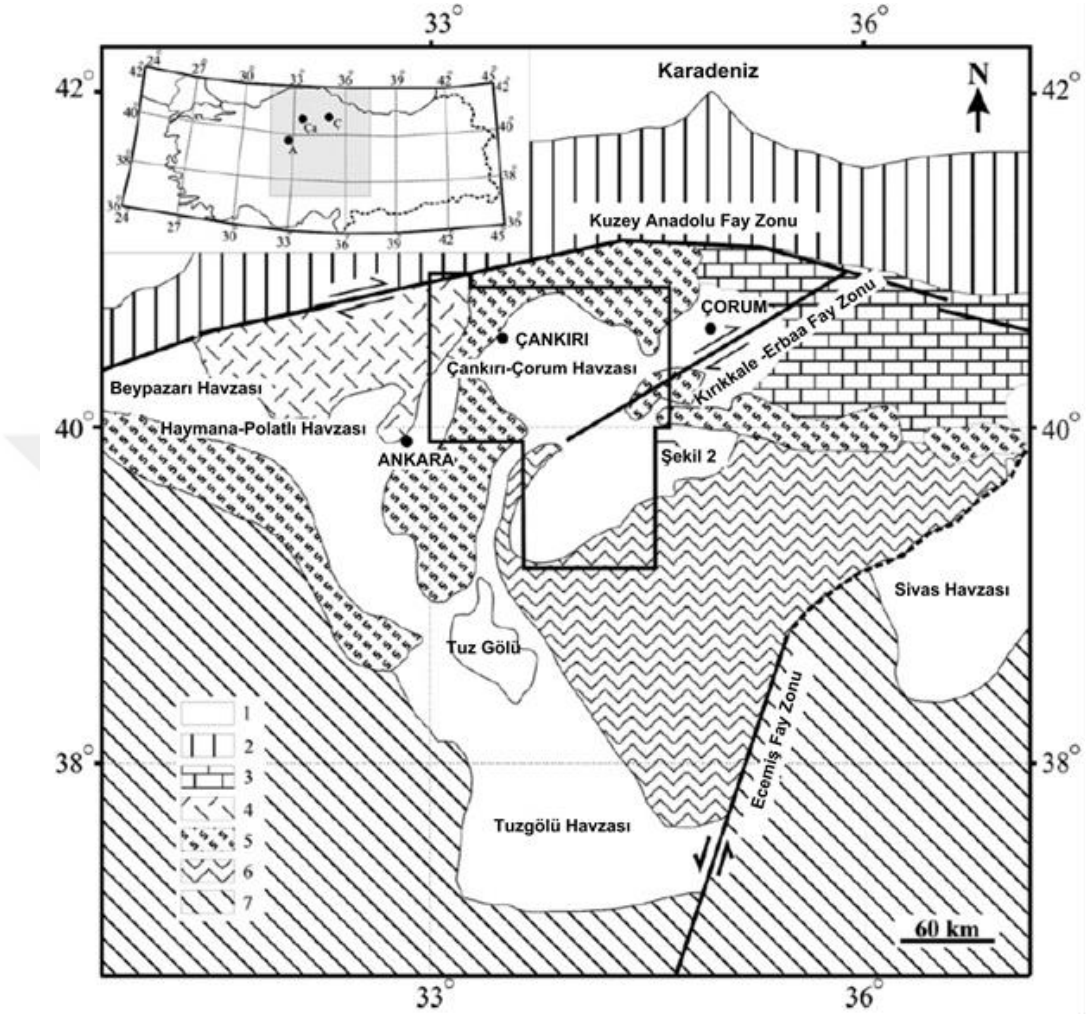
geliştirilerek, model güncellenir. Bu aşamalardaki tüm hesaplamalar için düz-çözüm tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tomografik yaklaşım teknikleri olarak da adlandırılan bu yinelemeli süreç, 1980'lerden beri elektrik resistivite verilerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Berge, 2011; Drahor, 2007b; Tripp ve diğ., 1984; Loke ve Barker, 1996a, b).

3.2. ÇALIŞMA ALANI – ŞAPİNUVA ANTİK KENTİ (ÇORUM-ORTAKÖY)

3.2.1. Çalışma Alanı ve Çevresinin Jeolojisi

Çorum ve çevresi jeolojik anlamda yaygın çalışılan bölgelerden biridir. Özellikle MTA bölgede 1960'ların sonundan 1970'lerin sonuna kadar metalik maden ve endüstriyel hammaddeye yönelik birçok çalışmada bulunmuştur. Bölgede bulunan Çankırı-Çorum baseni Orta Anadolu'nun en büyük basenlerinden biridir. Bu basen Oligosen'den Kuvaterner'e kadar belirli bir evrim içinde değişim göstermiştir. Bu nedenle endüstri ve enerji anlamında önemi yüksek bir bölgedir. Özellikle metalik maden yatakları anlamında son yıllarda yoğun arama ve madencilik faaliyetlerinin bulunduğu bir alandır. Oligosen'de Neotetis'in kapanması ile birlikte Anadolu'da birçok havza oluşmaya başlamıştır. Ayrıca Alp-Himalaya orojeninin etkileri ile ortaya çıkan Toros dağ kuşağı da Anadolu'da yeni basen oluşumlarında etkili olmuştur. Çalışma alanının da içinde bulunduğu Çankırı-Çorum baseni de bunlardan biridir. Basen'in Orta Anadolu'daki yeri ve temel jeolojik birimler Şekil 3.19'da verilmektedir. Basen Türkiye'nin en büyük çökel basenlerinden biridir. Batıda K-G gidişli Elmadağ-Erdivan dağı, kuzeyde D-B gidişli Ilgaz dağları, doğuda ise yine K-G gidişli Köse dağı gibi topografik yükselimlerle sınırlıdır. Çankırı-Çorum havzası Türkiye'nin farklı kıtasal ve ofiyolitik birliklerinin bir araya geldiği bir alanda yer almaktadır. Basendeki en yaşlı birim orta ve güney bölümlerde gnays ve kuvars şistler ile kuzeydeki metadetritikler ve ofiyolitik melanjdır. Bu kayaçlar Paleosen'de ortaya çıkan granitik sokulumlarla kesilmektedir. Tüysüz ve Dellaloğlu (1992), havzanın Geç Paleosen-Erken Eosen'de Neo-Tetis'in kapanmasından sonra bu jeolojik birimin artıkları üzerinde K-G gidişli bir riftleşme ile açılmaya başladığını ve Orta Eosen'de en derin haline geldiğini, daha sonra süre giden sıkışma ile yükselerek sığlaştığını belirtmektedirler. Sonuçta Geç Eosen-Oligosen'de karasal bir havza haline gelmiştir. Üst Eosen'den sonra deniz lagünler oluşturarak ve göller bırakarak sığlaşmış ve çekilmiş, Miyosen'den itibaren de bölge tamamen karasallaşmıştır. Orta Miyosen'in sonları ile Erken Pliosen'de Anadolu'daki tektonik evrimde bir geçiş süreci vardır ve bölgede ortaya çıkan aktif faylanmalar Neotektoniğin başlangıcı olarak düşünülmektedir. Bu dönemde Kuzey Anadolu ve

Doğu Anadolu fay zonları oluşmaya başlamıştır. Doğrultu atım özellikli bu faylar Anadolu'daki tektonik kaçma modelinin temelini oluştururlar.

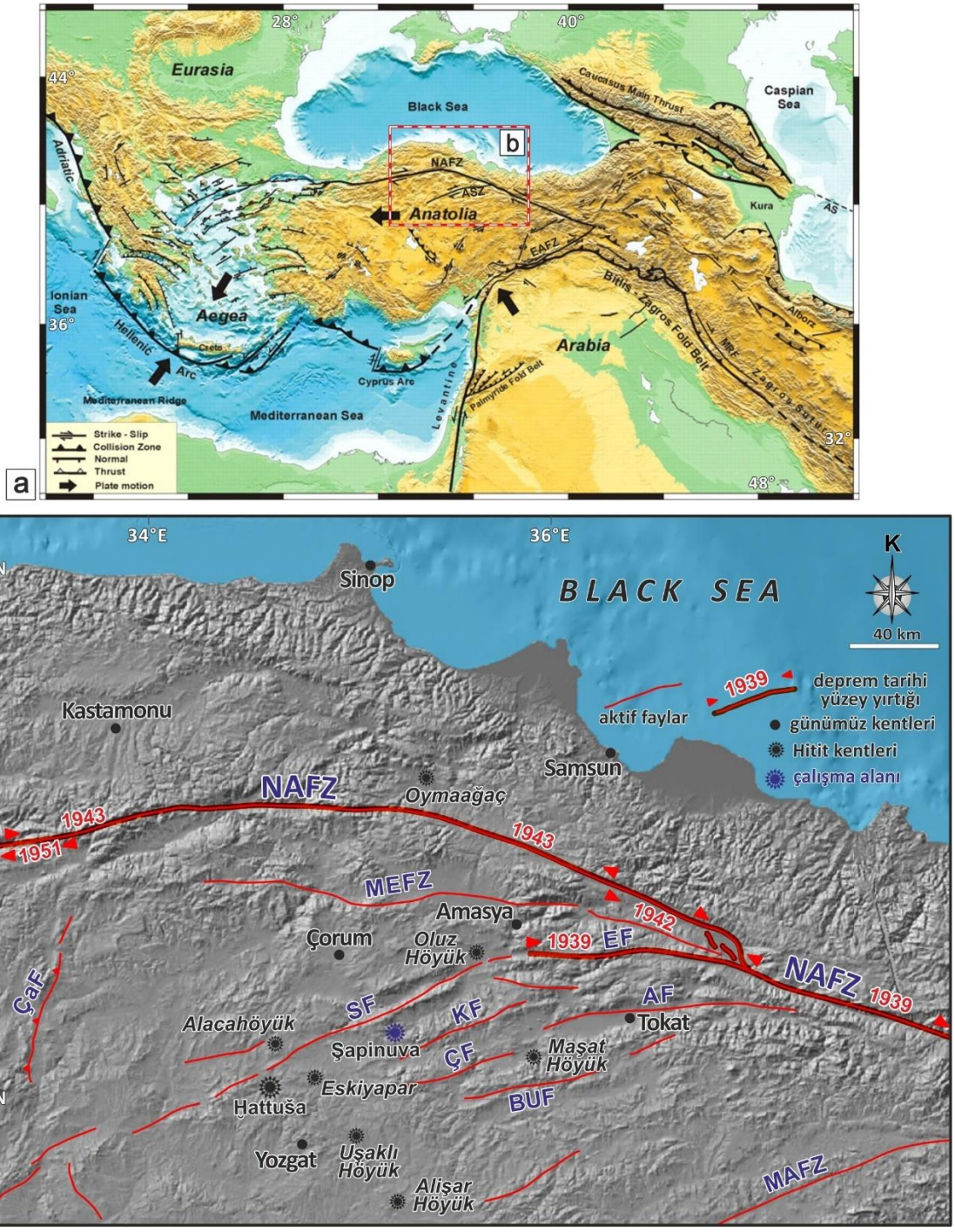


Şekil 3.19: Orta Anadolu bölgesi ve Çankırı-Çorum baseninin basitleştirilmiş jeolojisi ve bölgedeki önemli fayları gösteren harita. Açıklamalar: A: Ankara, Ça: Çankırı, Ç: Çorum, 1: Tersiyer çökel basen, 2: Rodop-Pontit bloğu, 3: Sakarya kıtası, 4: Galatya volkanik kompleksi, 5: Ofiyolitik melanj, 6: Kırşehir kıtası, 7: Toros bloğu (Karadenizli, 2011'den alınmıştır).

Bu tez çalışmasında verilerin toplandığı araştırma alanı olan Şapinuva kentinin ana mimari malzemesinde kullanılan jeolojik birimler, Eosen formasyonlarına ait orta-iri taneli, masif, kalkerli çimentolu, iyi sıkıştırılmış konglomeralar ve kalın-orta tabakalı mikritik kireçtaşlarıdır (Drahor ve diğ., 2023). Kent, Kuzey Anadolu Fay Zonundan (KAFZ) yapısal olarak ayrılan batıya doğru genişlemeli olarak ilerleyen Amasya Makaslama Zonu (ASZ) olarak adlandırılan (Erturaç ve Tüysüz, 2012) alanda bulunmaktadır (Şekil 3.20). Güneyde Orta Anadolu Fay Zonu (MAFZ) ile kuzeyde KAFZ arasında bulunan bu makaslama zonu içerisinde yaklaşık KD-GB

doğrultusuna sahip birçok aktif faylar bulunmaktadır. Buradaki faylar güneyden kuzeye doğru sırasıyla Buğdaylı Fayı (BUF), Almus Fayı (AF), Çekerek Fayı (ÇF), Kazankaya Fayı (KF), Sungurlu Fayı (SF), Ezinepazarı Fayı (EF), Merzifon-Esençay Fayı'ndan oluşmaktadır. Şekil 3.20'de Drahor ve diğ. (2023) tarafından düzenlenen ve önemli Hitit kentlerini gösterecek şekilde hazırlanmış bölgenin aktif fay haritası verilmiştir. Bu haritaya göre Şapinuva arkeolojik alanı Kuzey Anadolu Fay Zonu ile bağlantılı Amasya Makaslama Zonu içerisinde gelişen Sungurlu Fayı'nın güney bloğunda yer almaktadır (Şekil 3.20). Şekilde üst harita Taymaz ve diğ, 2007'den basitleştirilerek alınan batimetri kabartmalı Doğu Akdeniz gölgesinin tektonik haritasına yer verilmiştir. Şeklin ikinci (alt) kısmında ise bölgedeki aktif fayları ve Şapinuva ile diğer Hitit kentlerinin konumlarını gösteren tektonik harita bulunmaktadır. Dünyanın en aktif fay sistemlerinden biri olan KAFZ'nin dört önemli segmentinin güneyinde yer alan bu Hitit kentleri, tarih boyunca oldukça aktif olan bu segmentlerin etkisinde kalmıştır (Drahor ve diğ., 2023). Aletsel dönem kayıtlarında bu bölgede 1939 Erzincan (M: 7.9), 1942 Niksar-Erbaa (M: 7.1), 1943 Tosya-Ladik (M: 7.9) ve 1951 Kurşunlu-Ilgaz (M: 6.9) depremleri meydana gelmiştir (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988). Şekil 3.20'de faylar üzerinde bu depremler işaretlenmiştir. Amasya Makaslama Zonu'nda içerisinde en önemli aktif fayın KAFZ'nin Ezinepazar segmentine bağlanan ve Kırıkkale'ye kadar devam ettiği düşünülen Sungurlu Fayı olduğu düşünülmektedir (Drahor ve diğ., 2023).

Çalışma alanı ve çevresinden böylesi önemli tektonik yapıyla ilişkili olarak Şapinuva kazı alanındaki bazı binalarda önemli deprem izlerinin bulunduğu ortaya çıkmıştır. Bunların bir kısmı zemin çökmelerini gösterirken, bir kısmında ise duvarlarda eğimlenme ve hatta bazı kısımlarda duvar ötelenmeleri biçimindedir. Özellikle jeofizik çalışmalarla belirlenen ve sonrasında kazı çalışmaları yapılan G binası olarak adlandırılan yapıda deprem izleriyle ilgili önemli bulgular elde edilmiştir (Drahor ve diğ., 2023). Depremle ilgili bu izlerin kaybolmaması için Şapinuva Kazı Başkanlığı tarafında yapının üzeri kapatılmış ve korumaya alınmıştır. Alanda arkeolojik kazılar arkeo-sismolojik çalışmalarla koordineli bir şekilde yapılmıştır. Bu çalışmalarla, yapı kalıntıları üzerinde büyük bir depremin varlığını gösteren verilere ulaşılmıştır. Şekil 3.21'de verilen fotoğraftan da görülebileceği üzere yapı duvarlarında dalga şekli oluşum dikkat çekicidir. Yapı duvarlarında görülen bu dalgalanmalarla birlikte yapı duvarlarında dönmeler, düşey ve yatay deformasyonlar ve dilatasyonlar gözlenmiştir. Duvarlardaki düşey yer değiştirme kuzeyde 67 cm'ye, merkezde ise yatay yer değiştirme 12 cm'ye ulaşmaktadır (Şekil 3.21).



Şekil 3.20: (a) Taymaz ve diğ, 2007'den düzenlenen batimetri kabartmalı Doğu Akdeniz gölgesinin tektonik haritası. (b) Şapinuva ile diğer Hitit kentlerinin konumlarını ve bölgedeki aktif fayları gösteren tektonik harita (Drahor ve diğ., 2023'den alınmıştır).



Şekil 3.21: Şapinuva arkeolojik alanında G Binası olarak adlandıran yapısında yapılan arkeosismolojik çalışmalar sonucunda elde edilen deprem izlerinin fotoğraflar üzerinden gösterimi (Drahor ve diğ., 2023'den alınmıştır).

3.2.2. Şapinuva Antik Kentinin Arkeolojik Özellikleri ve Tarihi

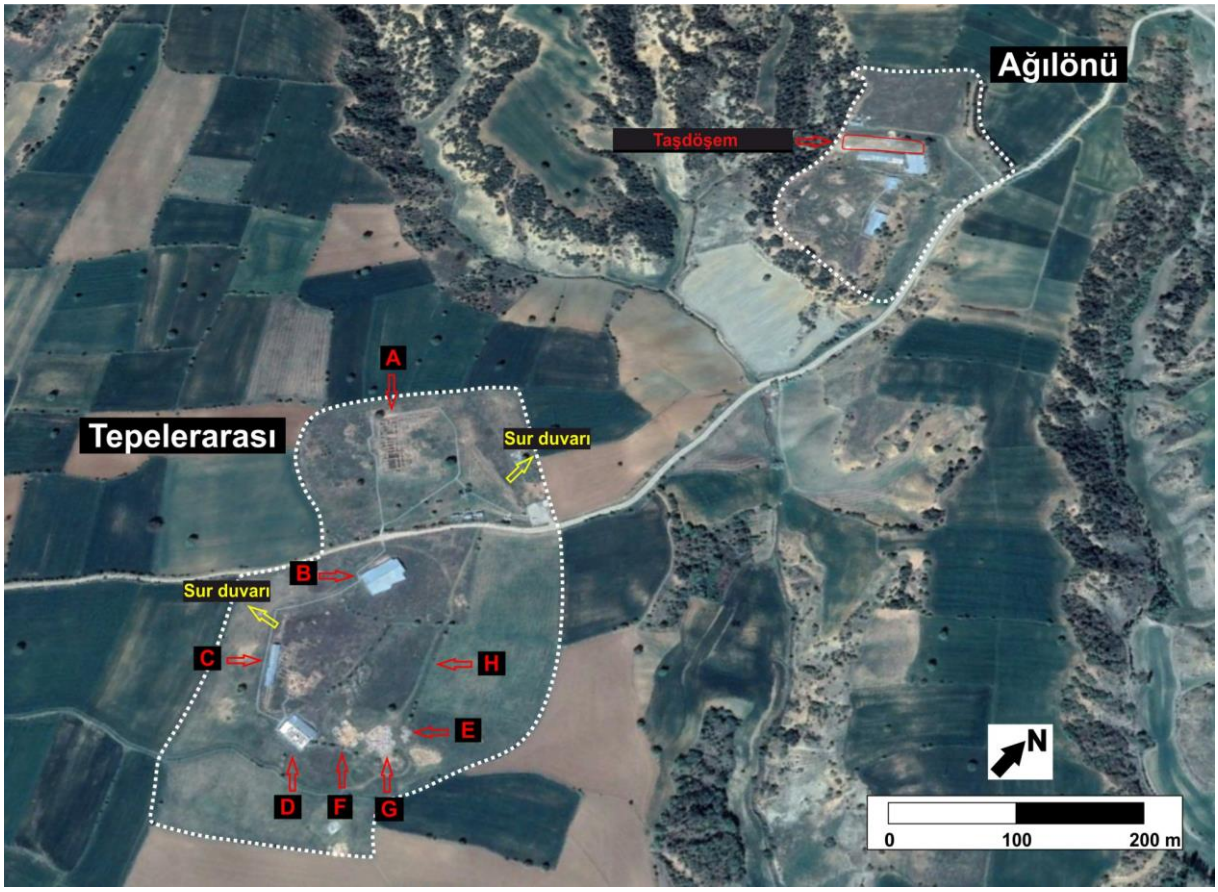
Çorum ilinin Ortaköy ilçesi yakınında bulunan Şapinuva Hitit yerleşmesi Çorum il merkezine 53 km ve Ortaköy ilçesinin de yaklaşık 2 km güneybatısındadır. Hattuşa'nın kuzeydoğusunda

dağlar arasında bir platoda yer alan yerleşmenin geniş bir alanı kapsadığı düşünülmektedir. Alanın batı, kuzey ve güneyinde ormanlarla kaplı sarp tepeler bulunmaktadır. Doğu'da ise içinden Çekerek nehrinin aktığı bir vadi bulunur. Bu vadi olasılıkla Amasya Makaslama Zonu içerisinde yer alan Sungurlu fayı tarafından biçimlenmiş olabilir. Halen geniş tarım topraklarına sahip olan Şapinuva Hitit çağında hem siyasi hem de ticari konumu nedeniyle önemli bir merkezdi ve kalabalık bir nüfusu barındırıyordu. Şapinuva hakkındaki ilk bilgiler Hattuşa arşivlerinde bulunmaktadır. Buradaki metinlerde Şapinuva'nın Hurri etkisinin yoğun olduğu bir merkez olduğu anlaşılmaktadır. Kent ordu komutanlığının ve sürekli askerin bulunduğu bir nitelikteydi. Ortaköy Hitit şehri, halen tamamına yakını tarım arazisi olarak kullanılan ve Gündoğdu Tepesi'nden itibaren doğuya doğru uzanan plato üzerinde, doğu-batı istikametinde hemen hemen 2,5 km güney-kuzey istikametinde 3 km'lik bir büyüklüğe sahiptir. Bu büyüklükte bir şehrin nüfusunun ne olacağı üzerinde konuşmak için öncelikle, idari, askeri, dini faaliyet alanlarının tespiti ve tetkiki ile sivil mimariye ayrılan payın tespiti gerekmektedir (Süel ve Süel, 1996).

Kentin bulunması 1980'li yılların sonundadır ve ilk arkeolojik kazıların başlaması 1990 yılına karşılık gelir. Bu tarihten günümüze değin yapılan kazılarda kentin iki ayrı bölgesinde (Ağılönü ve Tepelerarası) kazılar sürdürülmektedir ve birçok anıtsal yapı ortaya çıkarılmıştır (Şekil 3.22). Özellikle Tepelerarası bölgesinde ortaya çıkarılan anıtsal yapılar kentin görkemini ve önemini ortaya çıkarmaktadır. Bu alanda kentin en hâkim noktasında bulunan A yapısı planı, işlevsel ve estetik özellikleri ile kentin ihtişamını yansıtmaktadır. Şekil 3.23'de hava fotoğrafında görülen bu yapı yaklaşık 2.5 dönümlük bir alan üzerinde yerleşmiştir. Bu alanın güneydoğusunda bulunan ve 1994 yılı kazılarında ortaya çıkan yaklaşık 1.2 dönümlük alanı kaplayan B yapısı bulunmaktadır. Bu yapının taş temelleri üzerinde 1 metreyi aşan sıvalı kerpiç duvarlar kazılar sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Kerpiçler yüksek oranda yangın geçirmiş ve sarı, kırmızı ve yeşilimsi renkler almıştır. Ayrıca malzeme özellikleri de önemli bir değişim göstermiştir. Yapıda çok sayıda depolama amaçlı küp bulunmuştur. Bu bina A binası ile yön birliği taşımaktadır. Alandaki üçüncü kazı lokasyonu C yapısı olarak adlandırılan bölümdür ve A binasının 400 metre güneydoğusunda bulunmaktadır. Bu alanda ilk kazılar 1996 yılında başlamıştır. Alanda 2000 yılına ise D binası saptanmıştır. Tarımsal nedenlerle bu alanda önemli bir tahribat ile karşılaşılmıştır. Kazıların ilk başlangıcından günümüze değin bu bölgede yaygın kazılar yapılmış ve birçok önemli anıtsal yapı ortaya çıkarılmıştır. Özellikle bazı binaların doğal tahribe maruz kalmaması için üstü çatı türü konstrüksiyonlarla kapatılmıştır.

Alandaki ikinci çalışma mevki Ağılönü'dür. Burası 'A' binasının üzerinde yer aldığı platodan derin bir sel yarığı ile ayrılmaktadır. Üç tarafı yamaçla kaplı korumalı bir alandır. Doğu yamacın önünde yer alan içinden kara yolunun geçtiği bölümde killi katmanlar gözlenmektedir. Alanda yapılan arkeolojik sondaj çalışmaları sonucunda arazinin yer yer iki metreye kadar kil ile doldurulduğu ve düzgün bir alan elde edildiği anlaşılmıştır. Burası 28.000 m² genişliğinde bir alandır. Doğu-güney ve batı yönlerinde dik yamaçlarla çevrilidir. Alanın kuzey yönünde anıtsal bir yapının bu düzgün alana bakar bir konumda yer aldığı anlaşılmaktadır. Orta kısımda bir meydan bulunmaktadır. Kenarlarda ise çeşitli büyüklükte binalar yer almaktadır (Şekil 3.24). Burada kazı çalışmalarına doğu yamacının kenarından başlanılmış olup "Ağılönü 1" binası burada ve iyice kenarda kısmen ortaya çıkarılmıştır. Kapı girişinden başlayan ve önce kuzeydoğuya doğru ilerleyen ve daha sonra da 90˚'lik bir açı ile kuzeybatı istikametine dönen 2 m genişlikte taş döşeli bir yol bulunmaktadır (Süel ve Süel, 2002). Bu alanda 2005 sezonunda bölgenin kuzey ve kuzeybatısını kaplayan kısımda ilginç sonuçlar alınmış ve bu ilk sonuçlar bilim dünyasına tanıtılmıştır. Hitit mimarisinde bir ilk olan bu buluntu, iri çakıl taşları ile kireçtaşı esaslı kırma taşların yan yana ve üst üste dizilmesi ile oluşturulmuş bir mimarîdir. Tarla yüzeyinin hemen altında karşımıza çıkan bu alan basamaklar hâlinde bir görünüş vermektedir. Taş döşem olarak adlandırılan bu yapının 11 kattan oluştuğu anlaşılmıştır. Taş sıralarının arasında 10 cm. kalınlığında kil tabakalar bulunmaktadır. Bu basamakların mimarî ile mi birlikte oluşturulduğu, yoksa tarımsal faaliyetler sırasında dağılan taş sıraları sonucunda mı oluştuğu konusunda tam bir karar vermek için henüz erkendir. Bu taş döşemin kuzey yönü içbükey bir şevle âdeta bir hendek oluşturarak bitmektedir. Ancak hendeğin bir kenarı taş döşem iken, diğer kenarı moloz taştan bir duvarla sınırlanmış olup içinin muhtemelen yakındaki bir yangın yerinden getirilen döküntü ile doldurulduğu, taş döşemin bu yöndeki bir dağılma ihtimalinin ortadan kaldırılmaya çalışıldığı anlaşılmaktadır. Taş döşemin güney kenarında ise, 2 m yükseklikte, ön yüzünde iri blokların bulunduğu, arkasındaki boşluğunda moloz taşla doldurularak oluşturulduğu bir duvar karşımıza çıkmaktadır. Burada taş döşemin bu yöndeki dağılmasına karşı alınan bir tedbir yanında, iri bloklardan oluşmuş gösterişli bir duvarın varlığı da söz konusudur. Bu yapı Ağılönü bölgesinin en önemli mimarî yapısı olmalıdır. Yaklaşık 2500 m²'ye yakın bir alanı kaplayan bu mimarî yapı tarımın ağır tahribatına rağmen 11 sıra hâlinde günümüze değin ulaşabilmiştir. Döşemde kullanılan taşlar, özel kil harç kullanılarak ve her sıra arasında 10-15 cm'lik harç serilerek inşa edilmiştir. Bu taş döşemin kuzey sınırında, içi moloz doldurulmuş bir kanal mevcut iken, diğer üç yönünde kuvvetli taş yapılanmanın kullanıldığı bir istinat sistemi söz konusudur (Şekil 3.24). Milyonlarca adet özel olarak

hazırlanmış kırma taşın ve yine özel olarak hazırlanmış harcın kullanıldığı bu döşemin ne maksatla yapıldığına dair yorum gelecekte yapılacak çalışmalarla ortaya çıkarılabilecektir (Süel ve Süel, 2010).



Şekil 3.22: Şapinuva Hitit yerleşmesinin genel kent planının uydu görüntüsü üzerinden gösterimi.



Şekil 3.23: Tepelerarası mevkiinin iki ayrı bakış açısından hava fotoğrafı. Kazılmış alan A binasını, yakınındaki kapalı kısım B ve sırasıyla C ile D binaları görülmektedir (Şapinuva Kazı Ekibinden alınmıştır).



Şekil 3.24: Ağılönü mevkiinin iki ayrı bakış açısından hava fotoğrafı. Alanın üst kısmında taş döşem, bunun güneyinde ise kazılmış alanlar görülmektedir. Bu alanların doğu kısım ile bunun güneyindeki kısımlar kapatılmıştır (Şapinuva Kazı Ekibinden alınmıştır).

Şapinuva'da 1990 yılından beri yapılan kazılarda önemli tablet arşivleri bulunmuştur. Bu arşiv Hattuşa'dan sonra ikinci büyük arşivdir. Bu arşivde Hititçe, Hurrice, Hattice ve Akadça ile yazılmış idari, dini, siyasi ve fal gibi gündelik olayları bile içeren çok konu hakkında bilgi verilmektedir. Bu durum bu arşivlerin bir kraliyet arşivi olduğunu göstermektedir. Böylece Hitit kralı bir dönem burada oturmuş ve ülkeyi buradan yönetmiş olmalıdır. Bu arşivlerin çoğunluğu MÖ 14. yüzyıla ilişkindir. Anadolu tarihinde büyük bir yere sahip olan Hititler MÖ 2. binyılda ilk siyasi birliği kuran bir uygarlıktır (Süel ve Süel, 2011). Ancak bu derece önemli bir uygarlık olan ve Anadolu'nun büyük bir kısmı ile Mezopotamya'yı denetim altında tutan Hitit uygarlığından günümüze ulaşan buluntular çok fazla değildir. Bu nedenle Şapinuva kazıları Hitit tarihinin ortaya çıkarılması açısından çok önemlidir. Hitit devletine bir dönem başkentlik yapan Şapinuva'da uygun alanların hızlı biçimde kazılması önemlidir. Böylece yapılacak kazılar Şapinuva ve çevresi ile ilgili çok önemli veriler sağlayacaktır.

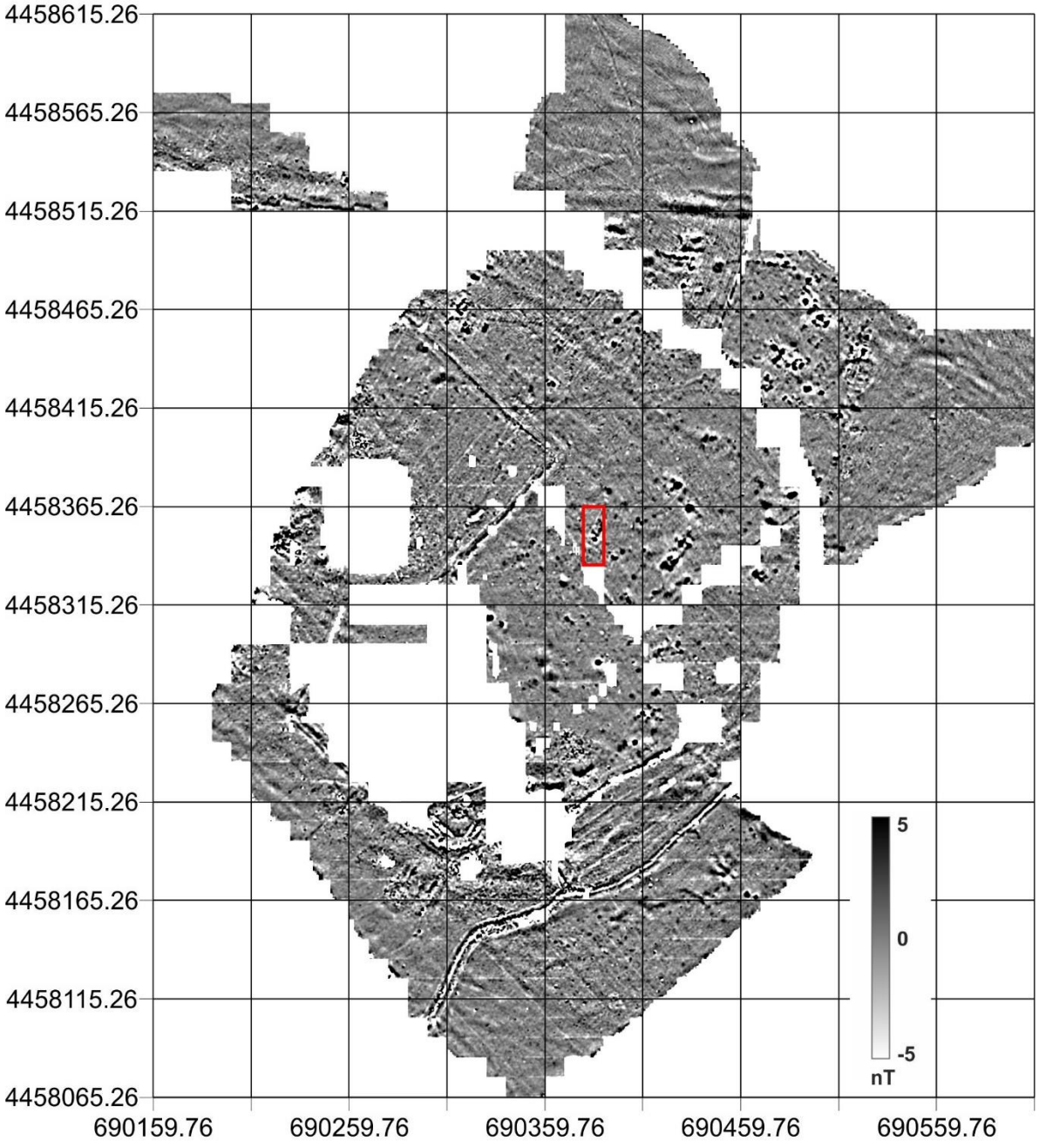
Bu tez çalışması kapsamında tümleşik jeofizik çalışmalar Şekil 3.22'de verilen genel kent planı görüntüsünde H binası olarak gösterilen alanda kazı öncesi yapılmıştır. Alanda kazı çalışmaları tümleşik jeofizik verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması sonrasında başlamış ve halen kazı çalışmalarına devam edilmektedir.

4. BULGULAR

4.1. ŞAPİNUVA ANTİK KENTİNDE ÖNCEKİ JEOFİZİK ÇALIŞMALAR DOĞRULTUSUNDA ÇALIŞMA ALANININ BELİRLENMESİ

Çorum ili, Ortaköy ilçesinin yaklaşık 2 km güneybatısında bulunan Şapinuva Hitit yerleşimi çok geniş bir alana yayılmaktadır. Halen kazılar Ağılönü ve Tepelerarası mevkilerinde sürdürülmektedir. Bu iki alan arasındaki uzaklık yaklaşık 1 km'dir. Bunların dışında alandaki yerleşimin dağılımı hakkında ayrıntılı bir bilgi bulunmamaktadır. Özellikle alanın tarımsal etkiler altında olması nedeniyle de yüzeyden görünebilen arkeolojik izler hemen hemen yoktur. Alanda yapılmış olan hava fotoğrafı çekimlerinde bazı izler görülmekle birlikte bunların arkeoloji ile ilişkisi ortaya konmuş durumda değildir. Alanda kazılar 1990 yılında kurtarma kazıları olarak başlamış olup, 1993 yılından sonra Bakanlar Kurulu kararı ile sürekli kazı olarak devam etmiş ve günümüze değin birçok alan kazılmıştır. Ortaya çıkartılan yapıların birçoğunun üzeri çelik yapılarla örtülmüştür. Kazılar sırasında birçok önemli anıtsal yapı ortaya çıkmış ve Şapinuva'nın Hitit çağındaki önemini belirginleşmiştir. Ancak yerleşmenin çok geniş bir alana yayılmış olması nedeniyle bu alanın genel karakteri hakkında yeterli bir bilgi edinilememektedir. Bu kapsamda alanda geniş-ölçekli manyetik gradyometre çalışmaları başlatılmış ve 2012 ile 2018 yılları arasında yaklaşık 10.7 ha alan araştırılmıştır (Şekil 4.1). Çalışmalar öncesinde ölçülmesi planlanan alanlar bir GPS yardımıyla 10 x 10 m boyutlarında gridlere ayrılmış ve manyetik gradyometre çalışmaları bu gridler üzerinde yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda elde edilen manyetik görüntülerle alanda bulunan gömülü arkeolojik yapıların planı ve mimari özellikleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tümleşik jeofizik araştırmalar, Tepelerarası mevkiinde manyetik gradyometre sonuçlarına göre belirlenen 10x30 m boyutlarındaki bir alanda yapılmıştır. Çalışmanın yapıldığı lokasyon manyetik görüntü üzerinde gösterimi Şekil 4.1'de kırmızı renkli dikdörtgenle işaretlenmiştir.



Şekil 4.1: Şapinuva Tepelerarası mevkii manyetik gradyometre görüntüsü ve tez kapsamında tümleşik jeofizik çalışmanın yapıldığı alanın gösterimi**.**

4.2. TÜMLEŞİK JEOFİZİK VERİLERİNİN TOPLANMASI

Şapinuva arkeolojik alanı Tepelerarası mevkiinde belirlenen 10x30 m boyutlarındaki alanda tümleşik jeofizik çalışması öncesinde gridleme çalışması yapılmıştır. Tümleşik jeofizik çalışmalarının veri toplama parametreleri Tablo 4.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Gridleme çalışmaları Trimble firmasının ürettiği R4 model bir GPS cihazı ile CORS-TR sistemi

kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2). 10x10 m boyutlarında oluşturulan bu gridlerin her bir köşesine tahta kazıklar çakılmış ve koordinatlarındaki ölçümleri alınmıştır. Tümleşik jeofizik verileri bu gridler üzerinden toplanmıştır. Alanda ilk uygulanan jeofizik yöntem manyetik gradyometre yöntemidir. Bu yöntem ile veriler Geoscan firmasının ürettiği FM-256 tipi bir fluxgate gradyometreleri kullanılarak dual sistemde toplanmıştır (Şekil 4.3). Manyetik yöntem sonrası alanda uygulanan ikinci yöntem yer radarı (jeoradar) yöntemidir. Yer radarı çalışmaları, GSSI firmasının ürettiği SIR-3000 cihazı ve merkez frekansı 400 MHz olan antenle yapılmıştır (Şekil 4.4). ERT çalışmaları ise AGI firmasının ürettiği SuperSting R1 model cihaz, çok kanallı kablolar ve çelik elektrotlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.2: Jeofizik çalışma alanlarının gridlenmesi çalışmasına ait bazı saha fotoğrafları.



Şekil 4.3: Şapinuva tümleşik jeofizik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen manyetik gradyometre çalışmasına ait bazı saha fotoğrafları.



Şekil 4.4: Şapinuva tümleşik jeofizik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen yer radarı çalışmasına ait bazı saha fotoğrafları.



Şekil 4.5: Şapinuva tümleşik jeofizik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen ERT çalışmasına ait bazı saha fotoğrafları.

Tablo 4.1: Tümleşik jeofizik çalışmalarının veri toplama parametreleri.

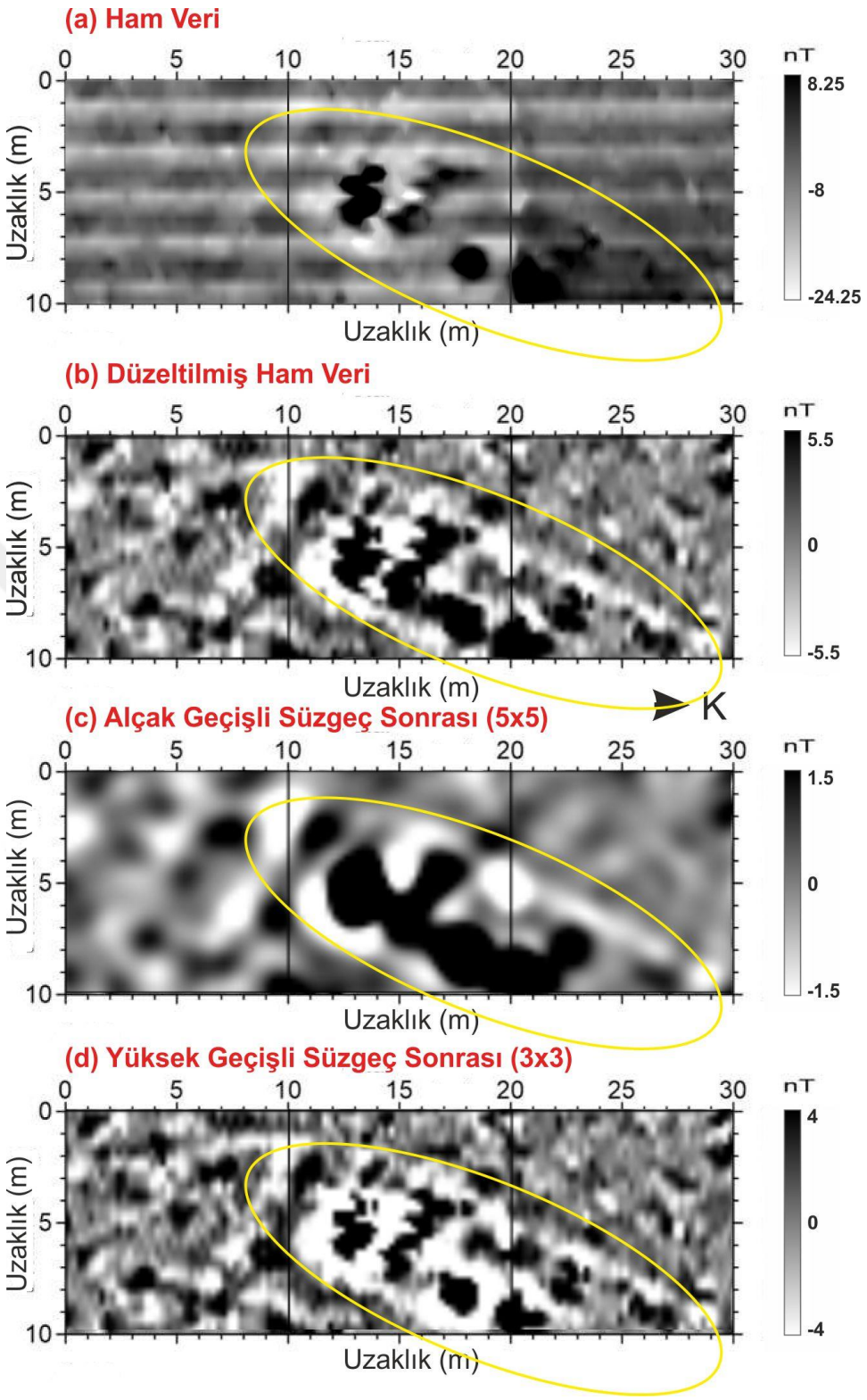
Yöntem	Cihaz	Ölçüm Tekniği	Örnekleme Aralığı
Manyetik Gradyometre	Geoscan FM256 Fluxgate gradiometer	Dual sistem ile 10 x 10 m gridler üzerinden paralel hatlar boyunca ölçümler alınmıştır.	Örnekleme aralığı: 0,25 m Hat arası Mesafe: 0,5 m
Yer Radarı	GSSI SIR-3000	Merkez frekansı 400 MHz olan korumalı anten ve araba yardımıyla ölçümler paralel hatlar boyunca alınmıştır.	Örnekleme aralığı: 0,05 m Hat arası Mesafe: 0,5 m Zaman Penceresi: 80 ns Düşey Örnekleme: 512
ERT	AGI Supersting R1	Çok kanallı kablo yardımıyla uzunluğu 30 m olan birbirine paralel 11 hatta dipol-dipol elektrot dizlimi kullanılarak ölçümler alınmıştır.	Elektrot aralığı: 1 m Hat arası Mesafe: 1 m
GPS	Trimble R4		

4.3. TÜMLEŞİK JEOFİZİK VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YORUMLANMASI

4.3.1. Manyetik Gradyometre Verilerinin Değerlendirilmesi ve Yorumlanması

Tümleşik jeofizik çalışmalar kapsamında yapılan manyetik gradyometre çalışmaları 10 x 10 m gridlenmiş 30 x 10 m boyutlarındaki bir alanda gerçekleştirilmiştir. Manyetik ölçümler örnekleme aralığı 0,25 m, hatlar arası mesafe 0,5 m olmak üzere 0,25 x 0,5 m ölçüm sisteminde toplanmıştır. Paralel hatlar şeklinde toplanan manyetik gradyometre verisi düzeltme, sinyal ve görüntü işleme aşamaları Geoplot yazılımı (Geoscan Research) ile değerlendirilmiştir (Şekil 4.6). Elde edilen ham arazi verileri üzerinden ölçüm sırasındaki yürüme hataları için hat düzeltme işlemi ve grid (baz) düzeltmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca interpole (ara değer) tekniği kullanılarak 0.5x0,25 m boyutlarında olan manyetik görüntülerdeki pikseller 0,25x0,25 m boyutlarına getirilmiş ve böylece veri toplama parametrelerinden kaynaklı anomalilerdeki uzamalar giderilmiştir. Düzeltilmiş ham veri görüntüsü üzerine alçak ve yüksek geçişli süzgeçleme işlemleri yapılmıştır. Yüzey etkileri ile gürültüleri azaltmak ve yapı izlerini daha belirgin hale getirmek için veriler 5x5 işleçli alçak-geçişli süzgeçlemeden geçirilmiştir. Yüzeye yakın yapı izlerini ortaya çıkartabilmek için ise 3x3 işleçli yüksek-geçişli süzgeçleme kullanılmıştır (Şekil 4.6). Manyetik gradyometre sonuçlarında, eski yıllarda alanın genelinde yapılan çalışmalarla benzer uzanımların olduğu izler belirlenmiştir. Özellikle alanın orta kısmında belirgin ve düzgün mimari dağılımların olduğu görülmektedir. Bu yapı izlerinde yanmanın olduğunu ortaya koyan yüksek manyetik izler mevcuttur.

Ham manyetik gradyometre verileri kendi içinde değerlendirildiğinde ve yorumlandığında, alanın bu kısmının büyük öneme sahip olabileceği ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.6b'de düzeltilmiş ve grid birleştirmesi sonucu oluşturulan manyetik gradyometre görüntüsü verilmektedir. Görüntüde sarı elips ile çevrelenen kısımda birbirine dik doğrultuda uzanan büyük yapıların olduğu görülmektedir. Bu yapıların yüksek manyetik değerlere sahip olması olasılıkla yangın geçirmiş olduklarını ortaya koymaktadır. Düzeltilmiş ham veri görüntüsü üzerine 5x5 işleçli alçak geçiş filtresinden geçirildikten sonraki görüntüsü Şekil 4.6c'de verilmektedir. Sarı elips ile çevrilen kısımdaki beyaz olarak görülen negatif manyetik izler, kireçtaşı ve benzeri manyetik özellikler taşımayan kayaçlardan yapılmış duvarları açıkça göstermektedir. Bunların içini ve etrafını kaplayan yüksek pozitif manyetik izlerde olasılıkla yangına uğramış kerpiç materyalleri göstermektedir. Buradaki yapının büyüklüğünün yanı sıra önemli bir yangına da uğradığını göstermektedir. Aynı alanın yüzeye çok yakın olan değişimlerini daha iyi ortaya koyabilmek amacıyla uygulanan 5x5 işleçli yüksek geçiş filtrelemesi sonucu elde edilen görüntüsü de Şekil 4.6d'de verilmektedir. Bu görüntüde özellikle negatif izler çok belirgin görülmektedir ve negatif izlerin buradaki yapıların duvarlarını açık biçimde gösterdiği görülmektedir. İzler genel anlamda bu görüntüde yaygın biçimde ortaya çıktığından, bu bölgedeki yapıların yüzeye çok yakın olarak gömülü durumda bulundukları yorumlanabilir.



Şekil 4.6: Araştırma alanına ait manyetik gradyometre görüntülerinin düzeltme ve değerlendirme aşamaları.

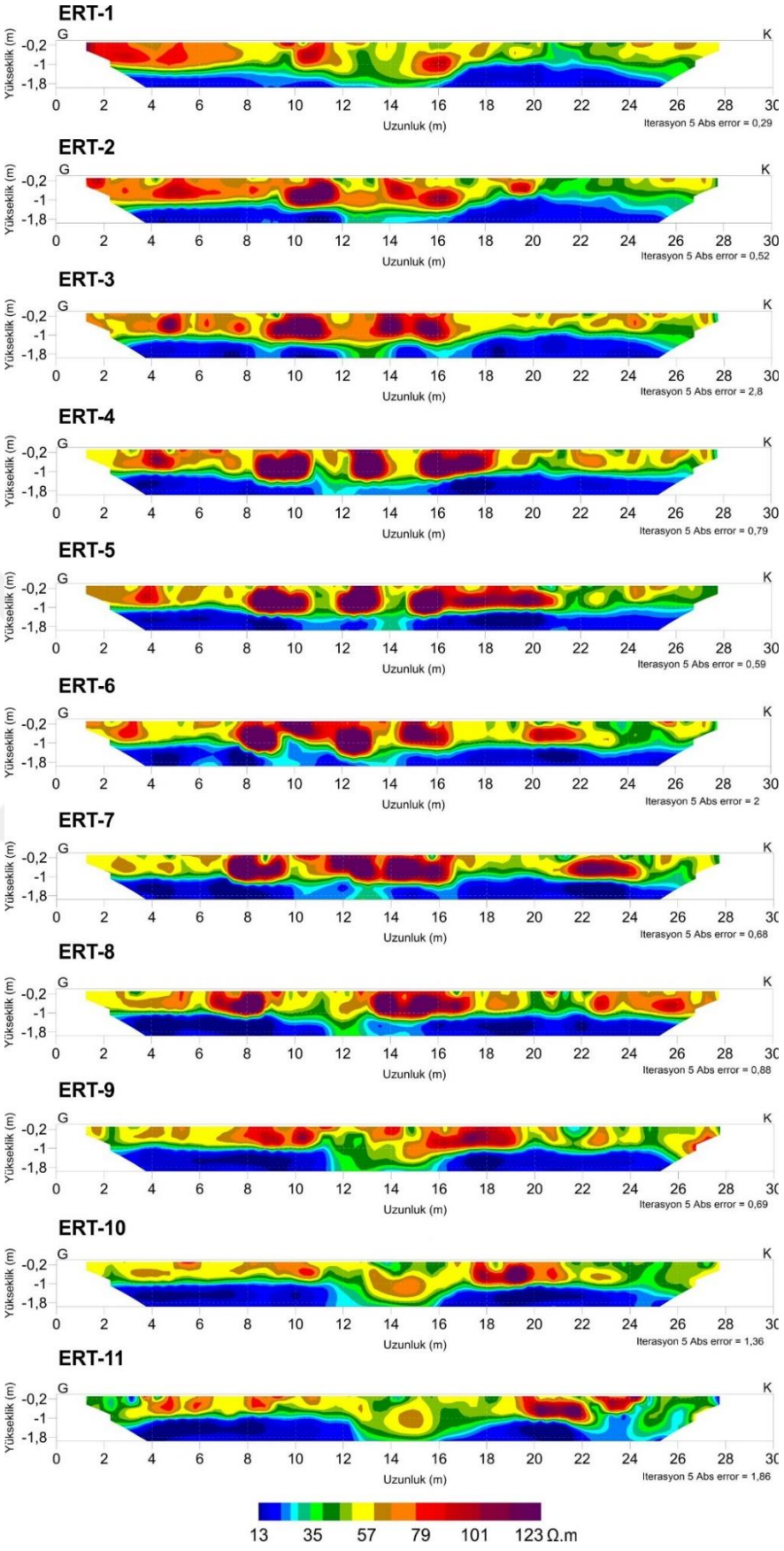
4.3.2. Elektrik Resistivite Tomografi (ERT) Verilerinin Değerlendirilmesi ve Yorumlanması

Tümleşik jeofizik çalışmalar kapsamında aynı alanda (10x30 m boyutlarındaki alanda) ERT çalışması yapılmıştır. Yapılan ERT çalışmalarının iki boyutlu yapı-derinlik modelleri ve bu modellerden elde edilen değişik derinliklere ilişkin kesme görüntülerinin yorumu bu bölüm içinde verilmektedir. ERT çalışmaları, hatlar arası mesafe 1 m olacak biçimde birbirlerine paralel 11 hat üzerinde dipol-dipol elektrot dizilimi kullanarak çok kanallı ERT verisi şeklinde toplanmıştır. Toplanan verilerin değerlendirilmesi ise bloklu (robust) ters-çözümle gerçekleştirilmiş ve iki boyutlu yapı-derinlik modelleri elde edilmiştir. İki-boyutlu ters-çözüm Res2Dinv (Loke ve Barker, 1996a) yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. İki-boyutlu kesitlerden derinlik kesme görüntüleri oluşturmak için Surfer (Golden Software) yazılımı kullanılmıştır.

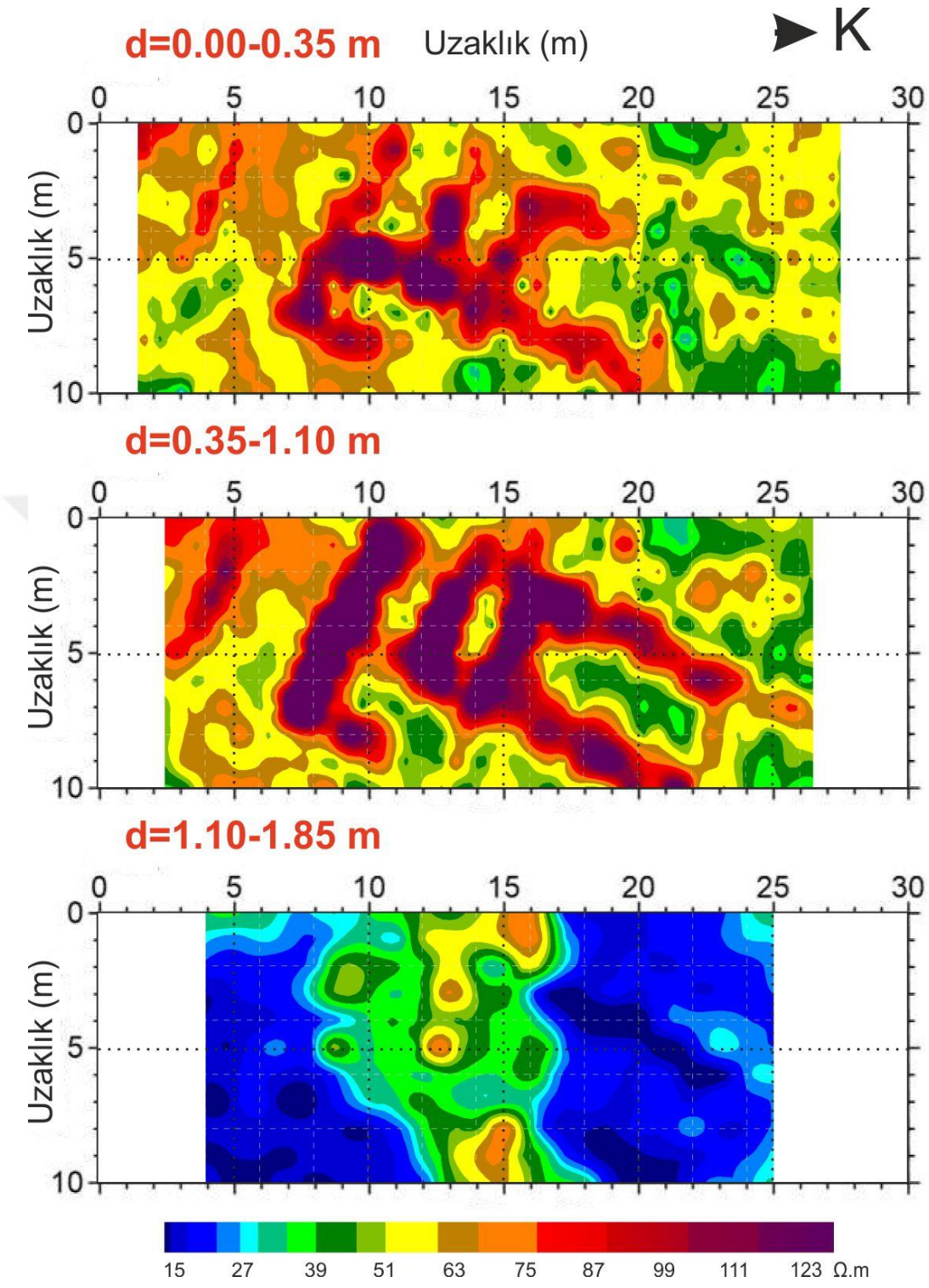
Manyetik gradyometre sonuçlarında önemli bir yapı kalıntısının görüldüğü bu alanda yapılan ERT çalışmaları kapsamında oluşturulan iki boyutlu modeller Şekil 4.7'de verilmektedir. Modellerde genel anlamda yüzeye yakın arkeolojik yapıların olduğunu göstermektedir. Özellikle orta kısımlarda görülen 100 Ω.m'nin üzerindeki koyu kırmızı renkli kısımların yüzeye çok yakın olan duvarları gösterdiği düşünülmektedir. Bu yapılar genelde 1 m derinlik içinde sonlanmaktadır ve dağılımları itibariyle yüzeye çok yakın olduklarından olasılıkla tahrip olmuşlardır. Özellikle bunların taban kısımlarındaki bazı değişimler bu yapıların olası bir depremle tahrip olmuş olabileceğini düşündürecek düşey farklılıkları göstermektedir. Bu farklılıklar düşeydeki bir yer değiştirme ile oluşmuş olabilir. Ayrıca doğu kısımda 12 ile 16 metre arasında orta resistiviteli kısımlar daha derine uzanmaktadır ve bununda depremle ortaya çıkmış bir yer değiştirme olabileceği düşünülmektedir. Yapıların altında çok düşük resistiviteli ortamlarında alanın anatoprağı ya da anakayası olduğu elektrik resistivite dağılımından görülmektedir. Genelde tekdüze olan bu ortam kil içeriği yüksek bir birimin varlığını göstermektedir.

İki boyutlu model sonuçlarından elde edilen derinlik kesmelerinin görüntüleri ise Şekil 4.8'de verilmektedir. İlk derinlik kesmesi 0,00-0,35 m arasını göstermektedir ve arkeolojik yapının önemli bir kısmı ortaya çıkmış durumdadır. Genel mimari karakteri açıkça görülebilen bu yapının yüzeye son derece yakın olması nedeniyle tarımsal etkilerle önemli oranda tahrip olmuş olabileceği düşünülmektedir. İkinci derinlik kesmesi olan 0,35-1,10 m arasında yapı tüm hatları ile belirgin olarak ortaya çıkmıştır. KD-GB yönlü üç büyük duvar ile ayrılan iki mekânın varlığı

açıkça görülmektedir. Büyük mekân ise güneydoğuya doğru iki paralel duvar arasında bulunmaktadır. Genel olarak 17-18 m uzunluğunda ve 8 ile 10 metre genişliğindeki yapı ilginç bir özelliğe sahiptir. Böylece bu yapının yaklaşık olarak yüzeyden başlayarak 1 metre derinliğe kadar uzandığı ortaya çıkmaktadır. Derinliklerdeki farklılıkların depremle oluşmuş bir düşey yer değiştirmeyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Son seviye olan 1,10-1,65 m arasında ise sadece alanın orta kısmında bazı temel izleri görülmektedir ve dağılımın bu şekilde olması bir deformasyona bağlı bir çökme ile yapıların bu kısımda derine uzandığı görüşünü ortaya koymaktadır. Sonuçta bu alanda yapılacak kazılar bu yapının genel karakterini tüm açıklığı ile ortaya koyabilecektir. Burada ortaya çıkan yapı manyetikteki yapı ile bire bir uyumludur ve yüksek resistiviteli duvarlar manyetikte negatif manyetik anomalilere karşılık gelmektedir. Bunların ortasındaki yüksek manyetik anomalilerin varlığı ise bu yapının kazılması sırasında önemli yanmış yapı grupları ile karşılaşılabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7: Araştırma alanına ait ERT çalışmalarına ait 2-boyutlu ERT ters-çözüm modelleri.



Şekil 4.8: Araştırma alanına ait ERT çalışmalarına ait 2-boyutlu ERT ters-çözüm modellerinden oluşturulan derinlik kesme görüntüleri.

4.3.3. Yer Radarı Verilerinin Değerlendirilmesi ve Yorumlanması

Tümleşik jeofizik çalışmalar kapsamında yapılan yer radarı çalışmaları 10 x 10 m gridlenmiş 30 x 10 m boyutlarındaki bir alanda gerçekleştirilmiştir. Yer radarı verileri örnekleme aralığı 0,05 m, hatlar arası mesafe 0,5 m olmak üzere 0,05 x 0,5 m ölçüm sisteminde toplanmıştır. Çalışma öncesi alan yüzeyindeki taşlar kaldırılmış ve alan ölçüme elverişli hale getirilmiştir. Yer radarı verileri, manyetik gradyometre veriyle aynı hatlarda toplanmıştır. Yer radarı ölümleri 30 m uzunluğunda 20 hat üzerinden alınmıştır.

Merkez frekansı 400 MHz olan antenle toplanan yer radarı verileri barındırdıkları temel etkiler ve gürültülerden arındırılmak ve daha görünebilir sonuçlar elde etmek amacıyla değişik sinyal analiz işlemlerine tabi tutulmuştur. Verilerin değerlendirilmesi GPR-Slice yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme sırasında, hava dalgasının etkisini gidermek ve radar izlerindeki zamansal kaymaları düzeltmek için öncelikle "StaticCorrection" işlemi yapılmıştır. Bu işlemi sırasıyla, "Background Removal" ve derindeki anomalilerin etkilerini arttırmak için "AGC" işlemleri izlemiştir. Dış etkenlerin radargramlar üzerindeki etkileri ile istenmeyen düşük ve yüksek frekans etkilerinin azaltmak için "BandpassFilter" ve "NotchFilter" gibi sinyal analiz teknikleri de kullanılmıştır. Ardından veri yuvarlatması işlemi olan "Boxcar Filter" işlemi gerçekleştirilmiş ve son olarak migrasyon işlemiyle radargramların değerlendirilme aşamaları tamamlanmıştır. Şekil 4.9'da örnek bir radargram üzerinden verilen değerlendirme aşamaları alandan elde edilen 20 radargram için de uygulanmıştır. Yapılan hiperbol hız analizi sonucu ve ortamın zemin özellikleri dikkate alarak ortamın hız değeri 0,096 m/ns olarak kabul edilmiştir. Çalışma kapsamında 20 hat üzerinden elde edilen radargramların yukarıdaki aşamalardan geçirilmiş ve değerlendirilmiş radargramlara ulaşılmıştır. Değerlendirilmiş radargramlarda arkeolojik kültür tabakasının genelde 1 m bazı yerlerde 1,2 m derinliğe kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise ana toprak seviyesi olduğu belirlenmiştir.

Değerlendirilmiş radargramların "inverse distance" ara değer bulma tekniği kullanarak birleştirilmesiyle farklı derinlik seviyelerine ait kesme görüntüleri oluşturulmuştur. Bu ara değer bulma tekniğinde kullanılan formül aşağıda verilmiştir.

$$Yaklaşık\ Değer = w_1 * z_1 + w_2 * z_2 + \cdots + w_n * z_n \qquad (4.1)$$

Burada; $w_i = 1/h^a$,

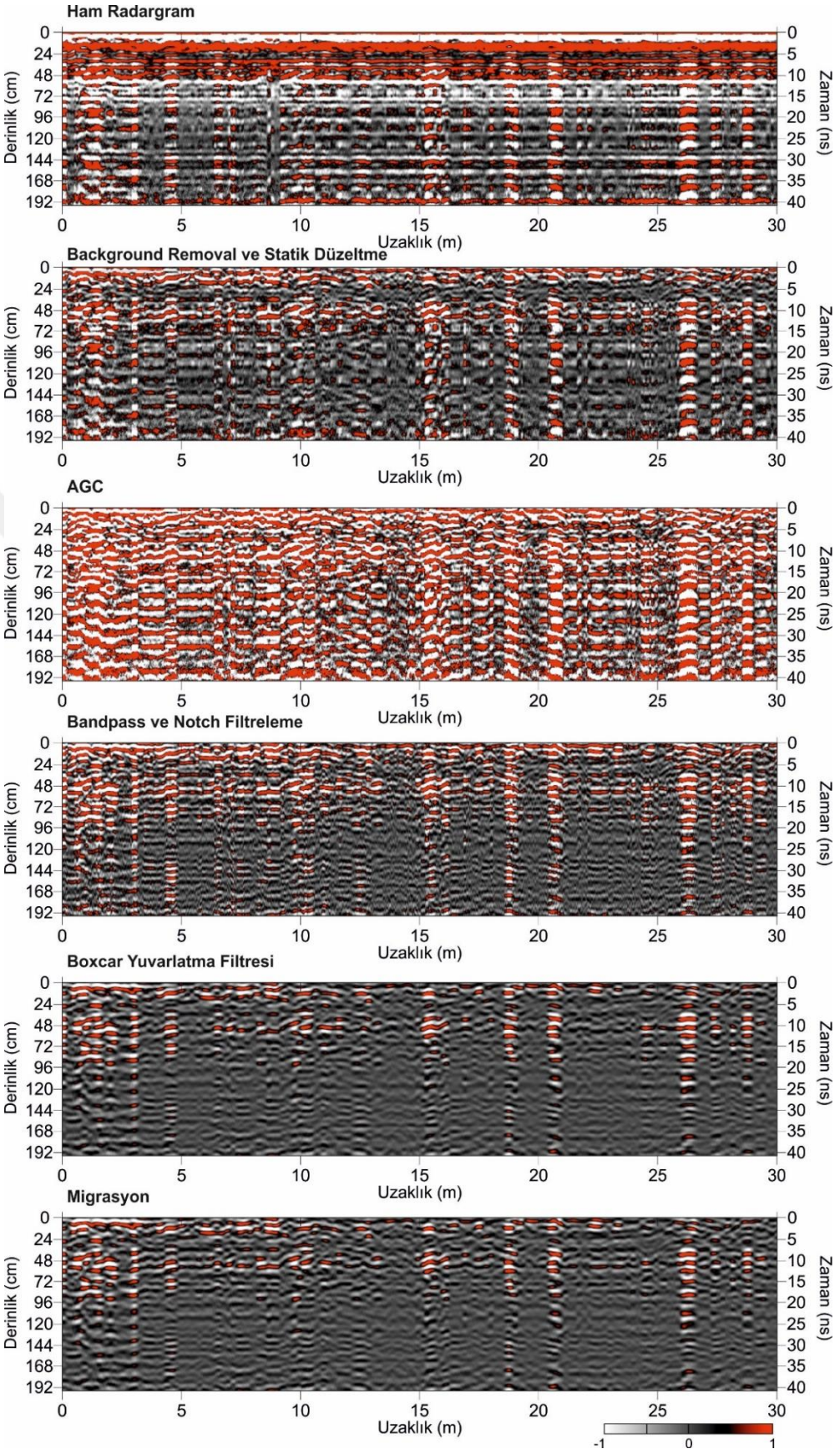
h= Yakındaki nokta ile grid üzerindeki nokta arasındaki tahmini mesafe

a= yumuşatma faktörü

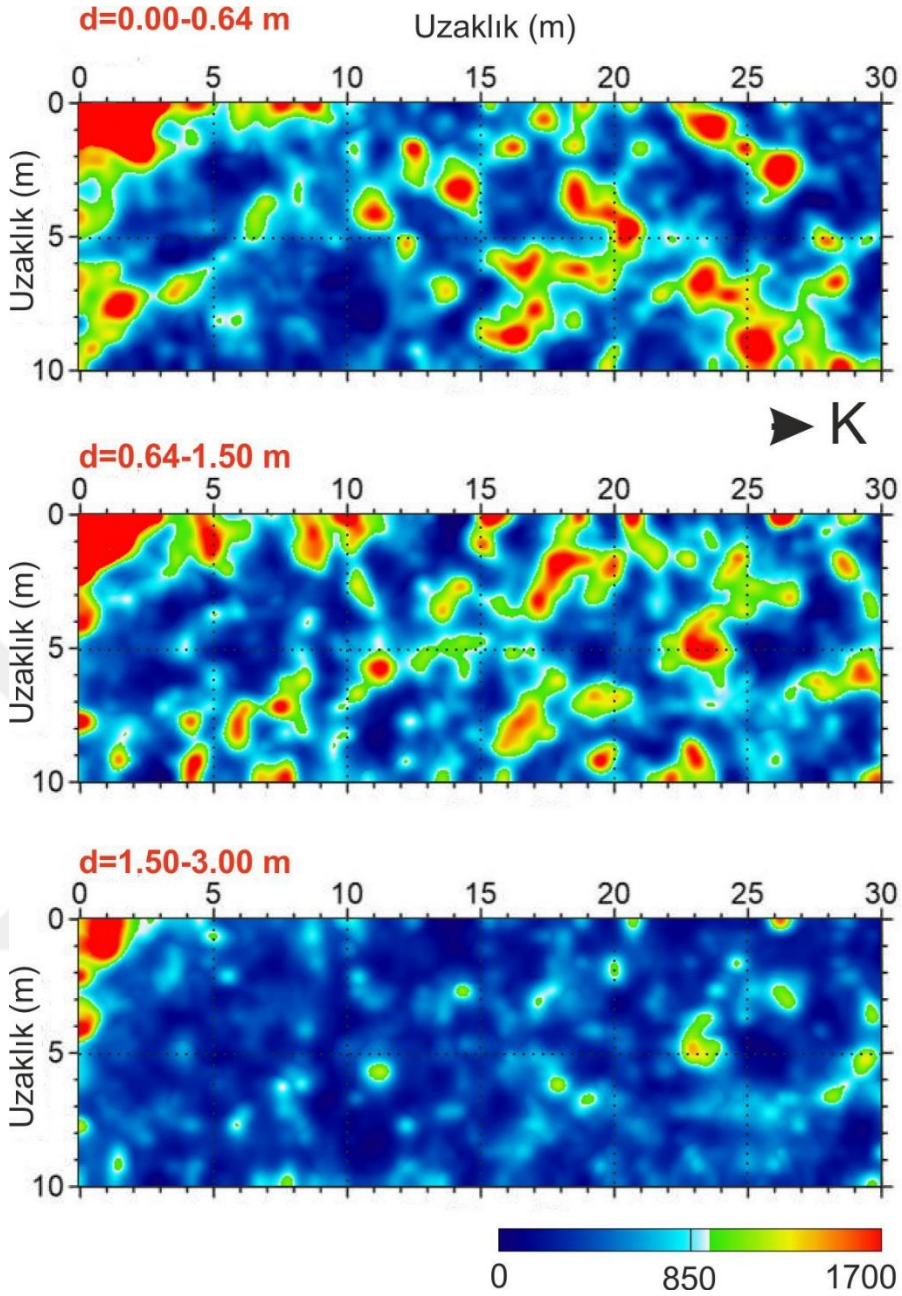
z= interpolasyon noktasındaki radar yansıma gücü.

Oluşturulan derinlik kesme görüntüleriyle yeraltının yaklaşık 3 m derinliğe kadar radar izlerin arkeolojik olarak yorumlanabilmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan ilk derinlik kesmesi 0-0,64 m arasında yeraltındaki yüksek yansıma genliklerini göstermektedir. Şekilde yeşil, kırmızı ve sarı arasında verilen renkler ve tonlarda görülen orta ve yüksek radar yansımaları olası yeraltı arkeolojik yapı dağılımlarını göstermektedir. Genel olarak bakıldığında tüm izler KB-GD ve KD-GB yönlü uzanım içindedir ve manyetik ile ERT sonuçlarıyla uyumludur. Bu derinlik seviyesinde arkeolojik yapı dağılımlarının bulunduğunu ortaya koyan izler vardır Alanda arkeolojik yapılarla benzer yönde tarımsal faaliyet yapıldığından dolayı, arkeolojik konteksin zarar gördüğü ve bu durumun yer radarı sonuçlarını da olumsuz etkilediği görülmüştür. Görüntüde düzgün izlerle görülen kesilmelerin ve dağılmaların tarımsal nedenlerle ortaya çıkan tahribat izleri olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.10). Alanın GB köşesinde görülen ve tüm derinlik kesmelerinde devam eden iz iki tarla arasındaki sınırı vermektedir. Ancak bu iz aynı zamanda bir arkeolojik yapıyla da ilişkili olabilir. Bir sonraki derinlik kesme görüntüsü 0,64-1,50 m aralığına aittir. Bu kesmede yüksek yansıma genlikleri devam etmektedir. Benzer şekilde izlerde KD-GB ile KB-GD yönlü uzanımlar hakimdir. Ancak bu seviyede izler daha karmaşık hal almıştır. Bu karmaşık durum, daha önceki kazılarda da görüldüğü gibi, bir depreme bağlı bir deformasyon etkiyle de olmuş olabilir. Böylece olası depremlerle ortaya çıkan düşey yer değiştirmeler nedeniyle yapılar farklı derinlikte gömülü olabilir. Üçüncü kesme derinliği olan 1.50-3,0 m görüntüsünde yüksek genlikli izler büyük oranda ortadan kalmıştır ve ana toprak seviyesine inilmiştir. Devam eden bazı izlerin ise deformasyona bağlı gelişen düşey yer değiştirmeyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu seviye arkeolojik tabakadan çıkıldığını göstermesi bakımından önemlidir (Şekil 4.10).

Alanda yapılan yer radarı çalışmalarından elde edilen derinlik kesme görüntüleri, alanda arkeolojik yapıların varlığını ortaya çıkarmıştır. Özellikle bazı kısımlarda kentin genel mimari yönelimiyle uyumlu izler tespit edilmiştir. Derinlik kesme görüntülerinde olası aynı arkeolojik yapıya ilişkin izlerinin farklı seviyelerde ortaya çıkmasının, depremler sonucu oluşan düşey yönlü deformasyona bağlı oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 4.9: Yer radarı çalışmalarıyla elde edilen radargramların değerlendirme aşamaları.



Şekil 4.10: Yer radarı çalışmalarına ait derinlik kesme görüntüleri.

4.4. ARKEOLOJİK KAZI ÇALIŞMALARI

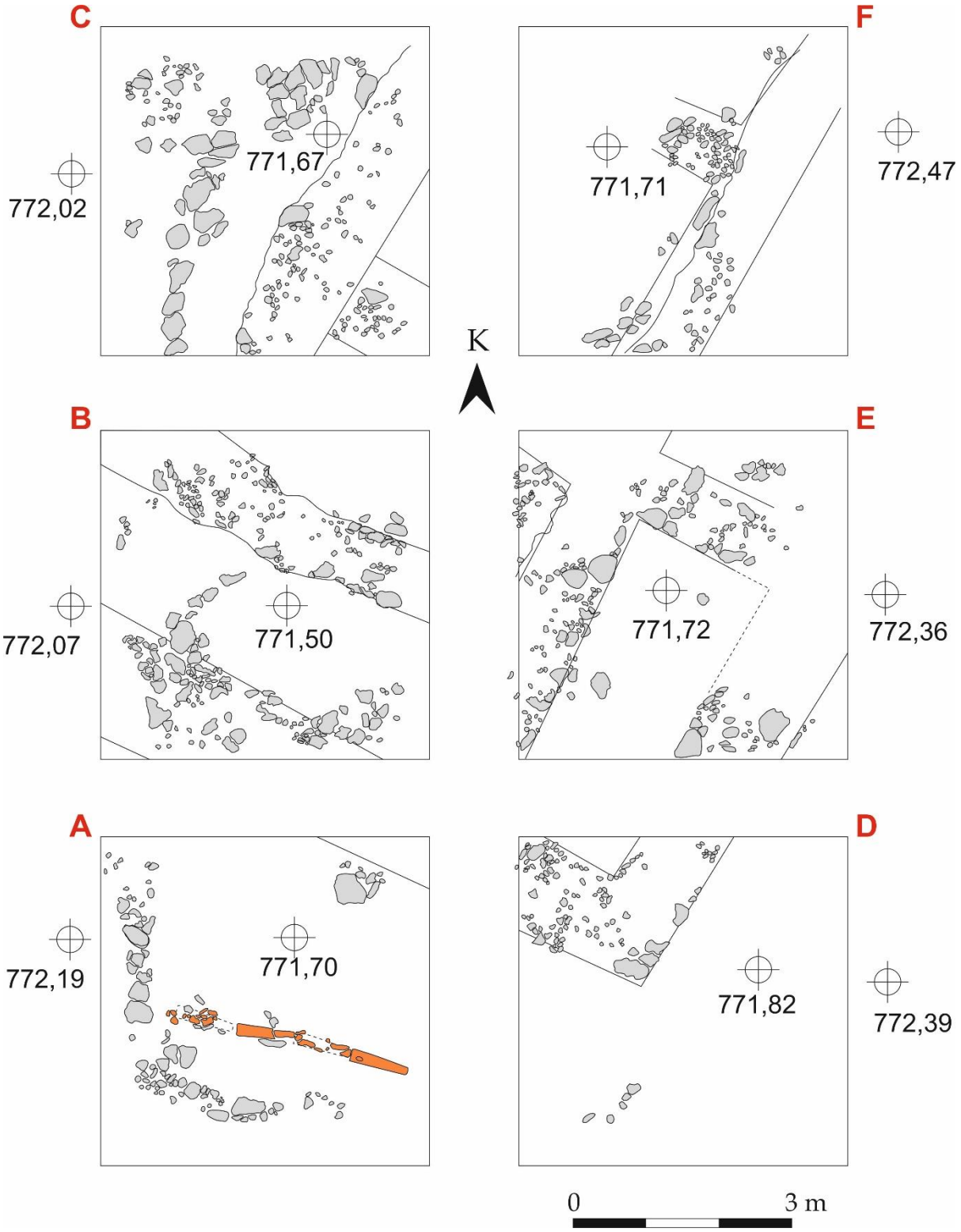
Tümleşik jeofizik verilerin toplanması ardından 2018 yılı kazı döneminde Ortaköy-Şapinuva Kazı Başkanlığı tarafından alanda arkeologlar tarafından bir arkeolojik kazı çalışması başlatılmıştır. Tümleşik jeofizik çalışmaların yapıldığı 10x30 m boyutlarındaki alan öncelikle 5x5 m boyutlarında 12 bölgeye ayrılmıştır. Bunlardan 6 açmada eşzamanlı olarak arkeolojik kazı ve belgeleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 70 cm derinliğe kadar kazılar sonrasında alandan elde edilen fotoğraflar Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11: 2018 yılı kazı çalışmaları kapsamında açılan 6 açmanın son görüntüleri.

Kazı çalışmalarıyla eşzamanlı olarak yapılan belgeleme kapsamında kazılarda ortaya çıkan her bir mimari parçanın teknik çizimleri kazının uzman ekiplerince yapılmıştır. Elde edilen çizim görüntü Şekil 4.12'de verilmiştir. Ayrıca açmaların kazı başlangıç kot seviyesi ile bitiş seviye değerleri çizim üzerinde verilmiştir. Kazı çalışmaları sonrasında ortaya çıkartılan bu yapı grubuna "H Binası" adı verilmiştir.

Jeofizik sonuçların daha kolay karşılaştırılması için açmalara; A, B, C, D, E, F isim verilmiş ve verilen isimler şekil üzerinde kırmızıyla gösterilmiştir. Kazılarda inilen derinlik seviyeleri her açmada farklılık göstermektedir. Buna göre; A açmasında 49 cm, B açmasında 57 cm, C açmasında 35 cm, D açmasında 57 cm, E açmasında 64 cm ve F açmasında 76 cm derinliğe kadar kazı gerçekleştirilmiştir. Bu seviyeler yapıların ortaya çıktığı üst kotlarıyla ilişkilidir .



Şekil 4.12: 2018 yılı kazı çalışmaları sırasında ortaya çıkartılan mimari parçaların teknik çizimi (Şapinuva Kazı Ekibi tarafından yapılmıştır).

Kazılar sonrasında dikdörtgen bir dağılım gösteren bir yapı ortaya çıkartılmıştır. Yapı duvarları genelde irili ufaklı kaba örgülü duvar şeklindedir. Bazı kısımlarda yoğun bir şekilde yanmış malzemeye ulaşılmıştır. A açmasında deforme olmuş künk şeklinde bir su borusu ortaya çıkartılmıştır. Yapıların ortaya çıkartıldığı derinlik seviyesinin açmalar bazında farklılık göstermesi dikkat çekicidir. Bu durum deprem etkisiyle yapılarda ortaya çıkabilecek düşey yönlü oluşan deformasyonla açıklanabilinir. Deprem izinin yapıda yarattığı deformasyon etkisi çalışma alanının yakınındaki G Binası olarak adlandırılan yapıda belirgin olarak görülmektedir (Şekil 3.21). H Binasındaki arkeolojik kazı çalışmaları tamamlandığında bu konuda daha net sonuçlara ulaşılacaktır. Ayrıca kamulaştırma öncesi yoğun tarım faaliyetleri nedeniyle alandaki gömülü yapıların birçoğu tahribata maruz kalmıştır.

4.5. YER RADARI VERİLERİNİN YORUMUNUN GELİŞTİRİLMESİ AMACIYLA TÜMLEŞİK JEOFİZİK VE ARKEOLOJİK KAZI SONUÇLARININ BİRLİKTE YORUMLANMASI

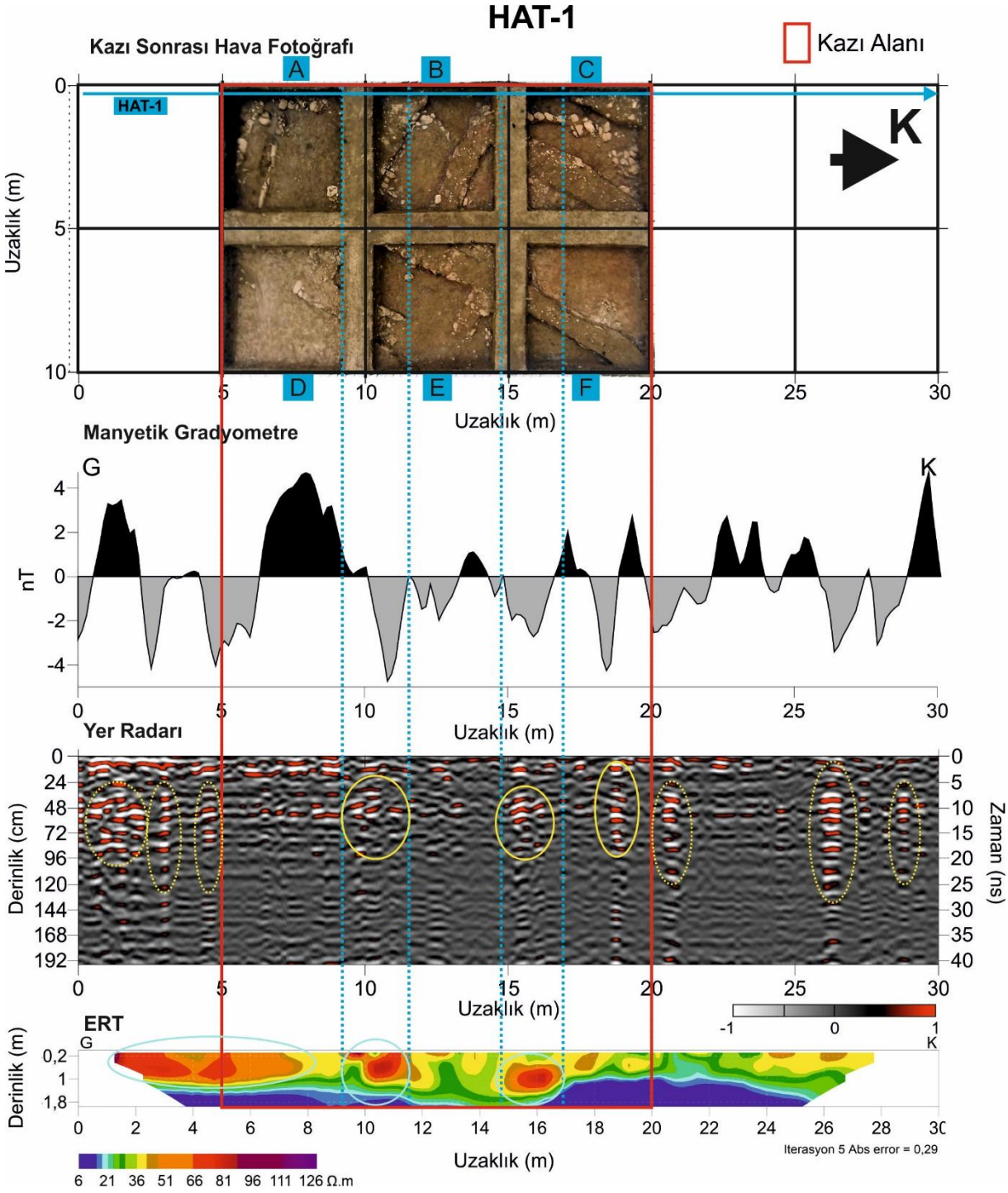
Manyetik gradyometre, ERT ve yer radarı çalışmalarının sonuçların karşılaştırılması hem 2-boyutlu kesitlerde hem de derinlik kesme görüntüleri üzerinde yapılmıştır. Ayrıca arkeolojik kazı sonuçlarıyla birlikte elde edilen yorumlamalar bu bölümde sunulmuştur.

Sonuçların karşılaştırılması iki etapta gerçekleştirilmiştir. İlk etapta, manyetik gradyometre ve yer radarı çalışmalarıyla elde edilen 20 hat ile ERT çalışmasıyla elde edilen 11 hattının tümleşik yorumu karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Şekillerin üst kısımlarında arkeolojik kazı çalışmaları sonrasında çekilen hava fotoğrafı yer almaktadır. Hatların konumu bu hava fotoğrafın üzerine işaretlenmiş olup, tüm kesitler G-K yönlü olarak verilmiştir. A, B ve C açmalarının batı kısmından elde edilen 1 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.13'de verilmektedir. Hattın kestiği kısımlarda irili ufaklı kaba örgü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-1'in manyetik kesitinde manyetik değerlerin ± 5 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Bu hattın manyetik eğrisi genelde düşük genliklidir. Ancak gömülü arkeolojik yapılarla ilişkili olabilecek birçok anomali içermektedir. Bu anomaliler A açmasında yapı pozitif manyetik değere sahipken, B ve C açmalarında ise negatif özelliktedir. A açmasındaki kazılarda malzemenin yangın geçirdiği tespit edilmiştir. Bu yapının manyetik özellik kazanması yanmış kerpiç malzemeyle ilişkilidir. Hat-1'in radargram görüntüsünde yaklaşık 1 metre derinliğe kadar kısımda olası arkeolojik yapılarla ilişkili izler belirgin olarak görülmektedir. Bunlardan; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. A açmasında ortaya çıkartılan

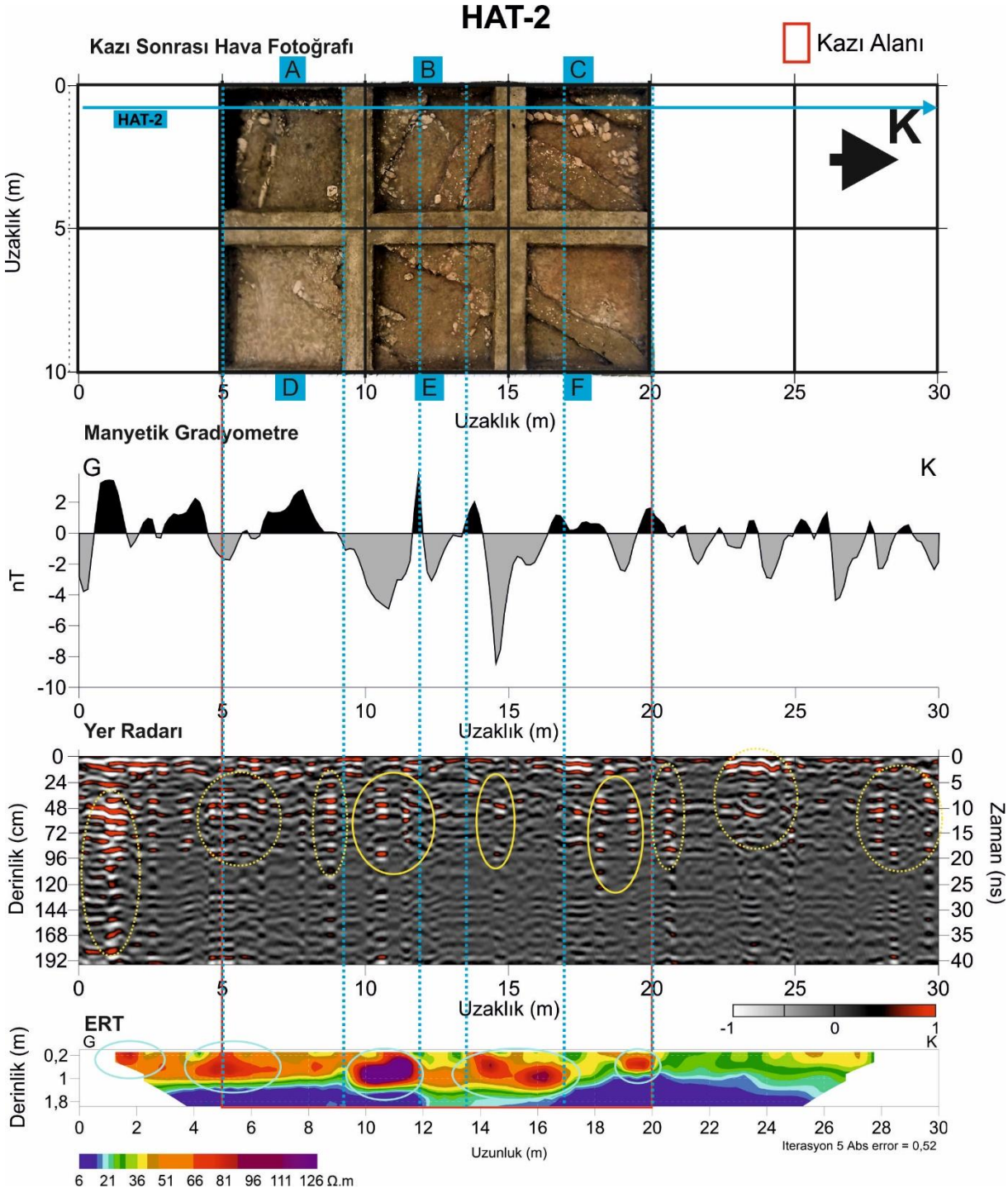
yapı duvarının radargramlardaki izi zayıftır. Bu durum duvarın taş yoğunluğunun az, genelde kerpiç malzemeden yapılmasıyla ilişkilidir. B ve C açmalarındaki diğer yapılar ile henüz kazı yapılmamış alandaki yapı izleri ise belirgindir. Hat-1'in ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik (kültürel) dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Ancak hattın 12 ile 17 m aralığında bu orta-yüksek resistiviteli tabaka daha derine (modelin sonuna kadar) devam etmektedir ve kültürel dolgu ondülasyonlu özelliktedir. Bu durum deprem sonrası oluşan yapı deformasyonuyla açıklanabilinir. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılar ERT modelinde yüksek resistiviteli izler olarak görülmektedir. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. A açmasında ortaya çıkartılan yanmış kerpiç yoğunluktaki yapı, manyetik eğride pozitif manyetik özellikteyken, radargramda ve ERT modelinde belirgin olarak görülememektedir. ERT modelinde bu yapı izi kazı yapılmayan alana doğru (güneye doğru) uzamakta olup, radargramdaki izleriyle uyumludur. B ve C açmalarında ortaya çıkartılan yapılar ise tüm yöntemlerde belirlenmiştir. Manyetikte negatif özellikte olan bu yapısal izler, radargramlarda yüksek genlikli yansıma izleri şeklinde, ERT modelinde ise yüksek resistivite olarak görülmektedir (Şekil 4.13).

1 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 2 nolu hattın, manyetik eğri grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.14'de verilmektedir. 1 nolu hatta benzer şekilde A, B, C açmalarından geçen hattın kestiği kısımlarda irili ufaklı kaba örgü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-2'in manyetik eğri grafiğinde manyetik değerlerin -10 nT/m ile +3nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Bu hattın manyetik eğrisi genelde negatif manyetik değerler hakimdir. Gömülü arkeolojik yapılarla ilişkili olabilecek birçok anomali içermektedir. Bu anomaliler hattın 0 ile 10 m arasındaki kısmında pozitif manyetik değere sahipken, hattın 10 ile 30 m arasında ise negatif özelliktedir. Hat-2'in radargram görüntüsünde yaklaşık 1 metre derinliğe kadar olan kısımda olası arkeolojik yapılarla ilişkili olduğu düşünülen izler görülmektedir. Bunlardan; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. 1 nolu hatta benzer şekilde, A açmasında ortaya çıkartılan yapı duvarının radargramlardaki izi zayıf özellikteyken, B ve C açmalarında ortaya çıkartılan duvarların radargramdaki izi daha belirgindir. Hat-2'in ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak

seviyesi gelmektedir. Ancak hattın 12 ile 17 m aralığında bu orta-yüksek resistiviteli tabaka daha derine (modelin sonuna kadar) devam etmektedir ve deformasyona bağlı oluşan bu durum kültürel dolguda ondülasyona sebep olmaktadır. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılar ERT modelinde yüksek resistiviteli izler olarak görülmektedir. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. ERT modelinde arkeolojik yapı izlerinin, 0 ile 10 m arasında ayrımlılığı düşükken, diğer izler yüksek ayrımlıdır ve yapı sınırlarını net bir şekilde vermektedir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. A açmasında ortaya çıkartılan kerpiçli yapı, manyetik eğride pozitif manyetik özellikteyken, radargram ve ERT modelinde belirgin olarak görülememektedir. Ancak hattın başındaki (0 ile 2 m arasındaki) pozitif manyetik iz, radargram ve ERT modelinde de belirlenebilmektedir. Hattın büyük bir bölümünde kazıyla uyumlu ve üç yöntemle de belirlenen sonuçlar elde edilmiştir. (Şekil 4.14).



Şekil 4.13: 1 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.



Şekil 4.14: 2 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

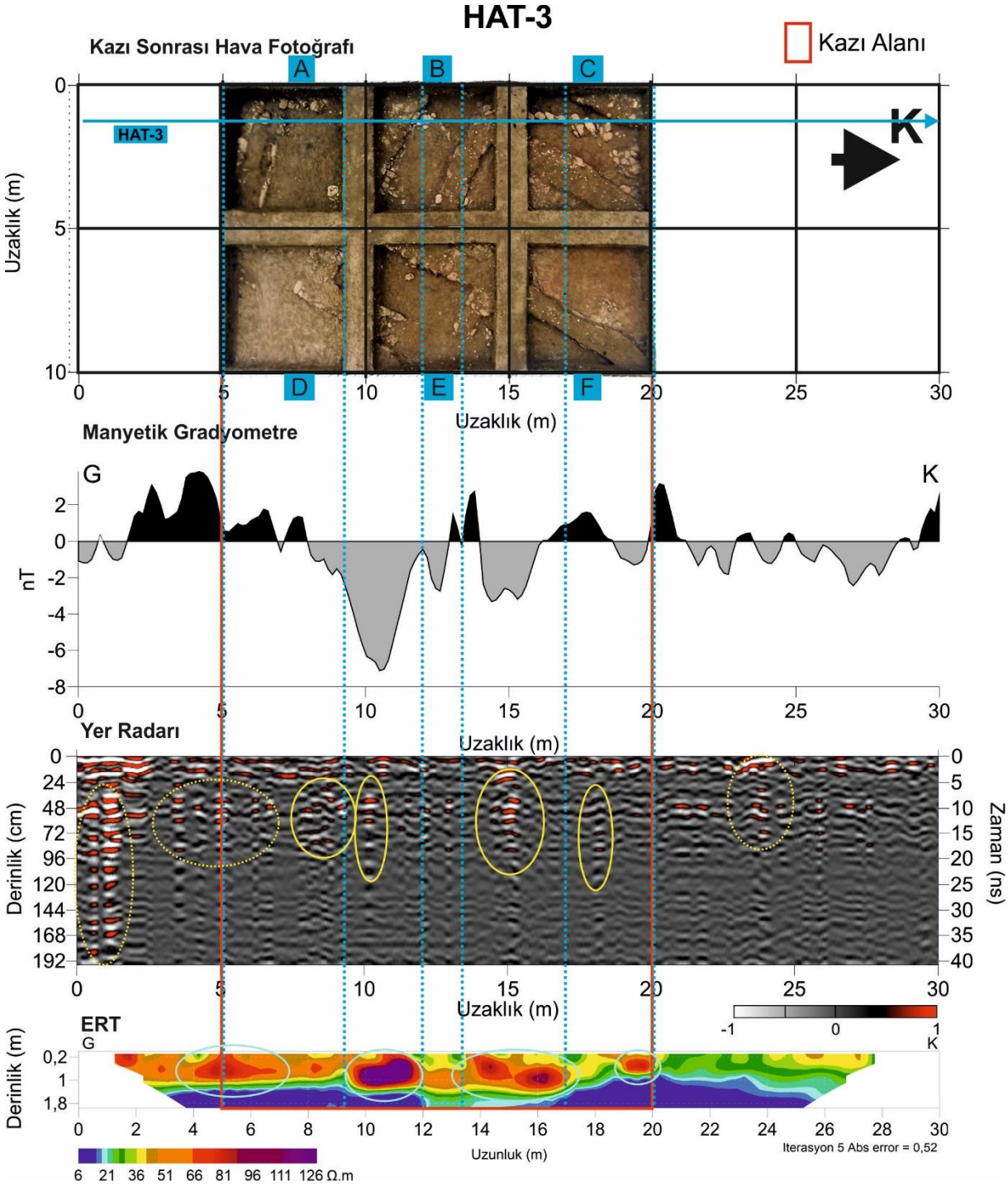
2 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 3 nolu hattın, manyetik eğri grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.15'de verilmektedir. 1 ve 2 nolu hatta benzer şekilde A, B, C açmalarından geçen hattın kestiği kısımlarda irili ufaklı kaba örgü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Bu hatta, A açmasında önceki hatları kesen GB-KD uzanımlı duvar yapısından çıkılmıştır. Hat-3'ün manyetik grafiğinde değerlerin -8 nT/m ile +3nT/m arasında bir değere

sahip olduğu görülmektedir. Bu hattın manyetik grafiğinde hattın 0 ile 8 m arasında pozitif, diğer kısımlarda ise negatif manyetik değerler hakimdir. Gömülü arkeolojik yapılarla ilişkili olabilecek birçok anomali içermektedir. Bu anomaliler A, B ve C açmalarında da negatif özelliktedir. Hat-3'ün radargram görüntüsünde yaklaşık 1 metre derinliğe kadar kısımda olası arkeolojik yapılarla ilişkili olduğu düşünülen izler görülmektedir. Bunlardan; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Her üç açmada da ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler belirlenmiştir. Yalnızca hattın 18 ile 20 m arasında görülen iz radargramda belirgin değildir. ERT modeli 1 m aralıklı toplandığı için bu ara hatta 2 nolu model karşılaştırma için kullanılmıştır. B ve C açmalarında ortaya çıkartılan yapılarla ERT modeli birebir uyumluyken, A açmasındaki yapı daha az ayrımlı olarak belirlenebilmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. A. B ve C açmalarında ortaya çıkartılan yapılar ise tüm yöntemde belirlenmiştir. Manyetikte negatif özellikte olan bu yapısal izler, radargramlarda yüksek genlikli yansıma ve difraksiyon izleri şeklinde, ERT modelinde ise yüksek resistivite olarak görülmektedir (Şekil 4.15).

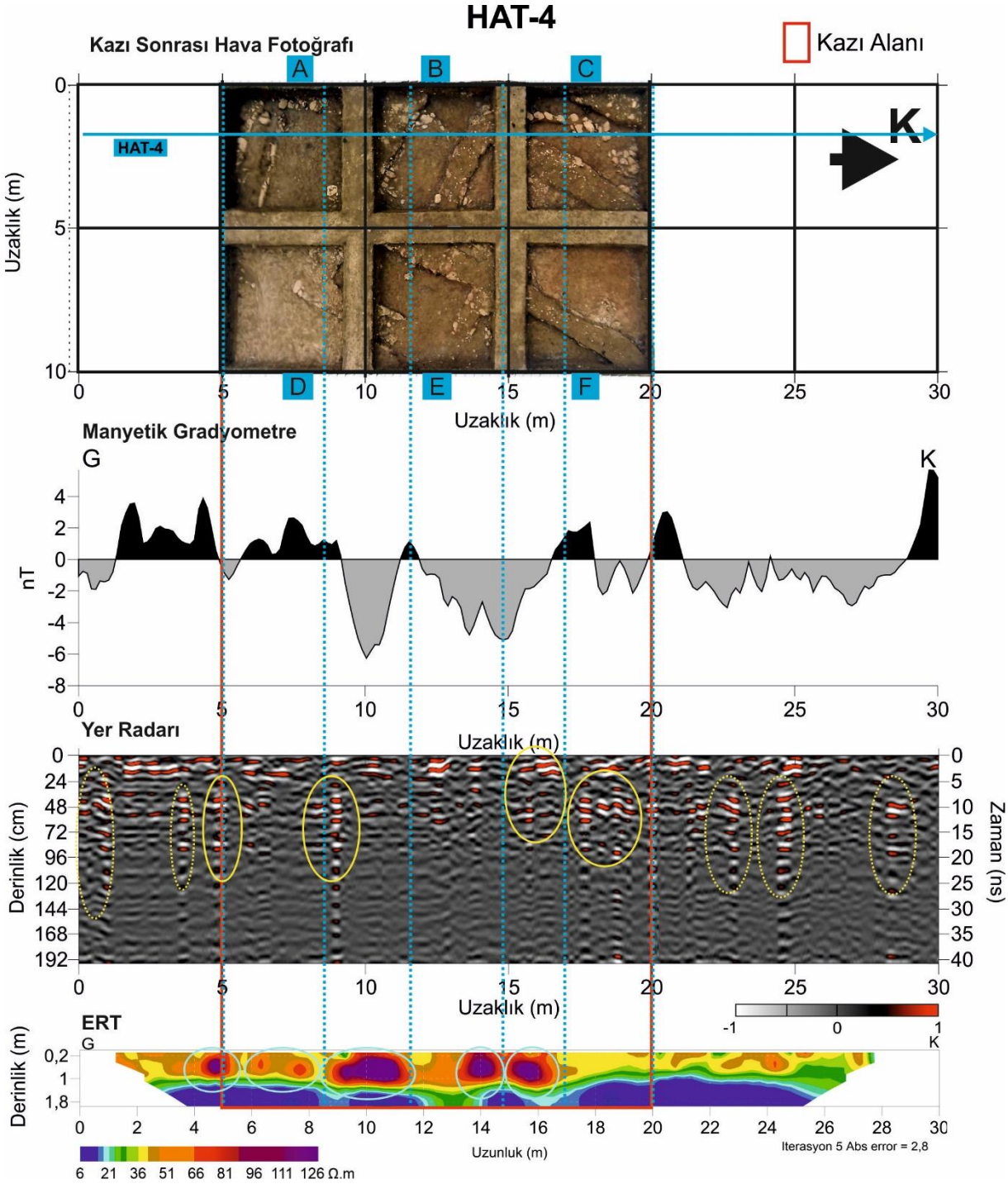
3 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 4 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.16'da verilmektedir. Önceki hatlara benzer şekilde hattın kestiği kısımlarda irili ufaklı kaba örgü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-4'ün manyetik eğri grafiğinde manyetik değerlerin -8 nT/m ile +5 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Kazı yapılan kısımda bu hattın manyetik eğrisinde genelde negatif manyetik anomaliler bulunmaktadır. Bu anomaliler A açmasında pozitif manyetik değere sahipken, B ve C açmalarında ise negatif özelliktedir. Hat-4'ün radargram görüntüsünde yaklaşık 1 metre derinliğe kadar olan kısımda olası arkeolojik yapılarla ilişkili olduğu düşünülen izler görülmektedir. Bunlardan; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Radargramlardaki izler genelde uyumludur. Ancak 10 ile 15 m arasında manyetik eğride negatif görülen geniş iz radargramda belirgin değildir. Hat-4'ün ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Ancak hattın 12 ile 14 m aralığında bu orta-yüksek resistiviteli tabaka daha derine (modelin sonuna kadar) devam etmektedir. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla en uyumlu sonuç ERT modeliyle elde edilmiştir. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazılarak ortaya çıkartılan yapı duvarlarıyla

birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Ortaya çıkartılan yapı duvarları manyetik eğride negatif özelliktedir. ERT modelinde ise yüksek resistiviteli olarak görülmektedir. Yer radarı sonucunda kazı ve diğer yöntem sonuçlarıyla uyumlu bazı yüksek genlikli yansıma ve difraksiyon izleri belirlenmiştir. Ancak hattın 10 ile 15 m arasında manyetikte negatif, ERT modelinde yüksek resistiviteli olarak görülen ve kazıyla da ortaya çıkartılan yapı izleri radargramda belirgin değildir. Bu durum ERT modelinde de belirlenen düşey deformasyona bağlı olarak ilgili olduğu düşülmektedir (Şekil 4.16).

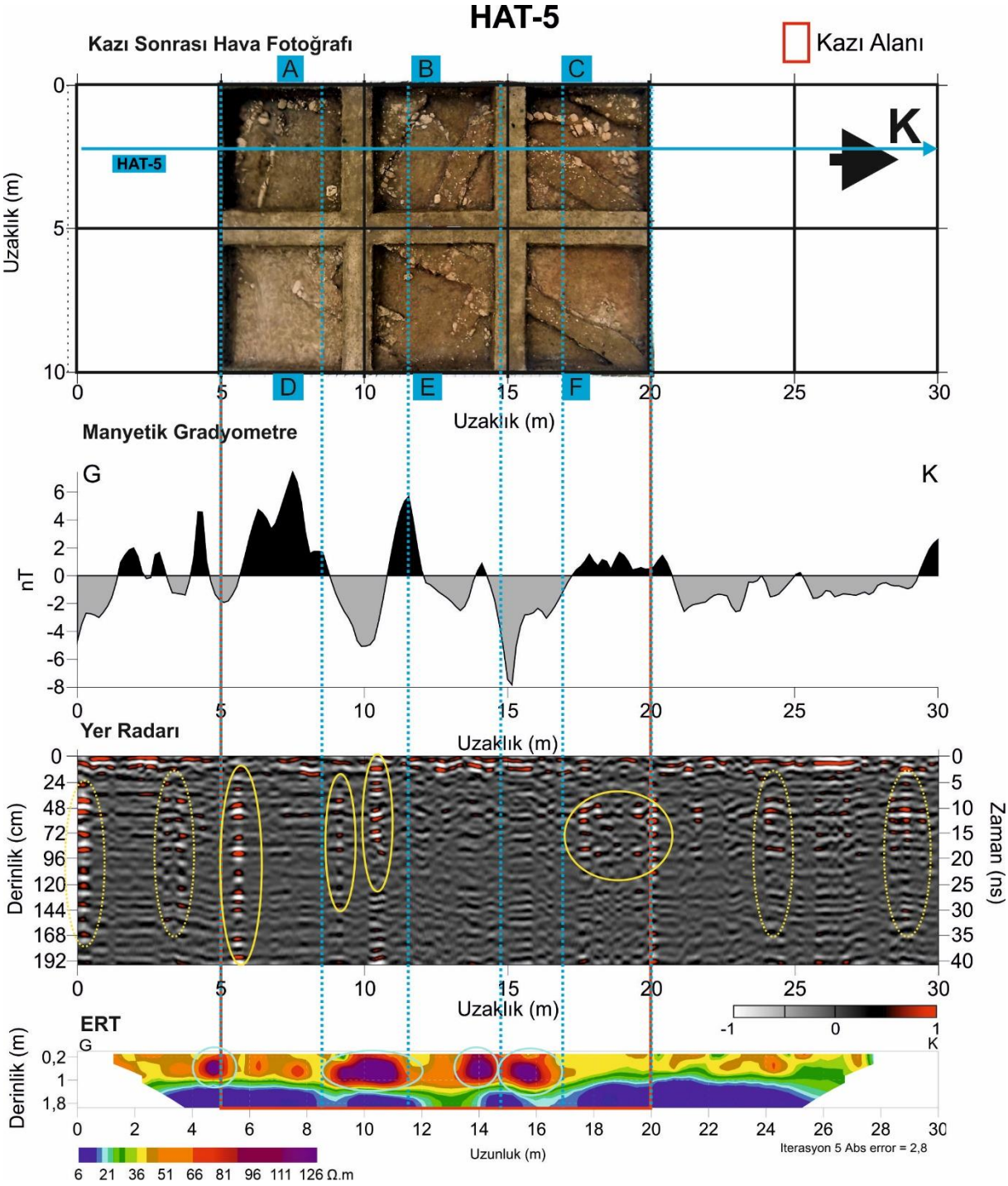
4 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 5 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.17'de verilmektedir. Bu hat üzerinde A açmasında künk bir boru ve irili ufaklı kaba örgü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-5'in manyetik eğri grafiğinde manyetik değerlerin -7 nT/m ile +8 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. A açmasının bulunduğu kısım pozitif manyetik özellikteyken, hattın diğer kısımlarında genelde negatif manyetik anomaliler hakimdir. A açmasındaki manyetik özellik ortamdaki yangından kaynaklanmaktadır. Hat-5'in radargram görüntüsünde arkeolojik yapılarla ilişkili olabilecek yüksek genlikli yansıma yüzeyleri derine doğru uzama yapmaktadır. Bu durum ortamın nem içeriğine bağlı yükselen elektriksel iletkenlik değeriyle ilişkili olabilir. Hattın 10 ile 17 m arasında ortaya çıkartılan yapılar dışında radargramdaki izler kazıyla uyumludur. Radargramdaki yapı izlerinden, kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesikli çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Hat-5'in ERT modeli ise, bir önceki hattın aynısıdır ve kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla uyum göstermektedir. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazılarak ortaya çıkartılan yapı duvarlarıyla birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Ortaya çıkartılan arkeolojik yapılar A açmasında manyetik özelliğe sahip, diğer kısımlarda ise manyetik değildir. ERT modelinde ise arkeolojik yapılar yüksek resistiviteli olarak kazıyla uyumlu olarak saptanmıştır. Radargramlarda ise arkeolojik yapılarla ilişkili bazı izler belirlenmiştir. Ancak hattın 10 ile 17 m arasında düşey deformasyonun en belirgin olduğu kısımda kazıyla ortaya çıkan yapılar belirgin olarak tespit edilememiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.15: 3 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.



Şekil 4.16: 4 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

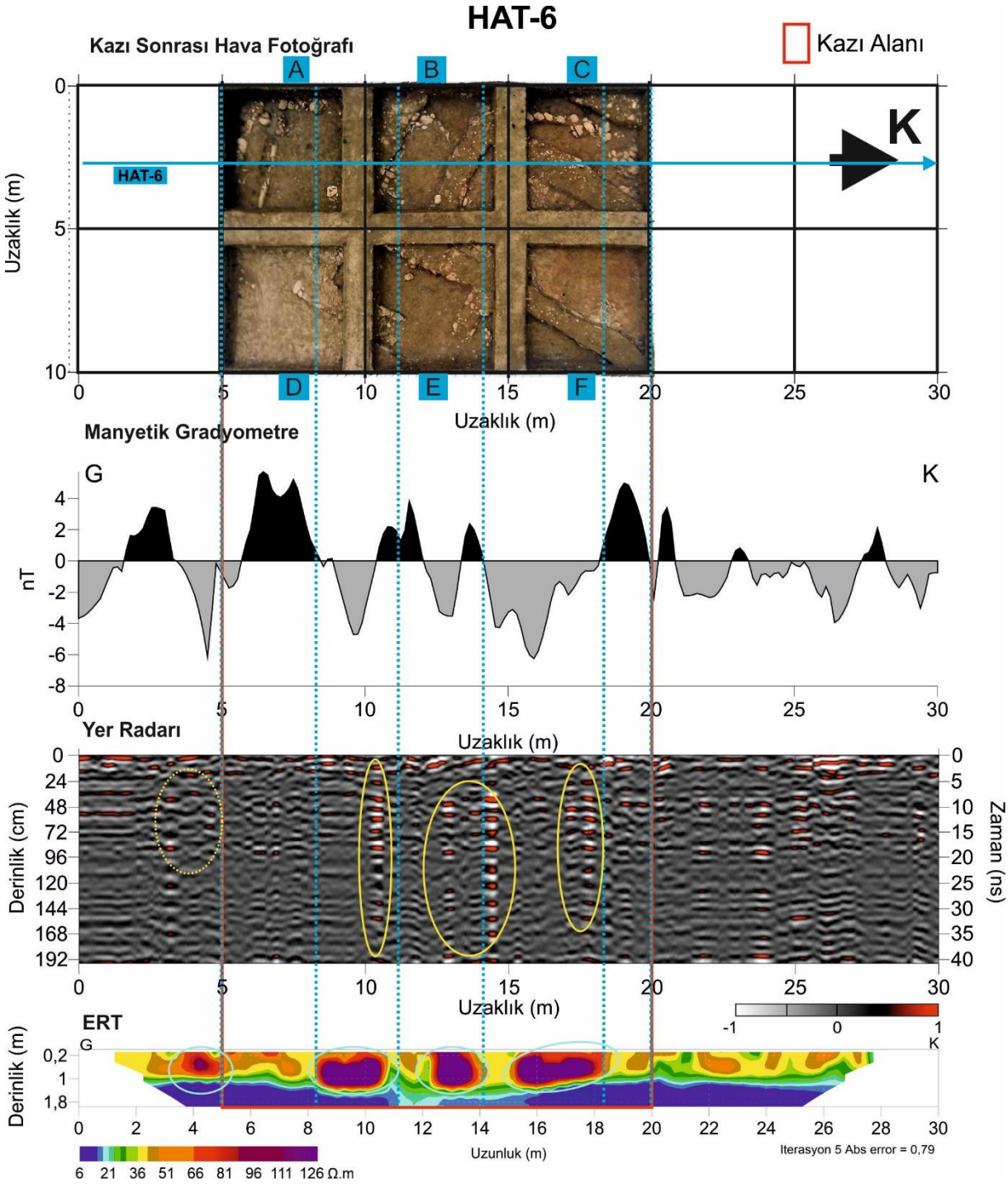


Şekil 4.17: 5 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

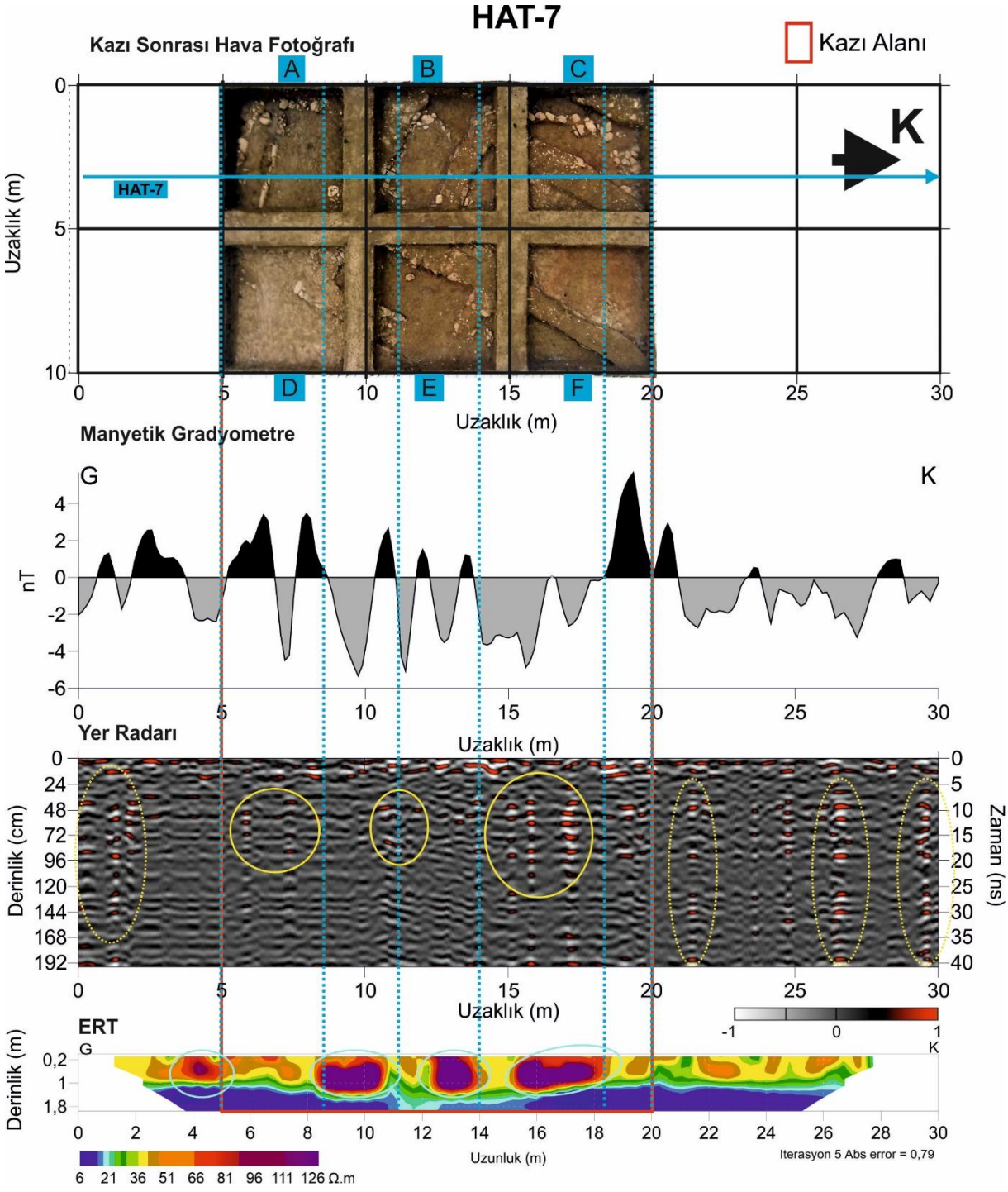
5 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 6 nolu hattın, manyetik eğri grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.18'de verilmektedir. Bir önceki hatta olduğu gibi bu hat üzerinde A açmasında bir künk boru ve diğer kazılan yerlerde irili ufaklı kaba örgülü bazı duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-6'ın manyetik eğri grafiğinde manyetik değerlerin -8 nT/m ile +5 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Manyetik anomaliler A açmasında yangına bağlı oluşan pozitif manyetik değer mevcutken, B ve C açmalarında ise negatif

özelliktedir. Ayrıca C açmasına denk gelen hattın 18 ile 20 m arasındaki kısımda pozitif de ortamdaki yangınla ilişkilidir. Hat-6'ün radargram görüntüsü önceki diğer hatlardan farklıdır. Hat boyunca yatay uzanan tabakalanma izleri daha belirgindir. Arkeolojik yapılarla ilişkili olabilecek bazı izler tespit edilmiştir. Bunlardan; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Radargramlardaki izler genelde yapı sınırlarında görülmektedir. Hat-6'ın ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Ancak hattın 11,5 ile 12,5 m aralığında bu orta-yüksek resistiviteli tabaka daha derine (modelin sonuna kadar) devam etmektedir. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla ERT modeli arasında büyük bir uyum bulunmaktadır. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazıyla ortaya çıkartılan yapı duvarlarıyla birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Ortaya çıkartılan yapı duvarları manyetik eğride negatif özelliktedir. ERT modelinde ise yüksek resistiviteli olarak görülmektedir. Yer radarı sonucunda yapılarla ilişki olan bazı izler kazıyla ortaya çıkartılan yapıların sınırlarında görülmektedir (Şekil 4.18).

6 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 7 nolu hattın, manyetik eğrisi, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.19'da verilmektedir. Bu hat üzerinde A açmasında künk bir boru ve irili ufaklı kaba örgü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-7'in manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -5 nT/m ile +6 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Hattın genelinde negatif izler hakimken, bazı izler dipolar karakterdedir. Bir önceki hatta görülen 18 ile 22 m arasındaki pozitif değerler bu hatta da devam etmektedir. Hat-7'in radargram görüntüsünde arkeolojik yapılarla ilişkili izler tespit edilmiştir. Bu izler genelde manyetik grafikte negatif izlere karşılık gelmektedir. Bu izlerden, kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesikli çizgiyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Hat-7'nin ERT modeli ise, bir önceki hattın aynısıdır ve kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla uyum göstermektedir. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazılarak ortaya çıkartılan yapı duvarlarıyla birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Ortaya çıkartılan arkeolojik yapılar radargramlarda yüksek genlikli yansıma veya difraksiyon yüzeyleri, manyetikte genelde negatif özellikte ve ERT modelinde yüksek resistiviteli olarak görülmektedir (Şekil 4.19).



Şekil 4.18: 6 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.



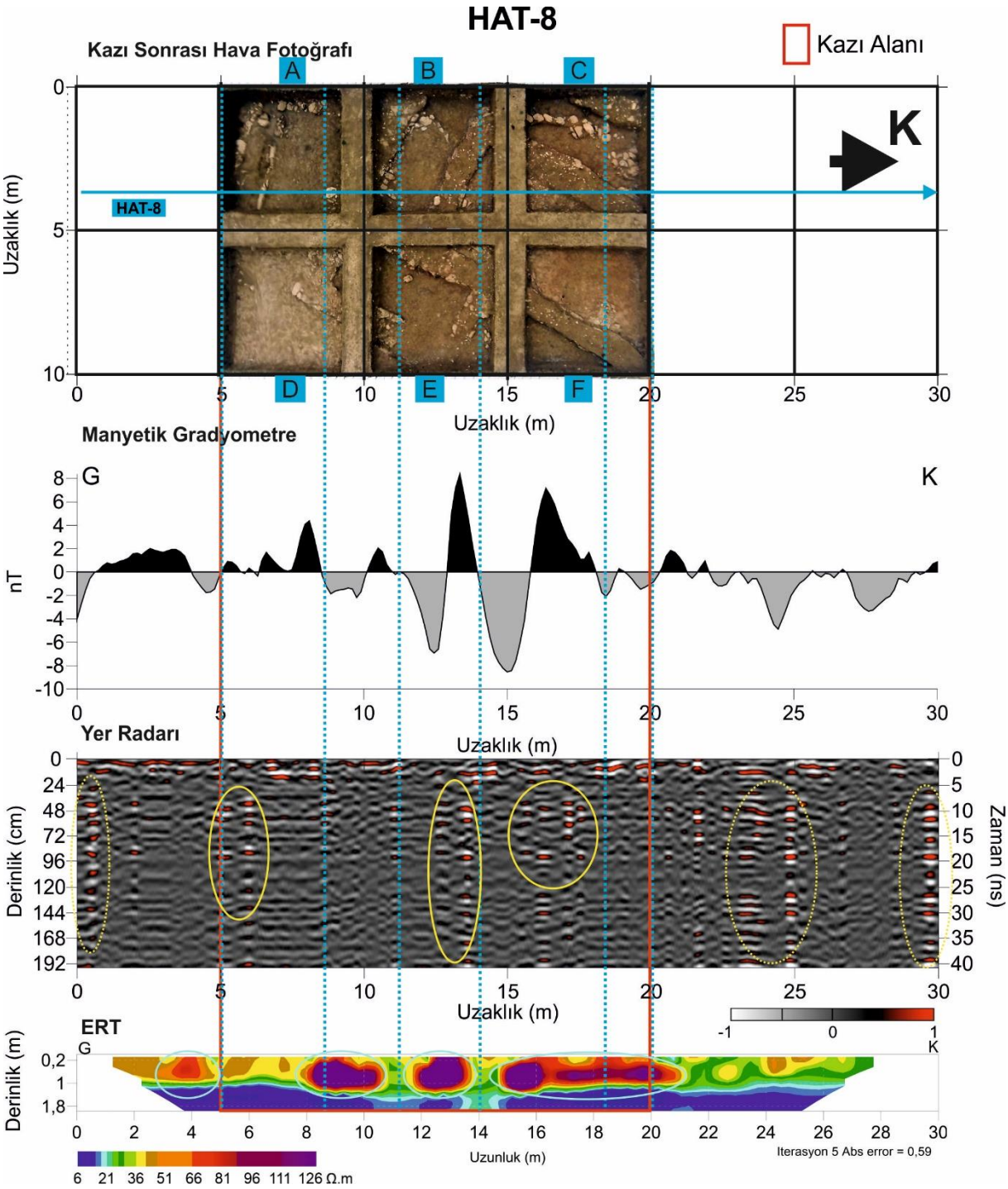
Şekil 4.19: 7 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

7 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel olarak geçen 8 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.20'de verilmektedir. Bir önceki hatta olduğu gibi bu hat üzerinde A açmasında bir künk boru ve diğer kazılan yerlerde irili ufaklı kaba örgülü bazı duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-8'in manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -8 nT/m ile +10 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Negatif izler genelde yapı

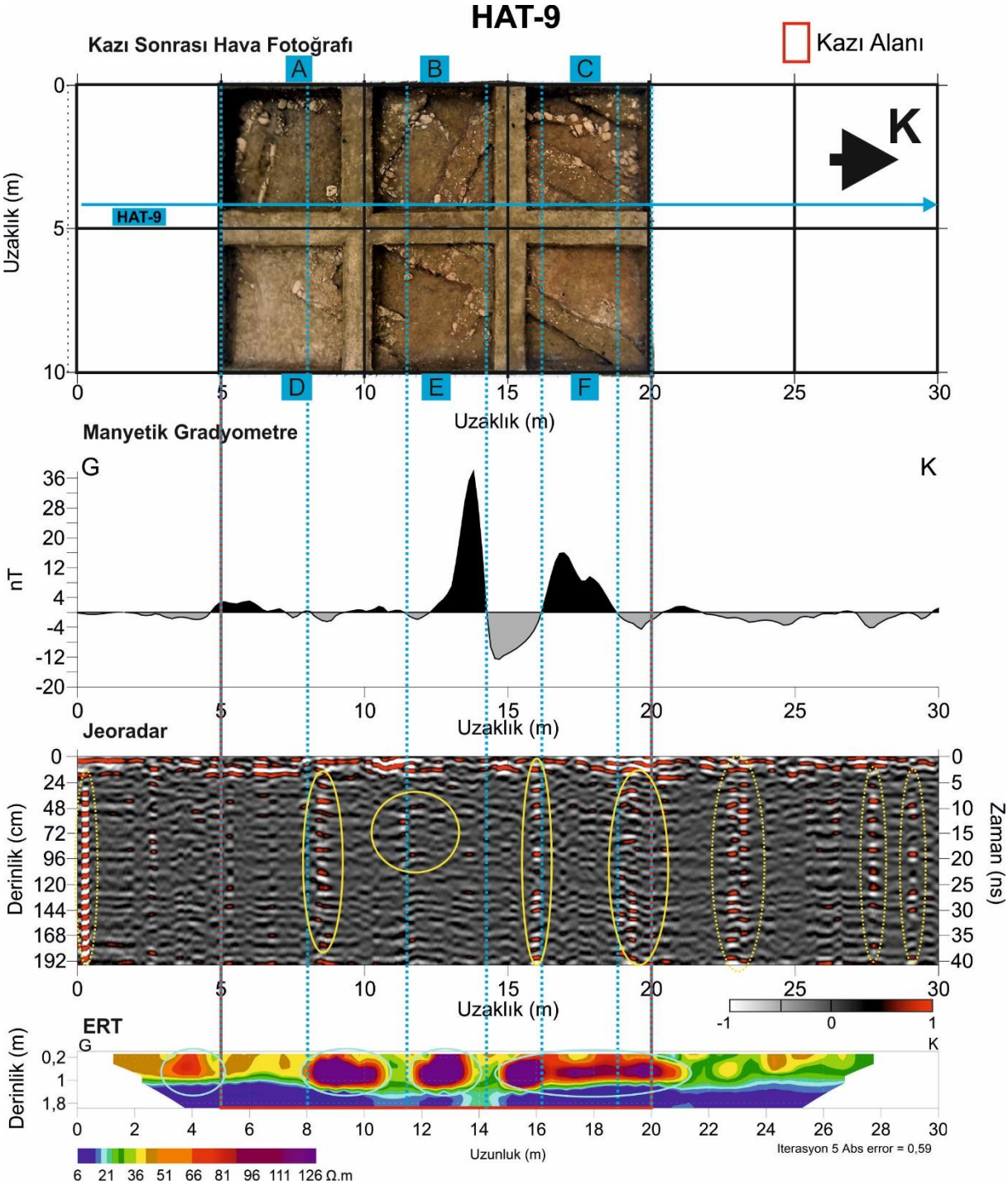
duvarlarına denk gelirken, pozitif manyetik izler genelde yapıların iç mekânında bulunan yangın geçirmiş malzemelerle ilişkilidir. Hat-8'in radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla ilişkili olan izler bulunmaktadır. Ancak bu izler yapı duvarlarının sınırlarına denk gelmektedir. Difraksiyonla ilişkili olduğu düşünülen bu izlerden; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Hat-8'in ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla ERT modeli arasında büyük bir uyum bulunmaktadır. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazıyla ortaya çıkartılan yapı duvarlarıyla birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Bu hatta manyetik değerler genelde dipolar özellikte olup, negatif taraf baskındır. ERT modelinde ise yapı duvarları benzer şekilde yüksek resistiviteli olarak görülmektedir. Yer radarı sonucunda da yapılarla ilişkili ve genel yapı sınırlarında oluşan difraksiyon izleri şeklinde bazı anomaliler belirlenmiştir. Ancak diğer yöntemlere kıyasla bu anomaliler daha az belirgindir (Şekil 4.20).

8 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 9 nolu hattın, manyetik eğrisi, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.21'de verilmektedir. Bir önceki hatta benzer şekilde bu hat üzerinde de A açmasında bir künk boru ve diğer kazılan yerlerde irili ufaklı kaba örgülü bazı duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-8'in manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -20 nT/m ile +36 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Önceki hatlara kıyasla bu hatta manyetik değerleri yüksektir. Bu durum hattın 12 ile 18 m arasında baskın olarak görülen yangın tabakasıyla ilgili olmalıdır. Özellikle B ve C açmalarını içine alan kısımda yanmış kerpiç parçaları ortaya çıkartılmıştır. Hat-9'un radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla ilişkili olan izler bulunmaktadır. Ancak bu izler genelde derine doğru uzama yapmaktadır. Bu durum ortamdaki hacimsel su içeriği, nem gibi faktörlere bağlı oluşan iletkenliğin artmasıyla ilişkili olabilir. Ayrıca yapılardaki taş miktarının azalması yapının yer radarıyla belirlenebilirliğini azaltmaktadır. Hat-9'un ERT modeli bir önceki hat ile aynıdır ve kazı sonucuyla birebir uyuşmaktadır. Yapı duvarlarıyla ilişkili izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Özellikle yangın geçiren ortamlar manyetik grafikte net bir şekilde görülürken, ERT modeliyle de yapı duvarları net bir biçimde tespit edilebilmiştir. Yer radarı sonucunda da yapılarla ilişki

olan bazı izler belirlenmiştir. Ancak izler derine doğru uzama yapmaktadır ve duvarın genişliği ile yeri konusunda diğer yöntemlere kıyasla daha az başarılı sonuç vermektedir (Şekil 4.21).



Şekil 4.20: 8 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.



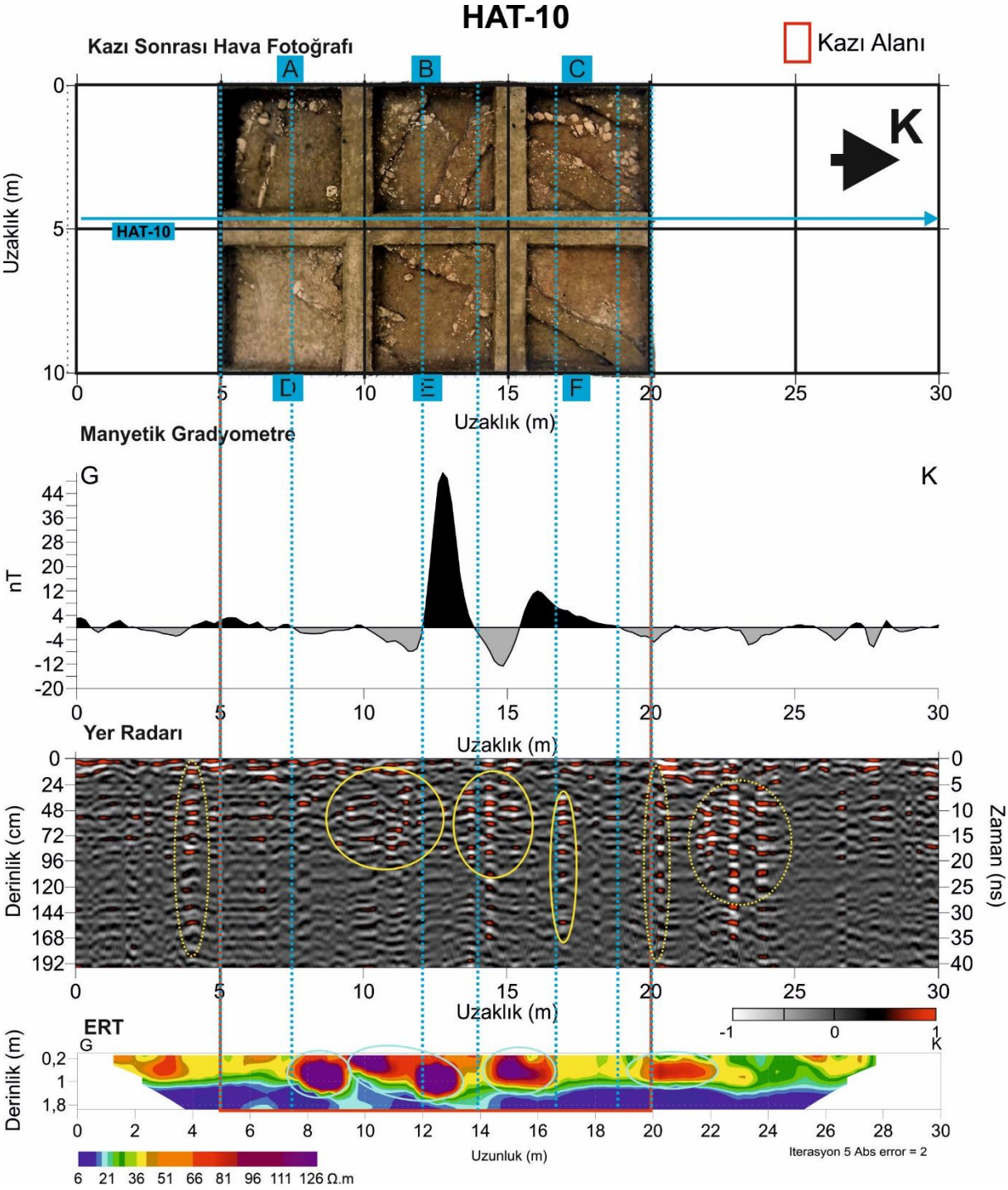
Şekil 4.21: 9 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

9 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 10 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.22'de verilmektedir. Bu hat açmalar arasında kalan henüz kazılmamış 1 metrelik kısımdan geçmektedir. Hattın batı ve doğusundaki açmalarda dikdörtgen planlı yapı grubuna ait irili ufaklı kaba örgülü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-10'un manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -20 nT/m ile +45 nT/m arasında bir değere sahip

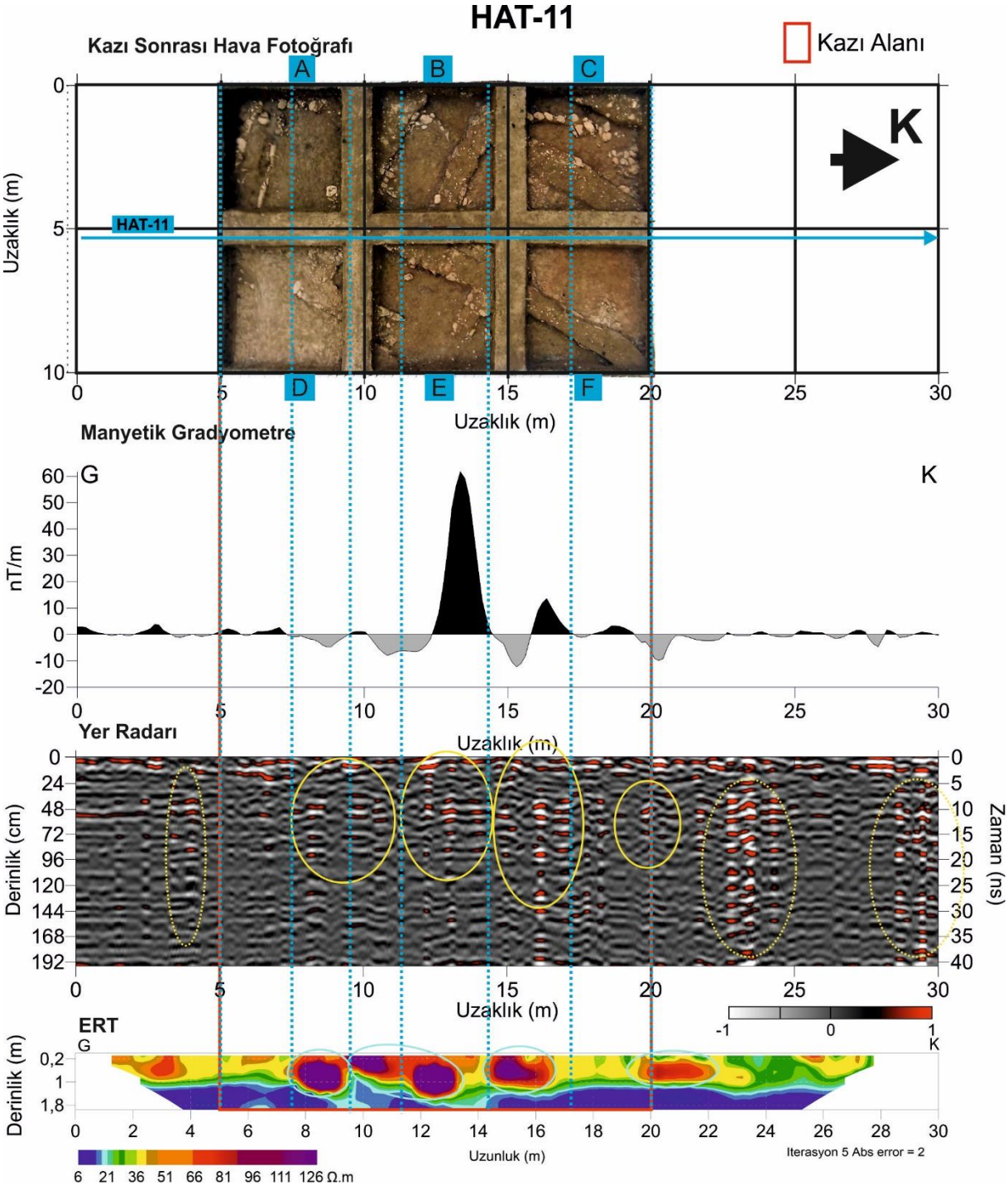
olduğu görülmektedir. Alandan ölçülen en büyük manyetik değerlerden biri bu kısımdan elde edilmiştir. Kazı sonrası özellikle B ile E açmalarında alanda büyük ve yoğun yangın görmüş yapı malzemelerine ulaşılmıştır. Hat boyunca yangından daha az etkilenen kısımlarda duvarlar negatif manyetik değer vermektedir. Hat-10'un radargram görüntüsü kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla en uyumlu olanlardan biridir. Radargramda belirlenen izlerden; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Hat-10'un ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla ERT modeli arasında büyük bir uyum bulunmaktadır. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazıyla ortaya çıkartılan taş örgülü yapı duvarlarıyla birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Hattın 10 ile 18 m arasında yoğun yangına maruz kalmış yapının etkisi manyetik grafikte belirgin olarak görülmektedir. Yer radarı ve ERT modelinde ise yapı duvarları yüksek ayrımlı olarak belirlenebilmiştir (Şekil 4.22).

10 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 11 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.23'de verilmektedir. Bir önceki hatta benzer şekilde bu hat da kazı yapılmayan açmalar arasına denk gelmektedir. Hattın batı ve doğusundaki açmalarda ızgara planlı yapı grubuna ait irili ufaklı kaba örgülü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-11'in manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -20 nT/m ile +60 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Alandan ölçülen en büyük manyetik değerler biri bu kısımdan elde edilmiştir. Kazı sonrası özellikle B ile E açmalarında alanda büyük ve yoğun yangın görmüş yapı malzemelerine ulaşılmıştır. Hat boyunca yangından daha az etkilenen kısımlarda duvarlar negatif manyetik değer vermektedir. Hat-11'in radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler bulunmaktadır. Radargramda belirlenen izlerden; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Hat-9'un ERT modeli bir önceki hat ile aynıdır ve kazı sonucuyla birebir uyuşmaktadır. Yapı duvarlarıyla ilişkili izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Manyetik eğri grafiğinde, yangından etkilenen malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak yüksek manyetik değerler görülmektedir. ERT modeliyle de yapı duvarları net bir biçimde tespit edilebilmiştir. Radargramda belirlenen izler ile kazıyla ortaya çıkartılan ortaya çıkartılan yapılar uyumludur

(Şekil 4.23). Ancak kazı yapılmayan kısımda görülen ve yüzey koşullarıyla ilişkili olduğu düşünülen ve diğer yöntemlerle uyumlu olmayan bazı izler görülmektedir. Bu durum yer radarı yönteminin yüzey koşullarından diğer yöntemlere kıyasla daha fazla etkilenmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.22: 10 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.



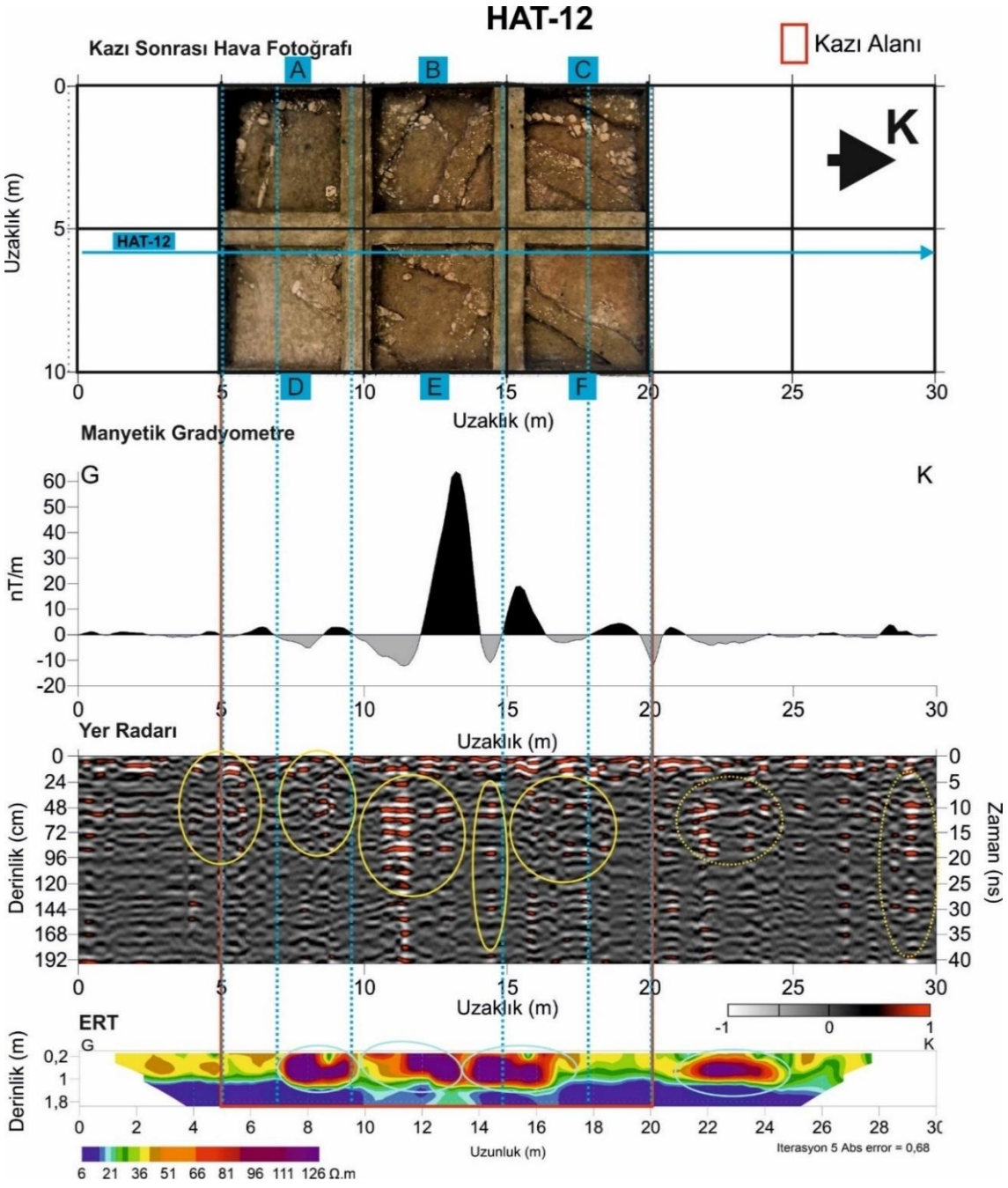
Şekil 4.23: 11 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

11 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 12 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.24'de verilmektedir. Bu hat, D, E ve F açmaların batı kesiti tarafından geçmektedir. Hattın geçtiği açmalarda yapılan kazı çalışmaları sonucunda ızgara planlı yapı grubuna ait irili ufaklı kaba örgülü taş duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-12'in manyetik grafiğinde değerlerin -20 nT/m ile +60 nT/m arasında bir değere sahip olduğu

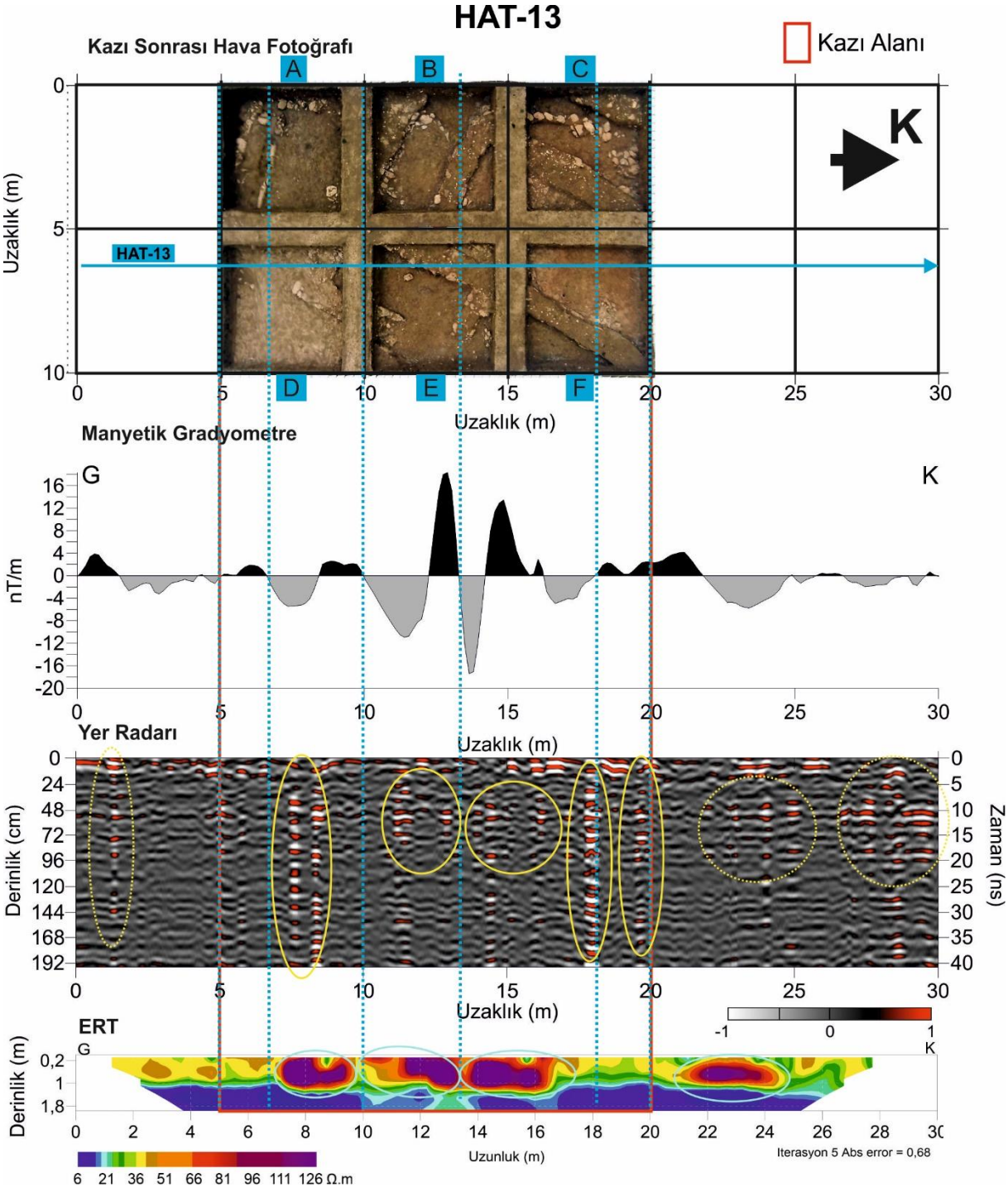
görülmektedir. Hat-11 ile benzer olarak alandan ölçülen en büyük manyetik değerler bu kısımdan elde edilmiştir. Kazı sonrası özellikle B ile E açmalarında alanda büyük ve yoğun yangın görmüş yapı malzemelerine ulaşılmıştır. En yüksek manyetik değer hattın 10 ile 17 m arasında bu açmalarda görülmektedir. Hat boyunca yangından daha az etkilenen kısımlarda duvarlar negatif manyetik değer vermektedir. Hat-12'in radargram görüntüsü kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler bulunmaktadır. Özellikle hattın 10 ile 14 metreleri arasında görülen işaretli iz belirgindir. Daha iri boyutta ve yoğun taşlardan oluşan duvarların radargramlarda daha belirgin olarak görülebildiği, bunun tersi durumlarda ise bu yöntemle yapının belirlenebilirliği azalmaktadır. Radargramda belirlenen izlerden; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Hat-12'in ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla ERT modelinde yüksek resistiviteli olarak görünmektedir. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazıyla ortaya çıkartılan taş örgülü yapı duvarlarıyla birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Bu hattın manyetik grafiğinde yüksek manyetik izler genelde yapının iç mekanıyla çakışmaktadır. Kazılarda bu iç mekânda yanmış malzemelere ve kerpiçlere rastlanılmıştır. Bu durum manyetik ve ERT modellerinin karşılaştırılmasında da görülmektedir. Yangın gören yüksek manyetik değerli kısımlar, ERT modelindeki yüksek resistiviteli anomalilerin arasındaki kısımlara denk gelmektedir. Radargramda ise yüksek genlikli yansıma izleri, negatif manyetik değerler ile yüksek resistiviteli ortamlarla uyuşmaktadır (Şekil 4.24).

12 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 13 nolu hattın, manyetik eğrisi, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.2'de verilmektedir. D, E ve F açmalarından geçen bu hat üzerinde kazı sırasında örgü yapılı taş duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-13'ün manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -20 nT/m ile +18 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Bir önceki hatta kıyasla manyetik değerler bu hatta düşmüştür. Ancak yangın geçirmiş malzemelerin etkisi bu hatta da devam etmektedir. Hat-13'ün radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler bulunmaktadır. Ancak özellikle negatif manyetik değerlerle uyumlu radar izlerinde derine doğru uzama görünmesi dikkat çekicidir. Bir önceki radargram ile benzer izler bu hatta da devam etmektedir. Hat-13'ün ERT

modeli bir önceki hat ile aynıdır ve kazı sonucuyla birebir uyuşmaktadır. Yapı duvarlarıyla ilişkili izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Manyetik eğride, negatif değerler ile ERT modelindeki yüksek resistiviteli ortamlar birbiriyle uyuşmaktadır. Yüksek manyetik değeri olan (yangın geçiren) kısımlar ise mekanların iç kısımlarına denk gelmektedir. Radargram genelde karmaşık özellikte olup, kazıyla uyumlu sonuçlar vermiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.24: 12 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması**.**

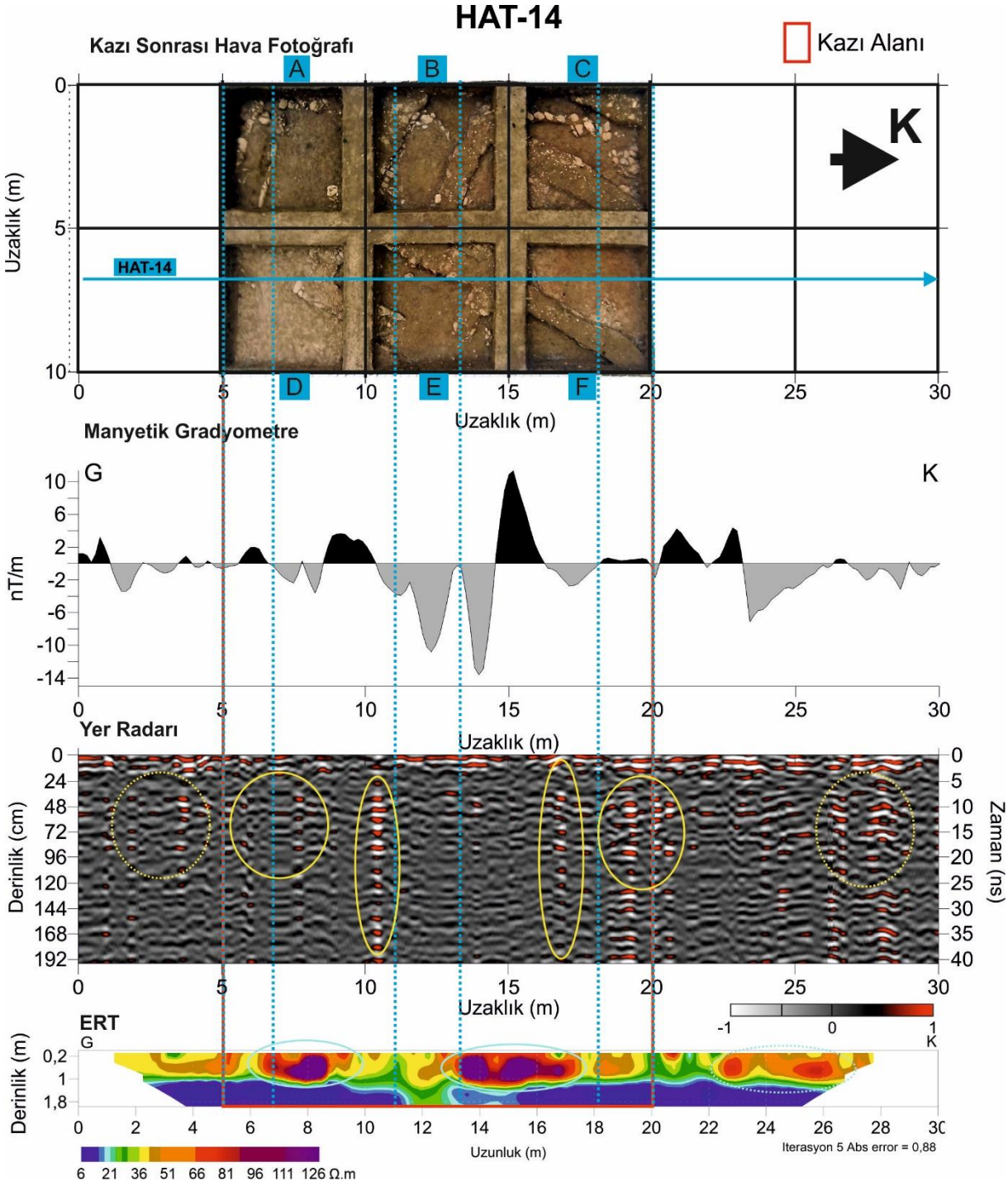


Şekil 4.25: 13 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

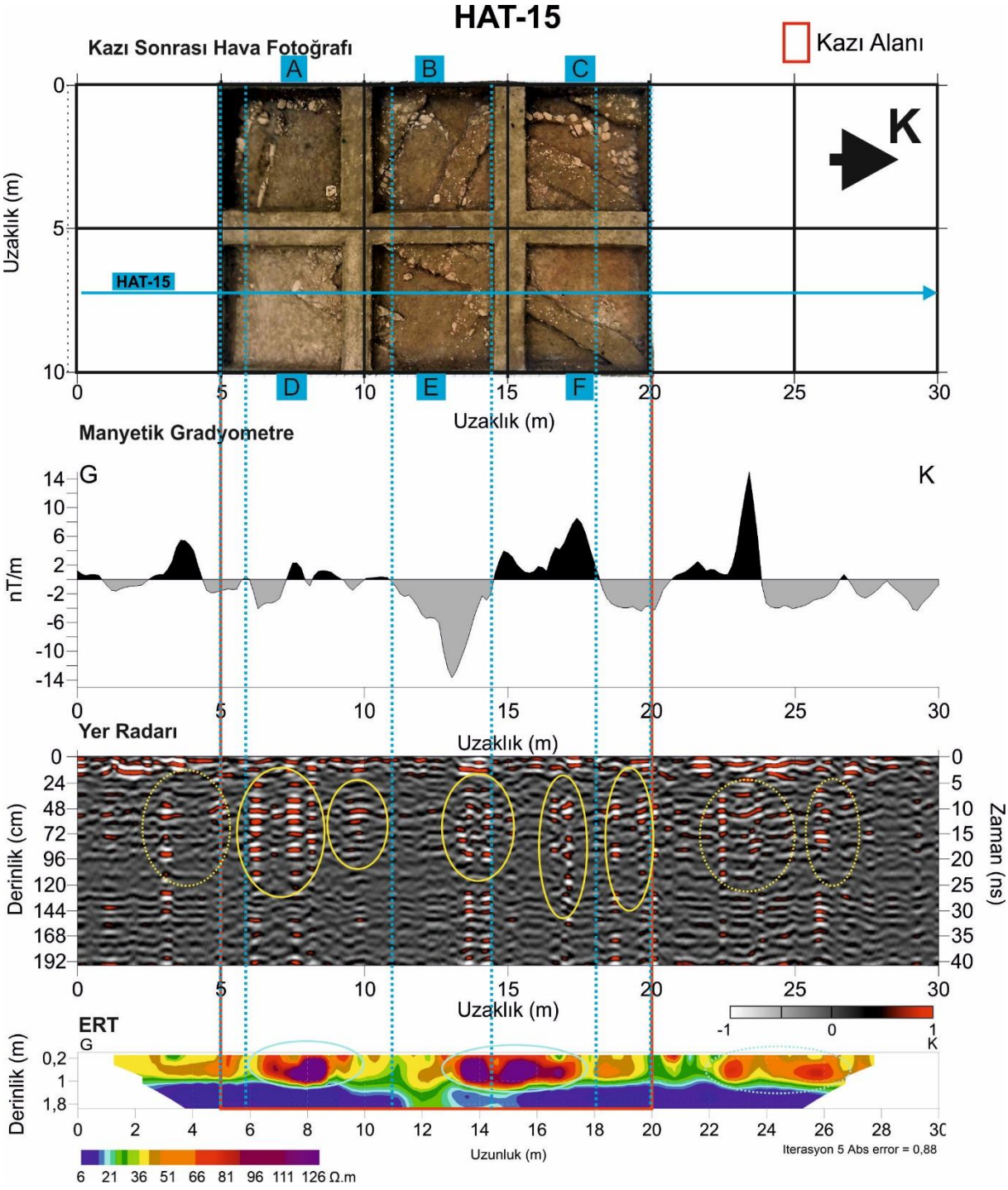
13 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 14 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.26'da verilmektedir. D, E ve F açmalarından geçen bu hattın geçtiği alanlarda ızgara planlı mekanlara ait irili ufaklı kaba örgülü taş duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-14'ün manyetik eğri grafiğinde manyetik değerlerin -14 nT/m ile +10 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Hat üzerinde ölçülen en büyük manyetik

değerler hat 14 ile 16 m arasında elde edilmiştir. Hat-14'ün radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler görülmektedir. Radargramda belirlenen bu izler sarı elipsle gösterilmiştir. Hat-14'ün ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Ancak hattın 11 ile 13 m aralığında bu orta-yüksek resistiviteli tabaka daha derine (modelin sonuna kadar) devam etmektedir ve deformasyona bağlı oluşan bu durum kültürel dolguda ondülasyona sebep olmaktadır. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla ERT modelinde yüksek resistiviteli olarak görünmektedir. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazıyla ortaya çıkartılan taş örgülü yapı duvarlarıyla birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Yüksek manyetik izler genelde yapının iç kısımlarına denk gelirken, yüksek resistiviteli anomaliler yapı duvarlarını göstermektedir. Yer radarı yöntemiyle ise kazılar sonrası ortaya çıkan yapılarla uyumlu bir radargram elde edilmiştir. Taş yoğunluğunun fazla olduğu duvar anomalileri radargramlarda daha belirgindir (Şekil 4.26).

14 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 15 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.27'de verilmektedir. D, E ve F açmalarından geçen bu hat üzerinde kazı sırasında yapı kalıntısının iki farklı duvarı ortaya çıkartılmıştır. Hat-15'in manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -14 nT/m ile +14 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Hat-15'in radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler bulunmaktadır. Bir önceki radargram ile benzer izler bu hatta da devam etmektedir. Hat-15'inn ERT modeli bir önceki hat ile aynıdır ve kazı sonucuyla birebir uyuşmaktadır. Yapı duvarlarıyla ilişkili izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Manyetik eğride, negatif değerler ile ERT modelindeki yüksek resistiviteli ortamlar birbiriyle uyuşmaktadır. Yüksek manyetik değeri olan (yangın geçiren) kısımlar ise mekanların iç kısımlarına denk gelmektedir. Radargramda izler genelde 120 cm derinliğe kadar devam etmekte olup, kazı ve diğer yöntemle elde edilen sonuçlara uyumludur (Şekil 4.27).



Şekil 4.26: 14 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.



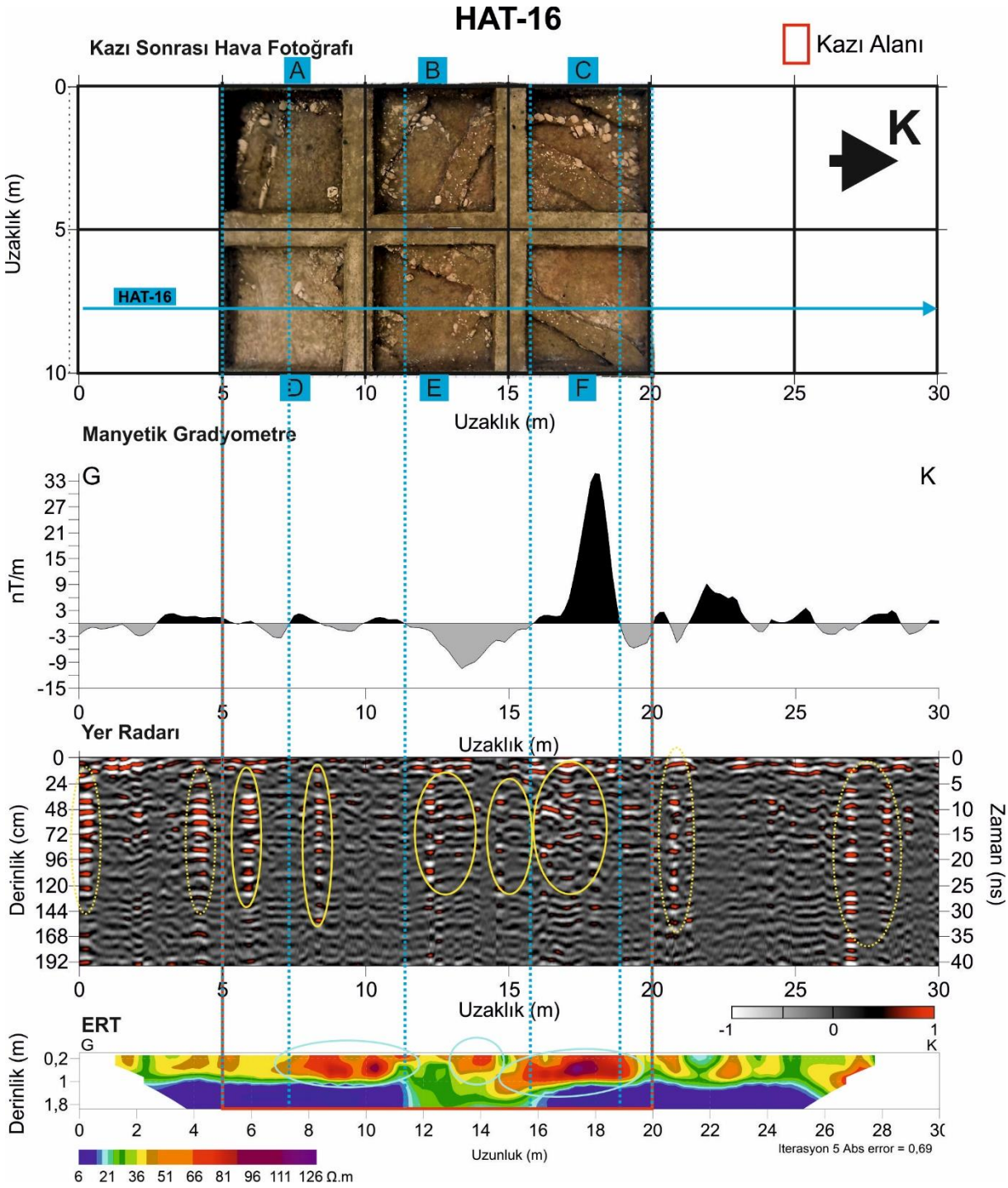
Şekil 4.27: 15 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

15 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 16 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.28'de verilmektedir. D, E ve F açmalarından geçen bu hattın geçtiği alanlarda ızgara planlı mekanlara ait irili ufaklı kaba örgülü taş duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-16'ın manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -15 nT/m ile +33 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Eğride manyetik değeri yükselten değer hattın

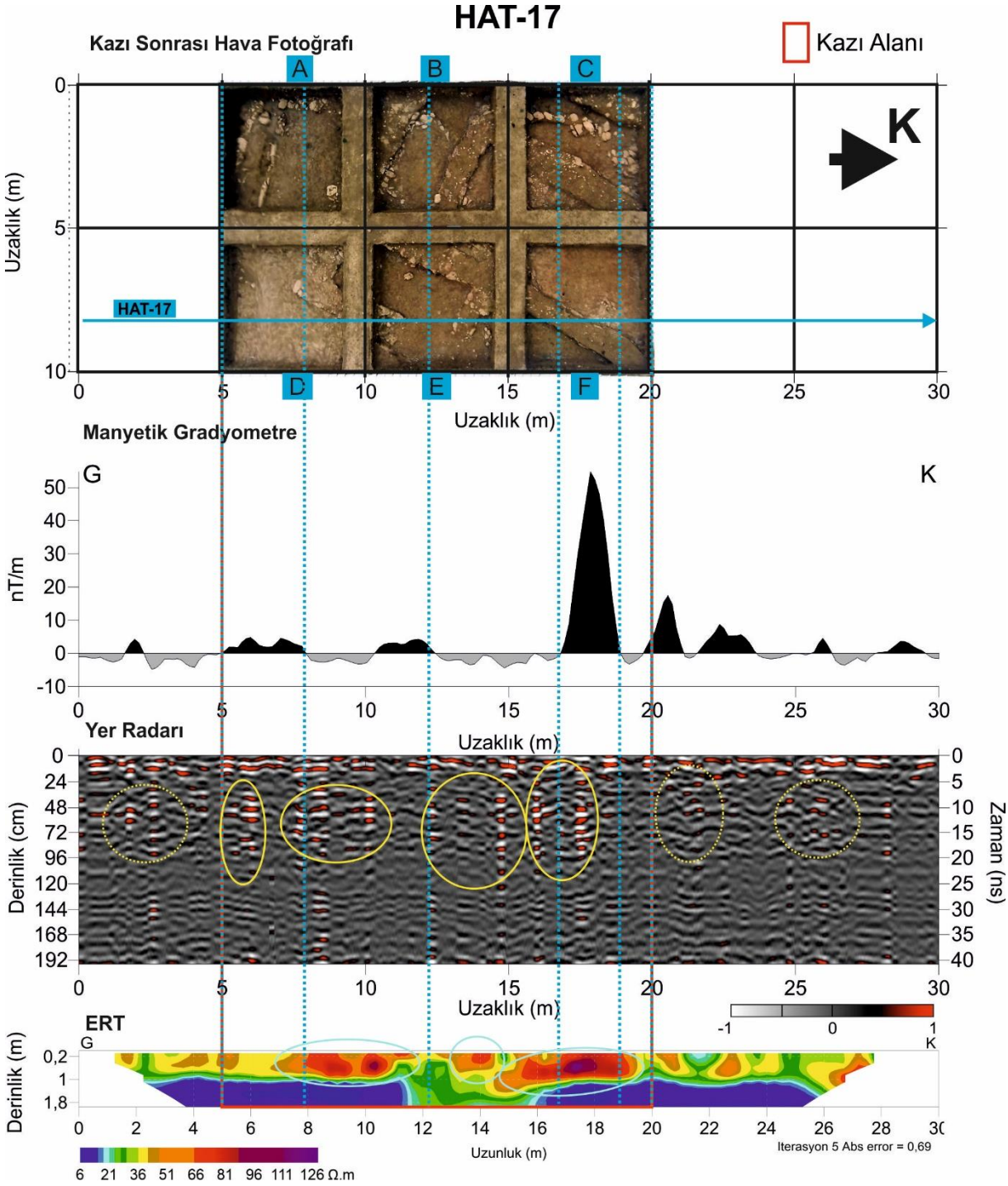
16 ile 20 m arasında görülen yanmaya bağlı oluşan anomalidir. Aynı anomali hem yer radarı hem de ERT modellerinde de görülmektedir. Manyetik grafikte diğer izler ise genelde negatif karakterdedir ve arkeolojik duvarlarla ilişkilidir. Hat-16'ın radargram görüntüsü önceki hatta benzerdir ve izler genelde 120 cm derinliğe kadar devam etmektedir. Arkeolojik yapılarla ilişkili olabileceği düşünülen izler sarı elipsle radargram üzerinde gösterilmiştir. Bu hat üzerinde 10 ile 20 m arasında 3 farklı duvar yapısı ortaya çıkartılmıştır ve radargram bu sonucunu desteklemektedir. Hat-16'ın ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Ancak hattın 11 ile 16 m aralığında bu orta-yüksek resistiviteli tabaka daha derine (modelin sonuna kadar) devam etmektedir. Düşey deformasyona bağlı oluştuğu düşünülen iz bu modelde belirgindir. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla ERT modeli uyumludur. Ancak 14 ile 20 m arasındaki birbirine yakın 2 duvar yapısı tek bir yapı gibi görülmektedir. Arkeolojik yapı izleri mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. F açmasında ortaya çıkartılan yangın geçirmiş duvar yapısı manyetik eğride net bir şekilde görülmektedir. Kazı sonuçları yer radarı ve ERT sonuçlarını da desteklemektedir (Şekil 4.28).

16 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 17 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.29'da verilmektedir. Hattın geçtiği açmalarda ızgara planlı yapı grubuna ait irili ufaklı kaba örgülü duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-17'in manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -10 nT/m ile +50 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Kazı sonrası F açmasında da şiddetli ve yoğun yangın görmüş yapı malzemelerine ulaşılmıştır. Hat boyunca yangından daha az etkilenen kısımlarda duvarlar negatif manyetik değer vermektedir. Hat-17'in radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler bulunmaktadır. Bu hatta izler yaklaşık 96 cm derinliğe kadar devam etmektedir. Radargramda belirlenen izlerden; kazı yapılan alanın dışında kalanlar sarı kesik çizgiliyle, kazı yapılan alanın içinde kalanlar ise düz çizgili sarı elipsle gösterilmiştir. Hat-17'in ERT modeli bir önceki hat ile aynıdır ve kazı sonucuyla büyük oranda uyuşmaktadır. Yapı duvarlarıyla ilişkili izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Manyetik eğride, yangından etkilenen malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak bazı kısımlarda yüksek manyetik değerler görülmektedir. Bunun dışındaki yapı izleri manyetikte negatif özellikteyken, ERT modelinde yüksek resistiviteli anomali olarak görülmektedir. Yer

radarı sonuçlarında da yapı izleri özellikle yapı sınırlarında belirgin olarak görülebilmektedir (Şekil 4.29).



Şekil 4.28: 16 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

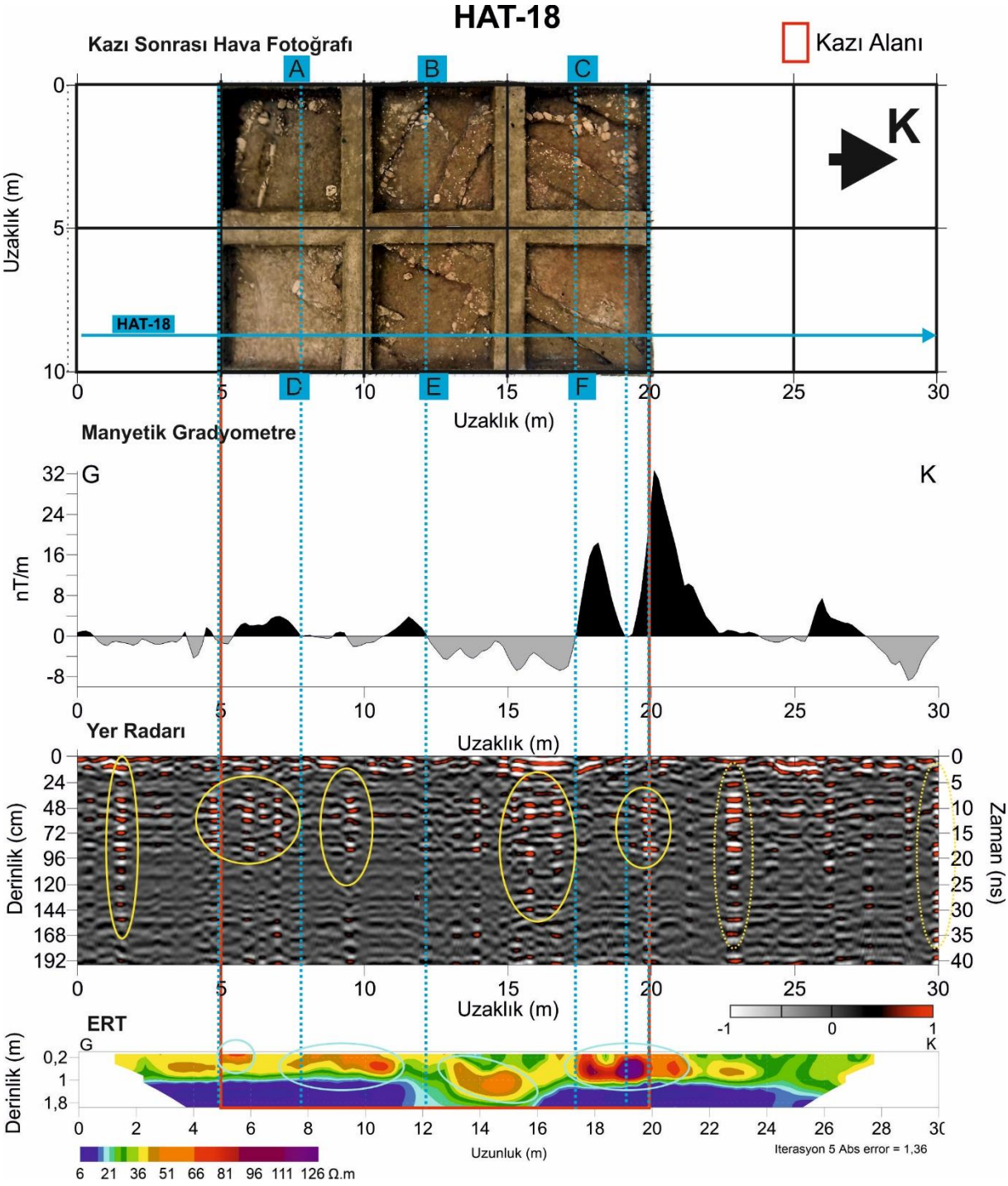


Şekil 4.29: 17 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

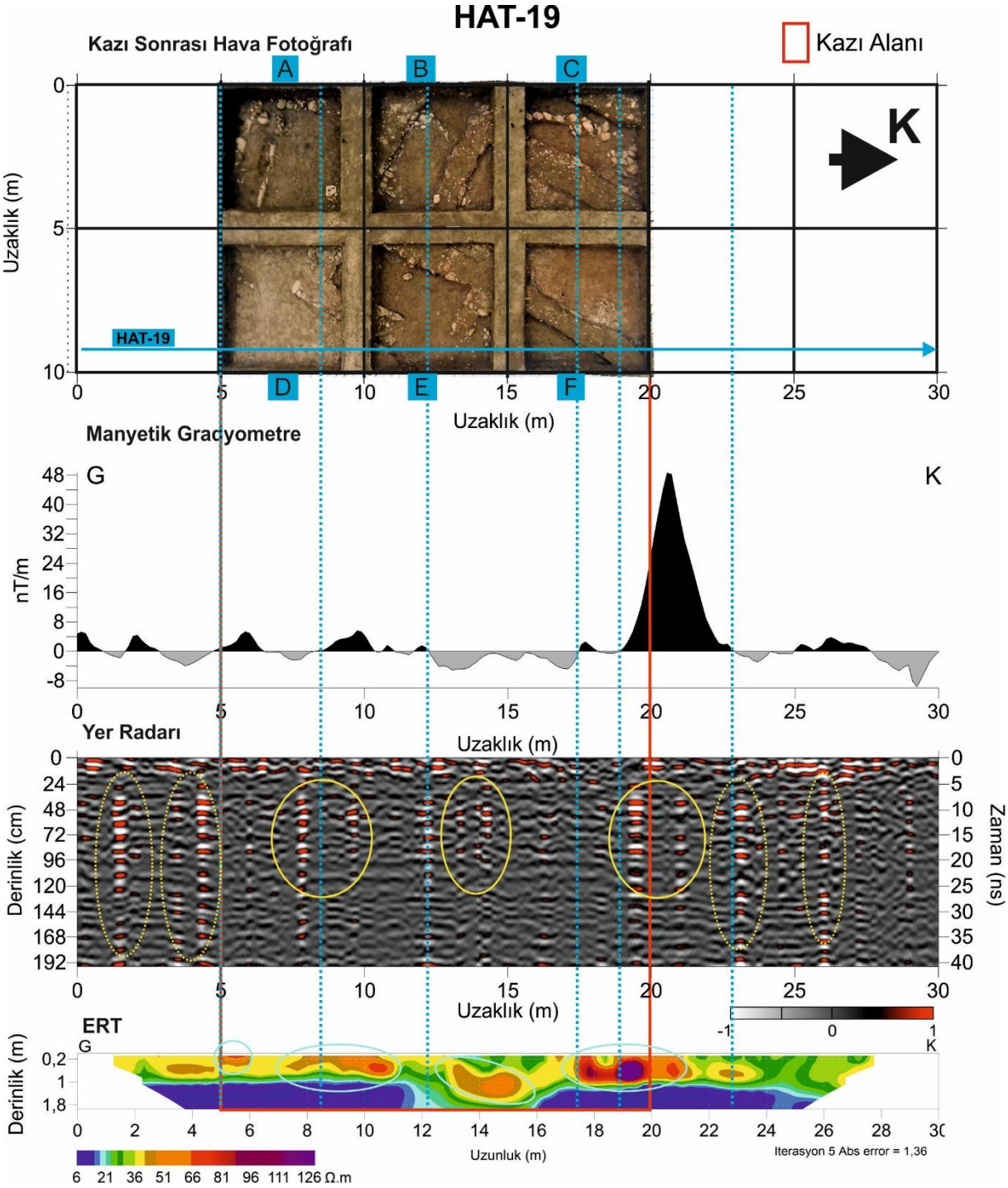
17 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 18 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.30'da verilmektedir. D, E ve F açmalarından geçen bu hattın geçtiği alanlarda ızgara planlı mekanlara ait irili ufaklı kaba örgülü taş duvarlar ortaya çıkartılmıştır. Hat-18'in manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -8 nT/m ile +32 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Hat üzerinde ölçülen en büyük manyetik

değerler hat 18 ile 23 m arasında elde edilmiş olup büyük oranda kazılmayan kısımda kalmaktadır. Hat-18'in radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler görülmektedir. Radargramda belirlenen bu izler sarı elipsle gösterilmiş olup, izler 90 ile 120 cm derinliğe kadar devam etmektedir. Hat-18'in ERT modelinde ise, genelde 1 metre derinliğe kadar orta-yüksek resistiviteli özellikte arkeolojik dolgu görülmektedir. Bunun altında ise düşük resistiviteli olan kil içeriği yüksek ana toprak seviyesi gelmektedir. Ancak hattın 12 ile 16 m aralığında bu orta-yüksek resistiviteli tabaka daha derine (modelin sonuna kadar) devam etmektedir ve deformasyona bağlı oluşan bu durum kültürel dolguda ondülasyona sebep olmaktadır. Bu durum radar izlerinin farklı derinliklere kadar devam etmesini de nedeni olabilir. Kazı çalışmasıyla ortaya çıkartılan arkeolojik yapılarla ERT modelinde yüksek resistiviteli olarak görünmektedir. Modeldeki yüksek resistiviteli izler kazıyla ortaya çıkartılan taş örgülü yapı duvarlarıyla birebir uyuşmaktadır. Bu izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Yüksek manyetik değer F açmasında görülürken, bu alanda yer radarı ve ERT yöntemleriyle de kazı sonuçlarına uyumlu veriler elde edilmiştir. (Şekil 4.30).

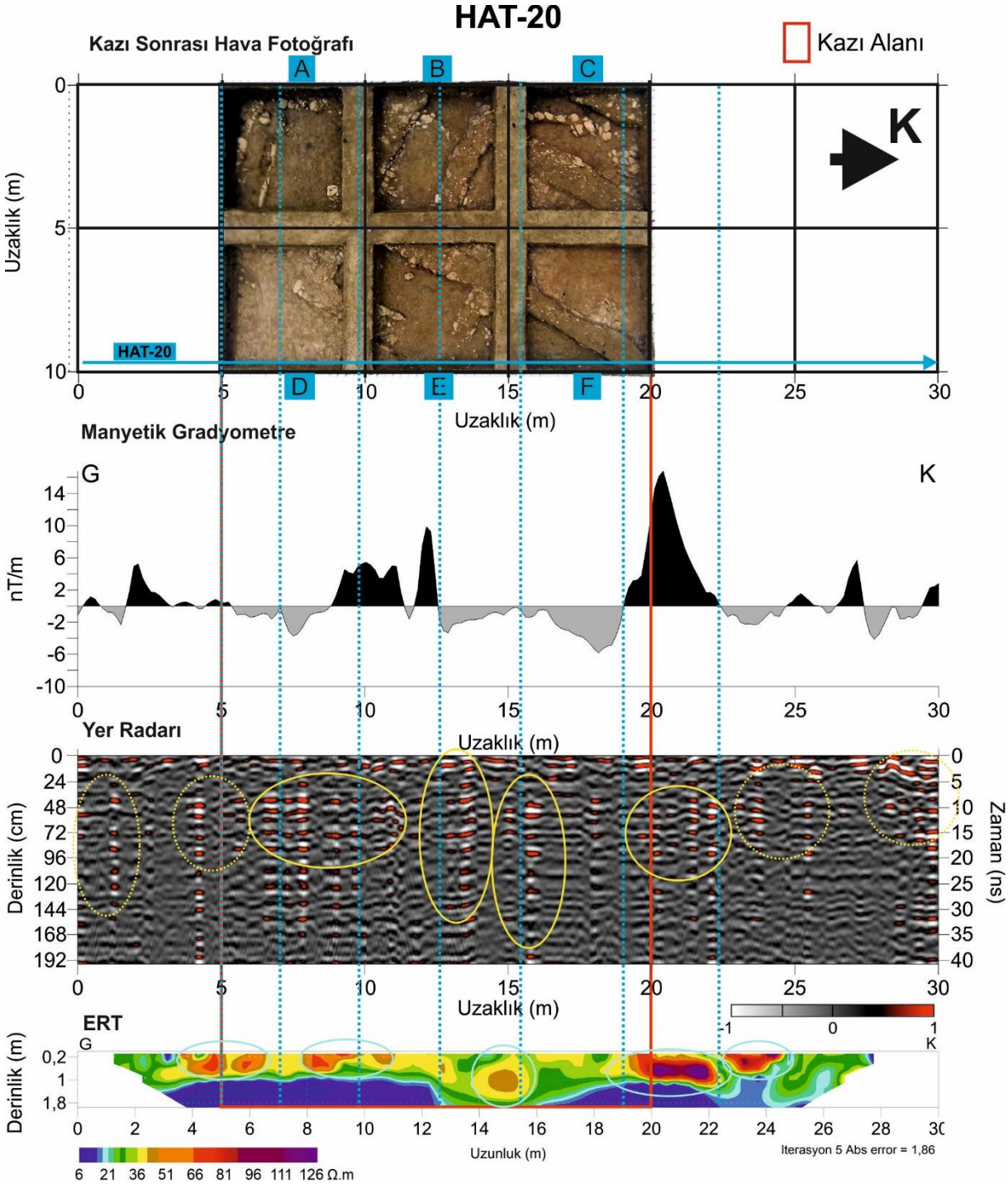
18 nolu hattın 50 cm doğusundan paralel geçen 19 nolu hattın, manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.31'de verilmektedir. D, E ve F açmalarının doğu tarafından geçen bu hat üzerinde birçok yapı kalıntısına ulaşılmıştır. Hat-19'un manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -8 nT/m ile +48 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. En yüksek manyetik değer hattın 20 ile 25 m arasında ve kazı alanı dışında görülmektedir. Hat-19'un radargram görüntüsünde kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu izler bulunmaktadır. Bir önceki radargram ile benzer izler bu hatta da devam etmektedir. Yüksek genlikli izlerin derine doğru uzaması bu radargramdaki izlerin bazılarında da görülmektedir. Hat-19'un ERT modeli bir önceki hat ile aynıdır ve kazı sonucuyla birebir uyuşmaktadır. Yapı duvarlarıyla ilişkili izler mavi elipslerle model üzerinde işaretlenmiştir. Genel olarak; jeofizik modeller, kazı sonuçlarıyla uyumludur. Manyetik eğride, negatif değerler ile ERT modelindeki yüksek resistiviteli ortamlar birbiriyle uyuşmaktadır. Yüksek manyetik değeri olan (yangın geçiren) kısım ise kazı alanının dışında kalmaktadır. Ancak her üç yöntemde bu kısımda anomali vererek birbirini desteklemektedir (Şekil 4.31).



Şekil 4.30: 18 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.



Şekil 4.31: 19 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması**.**

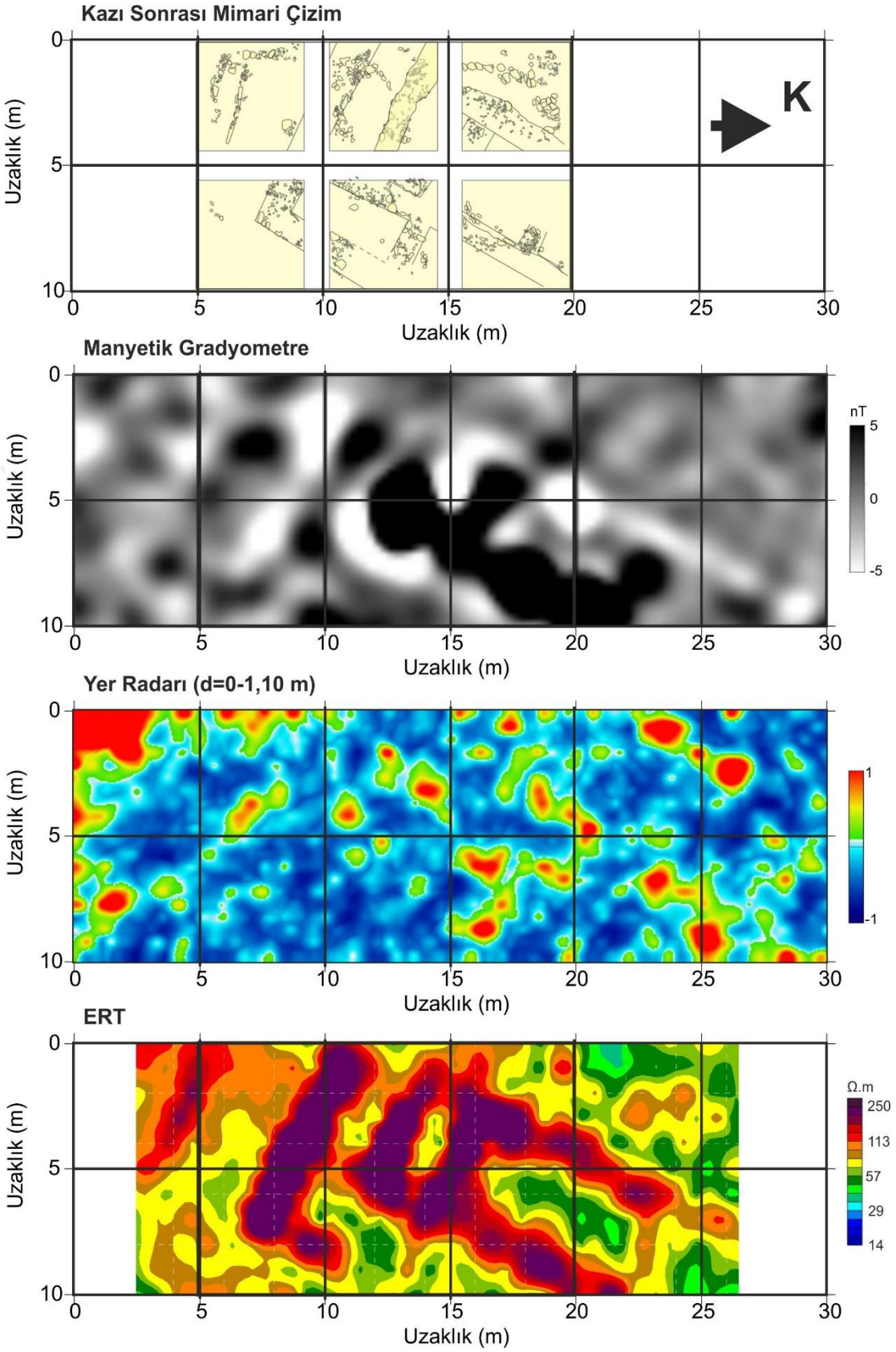


Şekil 4.32: 20 nolu hattın jeofizik verileriyle kazı sonuçlarının tümleşik olarak yorumlanması.

Son hat olan 20 nolu hattın manyetik grafiği, radargram ve iki boyutlu ERT modeli Şekil 4.32'de verilmektedir. Hat-20'in manyetik grafiğinde manyetik değerlerin -10 nT/m ile +16 nT/m arasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Kazılan alan içinde pozitif manyetik değer hattın 9 ile 13 m arasında belirlenmiştir. Bu kısımda yapının iç mekanına karşılık gelmektedir ve yangınla ilişkilidir. Yapı duvarı olmadığı için de bu kısımda yer radarı ve ERT

modeli de belirgin bir anomali vermemiştir. Kazı alanının dışında kalan hattın 20 ile 23 m arasındaki yüksek manyetik değerli anomali, yer radarı ve ERT modeliyle de uyumludur. Bu izlerin yanmış malzemeler içeren arkeolojik yapı duvarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Diğer yapısal izler ise manyetik grafikte negatif değerde, ERT modelinde ise yüksek resistiviteli anomali olarak görülmektedir. Radargram genelde karmaşık özellikte olup, kazıyla ortaya çıkartılan yapılarla uyumlu bazı izler tespit edilmiştir (Şekil 4.32).

Kazı yapılan açmalarda ortaya çıkartılan mimari yapıların çizimleriyle birlikte tümleşik jeofizik çalışmayla elde edilen görüntüler Şekil 4.33'de birlikte verilmiştir. Jeofizik sonuçların karşılaştırılması için 5x5 işleç ile filtrelenmiş alçak geçiş manyetik gradyometre görüntüsü, 0 ile 1,10 m aralığına ait üst üste bindirilmiş (overlay) yer radarı derinlik kesme görüntüsü ve 0,35 ile 1,10 m aralığına ait ERT derinlik kesme görüntüleri bir araya getirilmiştir. Manyetik gradyometre görüntüsünde bir yapının varlığı çok açık biçimde görülmektedir. Özellikle beyaz ile gösterilen negatif anomaliler buradaki kireçtaşı gibi manyetik değeri olmayan birimlere karşılık gelmektedir. Bunlarla ilişkili olan pozitif anomaliler hem bunların iç kısmında yoğunlaşmakta hem de duvarların bazı kısımlarında baskındır. Kazıyla ortaya çıkartılan yapılarda bu izlerin yanmış ve manyetik özellik kazanmış kerpiç materyallerle ilişkili olduğu görülmüştür. Ayrıca B, E ve F açmalarında mekân içlerinde önemli bir yangının varlığını tespit edilmiştir. Bu yapının dışında da benzer yönlü ve düşük genlikli pozitif-negatif izler görülmekle birlikte, buradaki yapıların daha zayıf olduğu görüntüden görülebilmektedir. ERT derinlik kesmesinde ise kırmızı tonlarda yapının uzanımı çok açık olarak görülmektedir. Bu izler genel olarak manyetikteki negatif uzanımlarla ilişkili olmakla birlikte, bazı kısımlarda pozitif izlerle de ilişkilidir. Her iki sonuç birlikte yorumlandığında, yapı yangına uğramıştır. Yapının çevresindeki orta resistiviteli dağılımlar zayıf duvarları ve dağılmış yapı malzemelerini göstermelidir. Alanın yer radar derinlik kesmesi ise genelde zayıf bir dağılıma sahip olmakla izlerin yönelimi ortaya çıkartılan yapılarla uyumludur. Bazı yüksek genlikli izler yapı duvarlarını göstermektedir. Kazılan yapı kalıntılarında içinde kerpiç malzeme içeren taş örgülü yapılar ortaya çıkartılmıştır. Kerpiç malzemenin olduğu kısımlarda yer radarı başarılı sonuçlar vermemiştir. Taş yoğunluğunun fazla olduğu duvar yapılarında daha uyumlu sonuçlar vermiştir. ERT model kesitlerinde görülen düşey yönlü deformasyon da yer radarı sonuçlarını etkileyen başka bir faktördür. Kazılan ilk 70 cm derinlikte bu deformasyonun bazı izlerine rastlanılmıştır. Ancak kazı daha derine devam ettikçe bu izler daha belirgin olarak ortaya çıkacağı düşünülmektedir (Şekil 4.33).

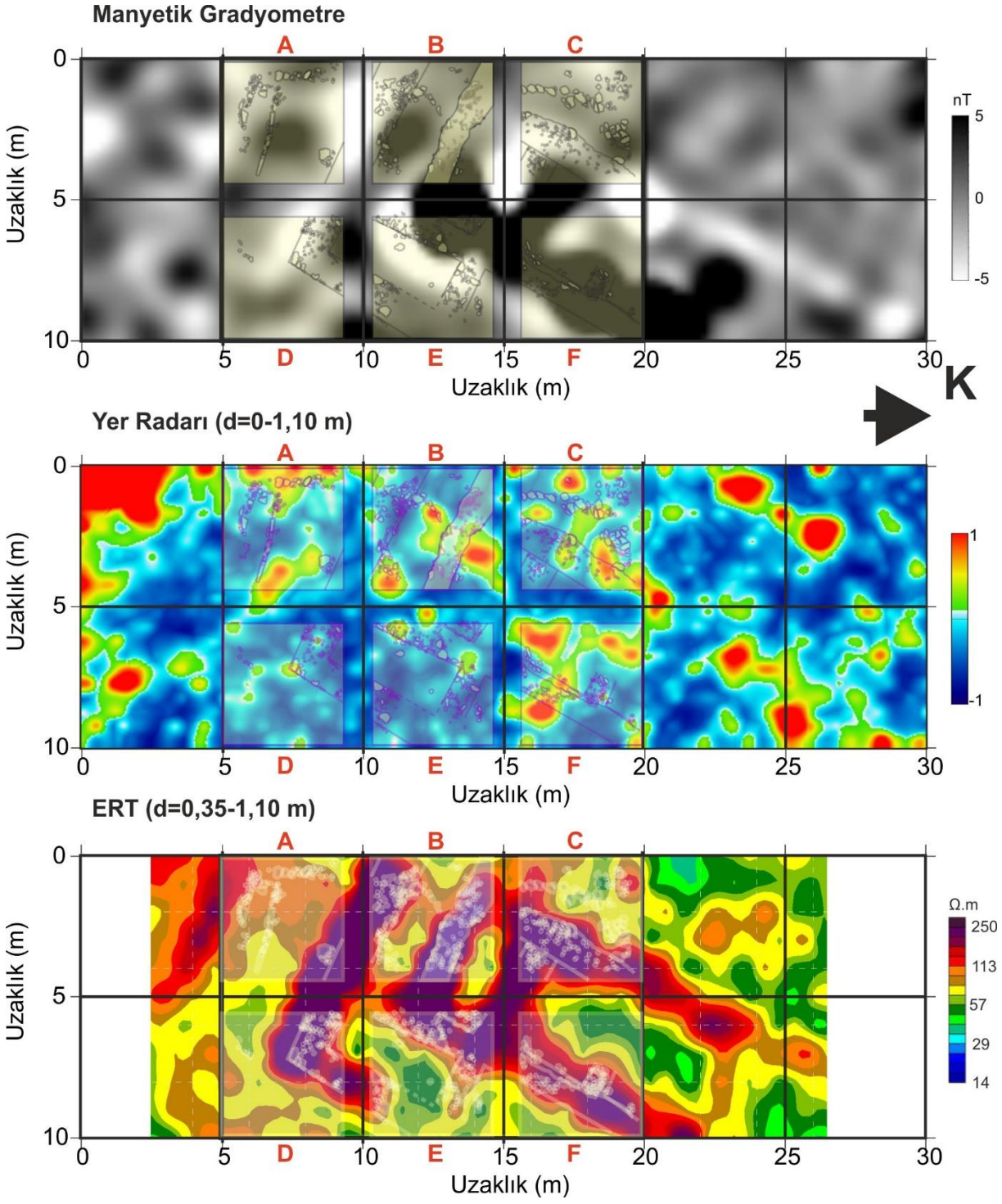


Şekil 4.33: Arkeolojik kazı sonrası ortaya çıkartılan yapıların havadan fotoğrafı ve mimari çizimiyle jeofizik (manyetik gradyometre, yer radarı ve ERT) yöntemlerle elde edilen görüntülerin birlikte gösterimi.

5. TARTIŞMA

Arkeolojik alanlarda jeofizik yöntemlerin kullanımı genelde gömülü yapıları veya objeleri belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Ancak gömülü yapının/nesnenin ve toprağın fiziksel özellikleri bağlı olarak her yöntemle her zaman başarılı sonuçlar elde edilemez. Bu tez çalışması kapsamında araştırma yapılan Şapinuva arkeolojik alanı gibi örtü toprağı ile arkeolojik yapı elemanlarının karmaşık özellikler gösteren alanlarda jeofizik araştırma yöntemlerinin tümleşik uygulanması daha yorumlanabilir ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini bakımından önemlidir. Böylece gömülü arkeolojik yapıların belirlenmesinin yanı sıra belirlenen yapının özellikleri ve maruz kaldığı problemler hakkında bilgi edinmemiz mümkün olabilmektedir (Conyers, 2018). Arkeolojik alanlardaki tümleşik jeofizik uygulamalarda en yaygın olarak manyetik gradyometre, yer radarı ve ERT yöntemleri kullanılmaktadır (Drahor, 2019; Matera ve diğ., 2015; Simyrdanis ve diğ., 2015; Wilken ve diğ., 2015). Jeofizik yöntemlerinin tümleşik olarak uygulanmasıyla elde edilen sonuçların yorumlamayı güçlendirdiği ve güvenirliliği artırdığı bu araştırmalarda vurgulanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların sonuçlarından tümleşik jeofizik uygulamaların önemini ortaya koyan bulgulara ulaşmayı sağlamıştır. Manyetik gradyometre çalışmasıyla, alandaki gömülü arkeolojik yapı duvarlarının kireçtaşı ve benzeri manyetik olmayan özellikte olduğu tespit edilebilmiştir. Ayrıca belirlenen yapı grubunda alanın bazı kısımlarında yanmış bölgelerin varlığı manyetik uygulama ile tespit edilmiş ve kazı sonucunda bu bölgelerde yanmış kerpiç yapı kalıntılarına ulaşılmıştır. ERT modelleriyle kazı sonuçlarıyla neredeyse birebir uyumlu şekilde arkeolojik yapı dağılımları elde edilmiştir. Yer radarı derinlik/zaman kesmelerinde ise diğer yöntemlere kıyasla kazıyla daha az uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Ancak radargram analizleri yapıldığında, kazıyla uyumlu sonuçların elde edildiği görülmüştür (Bölüm 4.5'de detaylar verilmiştir). Bu bölümde yer radarı derinlik/zaman kesmelerinde belirgin olmayan yapı izlerin nedenleri ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Bu bölümde yer radarı derinlik/zaman kesmelerinde belirgin olmayan yapı izlerin sebepleri irdelenmiştir. Bu kapsamda manyetik görüntü, yer radarı 0-1.1 m arasındaki derinlik kesmesi ve ERT 0.35-1.1 m'ye ilişkin derinlik kesme görüntüsü ile üst üste çakıştırılmış kazı çizimi görüntüleri Şekil 5.1'de verilmiştir. Böylece, çakıştırılmış görüntüler üzerinden yer radarı kesmesiyle diğer yöntemlerle elde edilen sonuçları birlikte yorumlanabilmiştir.



Şekil 5.1: Arkeolojik kazı sonrası çekilen hava fotoğrafının manyetik gradyometre, ERT ve yer radarı derinlik kesme görüntüleri üzerine oturtulmuş karşılaştırmalı görüntüleri.

Şekilde 5.1'de üstte, hava fotoğrafıyla manyetik görüntünün üst üste bindirilmiş görüntüsü verilmiştir. Manyetik görüntüde negatif manyetik değeri gösteren beyaz renkli izler ile yüksek genlikli radar izlerinin benzer yönelimdedir Manyetik görüntüde taş örgü duvarlar negatif

özellikte, yanmış kerpiç duvarlar ise pozitif manyetik değerleri gösteren siyah renktedir. C açmasında ortaya çıkartılan GB-KD yönelimli taş örgülü duvar, manyetik görüntüde KD yönüne doğru devam etmektedir. Bu durum yer radarı kesmesiyle de desteklenmektedir. Kesme görüntüsünde bu kısımda benzer yönelimde yüksek genlikli izler görülmektedir. Ancak benzer yönelimdeki yüksek genlikli izler ile beyaz renkli manyetik izlerin tamamıyla örtüşmemektedir. Yer radarı kesmesine benzer yönlü daha fazla iz görülmektedir. Bu durum yer radarı yönteminin yüzey koşullarından (tarımsal sürüm izi vb.) fazla etkilenmesinden kaynaklanabilir (Drahor, 2019). Manyetik görüntüde genelde yangın geçirmiş bölgeyi gösteren siyah izler, yer radarı kesmesinde düşük-orta genlikli kısımlara denk gelmektedir. Şekilde 5.1'de altta, hava fotoğrafı ile ERT kesmelerinin üst üste bindirilmiş görüntüsü verilmiştir. ERT kesmesinde yüksek resistiviteli izler kazıyla ortaya çıkartılan yapı duvarların tamamına yakınıyla birebir uyuşmaktadır. Yer radarı kesmesinde ise manyetikle benzer şekilde C açmasından başlayan GB-KD yönlü yüksek genlikli izle uyumludur. Diğer kısımlarda da bazı uyumlu izler bulunmaktadır. Ancak yer radarı kesmesi ERT kesmesine göre daha dağınıktır ve bu durum yer radarı verilerinin yorumunu güçleştirmektedir.

Yer radarı kesmesinde yüksek genlikli izlerin önemli bir bölümünün kazıyla ortaya çıkartılan taşların yoğun olduğu kısımlara denk gelmektedir. Bu durum yer radarı sonuçlarının kazıyla uyumunu göstermesi bakımından önemlidir. Ancak ortaya çıkartılan yapı kalıntılarına ait taşların boyutları ve yoğunluğu farklılık göstermekte olup, bu durum yer radarı sonuçları olumsuz etkilemektedir. Ayrıca Bölüm 4.4'de detayları verildiği üzere ortaya çıkartılan yapı kalıntılarının başlangıç kot derinlikleri birbirleri arasında farklılık göstermektedir. Bu durum depreme bağlı oluşan düşey deformasyonu düşündürmektedir. Kent çevresinin tektonik yapısı (Bölüm 3.2'de detayları verilmiştir) ve ERT sonuçları ile radargramdaki bazı izler de bu durumu desteklemektedir. Ayrıca alanda deprem izinin net bir şekilde görüldüğü ve G Binası olarak adlandırılan yapı kalıntısında düşey deformasyon izleri belirgin olarak tespit edilmiş ve belgelendirilmiştir (Şekil 3.21). Elde edilen tüm bu bulgular, kazı çalışmaları tamamlandığında benzer durum çalışma alanımız olan H Binasında da geçerli olacağına dair önemli bilgiler içermektedir. Radargramlarda görülen arkeolojik izlerin, kesme görüntülerinde manyetik ve ERT sonuçlarına aykırı bir şekilde karmaşık bir dağılım vermesinin en önemli sebebinin bu düşey deformasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Arkeolojik alanda uygulanan yer radarı yönteminin sonuçlarının yorumları genelde derinlik/zaman kesme görüntüleri üzerinden yapılır (Seren vd., 2004; Neubauer vd., 2002;

Donati vd., 2017; Vafidis vd., 2005). Bu durum birçok arkeolojik alan için problem oluşturmaz. Hatta arkeolojik alanın mimari planı ve gömülü yapı dağılımımın yorumlanabilmesi için yapılması gereken bir görüntüleme şeklidir. Ancak bu çalışmada görüldüğü üzere Şapinuva gibi toprak ile yapı elemanlarının karmaşık özellik gösterdiği ve depreme bağlı deformasyon etkisinin görüldüğü alanlarda yorumlama sadece derinlik/zaman kesmeleri üzerinden değil, aynı zamanda radargramlar üzerinden yapılması gerekmeği bu çalışmayla ortaya çıkartılmıştır. Ayrıca bu çalışmayla birden fazla yöntemle çalışmanın (tümleşik çalışmalar) arkeolojik alana ilişkin gömülü yapıların yorumlanmasına önemli katkılar sunduğu görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yeraltında gömülü arkeolojik yapılar ile bu yapılarla ilişkili bağlamın (konteks) hasar vermeyen tekniklerle belirlenmesi için dünyada en yaygın kullanılan araştırma metodolojisi jeofiziktir. Ancak bu yöntemle her zaman başarılı sonuçlar elde edilemez. Başarısız sonuçların nedenleri arasında önemli bir yer tutan faktör depremdir. Birçok önemli arkeolojik yerleşmelerin bulunduğu coğrafyamız aynı zamanda önemli aktif faylarla kuşatılmış durumdadır. Buna bağlı olarak bu arkeolojik yerleşmelerin tarihsel depremler yüzünden yıkıldığı veya büyük zararlar gördüğü bilinmektedir. Birçoğu arkeolojik yerleşmelerin üzerinde kurulan günümüz kentleri de deprem yüzünden büyük yıkımlara maruz kalmaktadır. Çalışma alanı olan Şapinuva arkeolojik alanı da Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun önemli bir bağlantısı olan Amasya Makaslama Zonu içerisinde bulunmaktadır. Alanın yakınında aktivitesi tam bilinmeyen MTA diri fay haritasında Holosen olarak gösterilen Sungurlu fayı yer almaktadır. Bu durum Hitit devletlerine başkentlik yapmış olan Şapinuva kentini olumsuz etkilemiştir. Antik kentte yapılan kazı ve arkeosismolojik çalışmalar sonucunda kentin yapılarında deprem(lere) bağlı önemli deformasyon izlerinin olduğunu tespit edilmiş ve kentin gelişiminde depremlerin etkileri hakkında önemli bulgular ortaya çıkarmıştır.

Jeofizik yöntemlerin arkeolojik alanlarda başarılı sonuçlar vermesi için önemli diğer başka faktör fiziksel koşullardaki değişimlerdir. Gömülü arkeolojik yapıyla onu örten toprak arasında yeterli düzeyde fiziksel kontrast (zıtlık) olması gerekmektedir. Manyetikte bu kontrast manyetik özelliği olmayan kireçtaşı gibi malzemeden yapılmış duvarlar ile yanmaya uğrayarak ısıl kalıcı manyetizasyon gösteren yanık kerpiç, ocak, fırın gibi yapılarda görülmektedir. Bu olgu ERT yönteminde iletken ya da dirençli kısımlar arasındaki zıtlığa bağlıyken, yer radarında ise ortamdaki bağıl dielektrik geçirgenlik (permittivity), elektriksel iletkenlik ve manyetik geçirgenlik (permability) gibi değişkenlere bağlıdır. Yer radarı araştırmalarında genelde ihmal edilen manyetik geçirgenlik değişkeni yangına uğrayan arkeolojik tabakaların bulunduğu alanlarda etkilidir. Bu nedenlerden dolayı, bir arkeolojik alanda uygulanan bir jeofizik yöntem başarılı sonuçlar elde edilirken, başka bir yöntem yeterli başarıyı gösteremeyebilir. O yüzden çalışma alanı olan Şapinuva arkeolojik alanı gibi örtü toprağı ile arkeolojik yapı elemanlarının

karmaşık özellik gösterdiği alanlarda ise jeofizik araştırma yöntemlerinin tümleşik uygulanması daha yorumlanabilir ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi bakımından önemlidir.

Tümleşik jeofizik uygulamalarıyla yer radarı verilerinin yorumunun arkeolojik bağlamın karmaşık olduğu ortamlarda geliştirmek amacıyla yapılan bu tez çalışmasının saha araştırmaları Çorum ili, Ortaköy ilçesinin yaklaşık 2 km güneybatısında bulunan Şapinuva arkeolojik alanında gerçekleştirilmiştir. Özel bir firma tarafından kazı çalışmaları kapsamında 2012 ile 2018 yılları arasında yaklaşık 10.7 ha alanda yapılan geniş-ölçekli manyetik gradyometre çalışmaları sonuçlarından belirlenen 10x30 m boyutlarındaki bir alan bu çalışma için seçilmiştir. Seçilen alanın manyetik gradyometre verileriyle birlikte ERT ve yer radarı çalışmaları da tümleşik olarak uygulanmıştır. Yer radarı çalışması, merkez frekansı 400 MHz anten kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm veriler değerlendirildikten ve yorumlandıktan sonra 5x5 m boyutlarında açılan altı arkeolojik açmada arkeolojik kazı çalışmaları Şapinuva kazı ekibi tarafından yapılmıştır. Ortaya çıkartılan arkeolojik yapı kalıntılarına her açmada farklı derinliklerde ulaşılmış olup, yaklaşık 70 cm derinliğe kadar kazılar yapılmıştır. Kazı çalışmaları mekanların iç kısımlarında derinleşmek suretiyle gelecek kazı sezonlarında devam edecektir. Ancak bu tez kapsamında ilk elde edilen kazı sonuçlarından yararlanılabilmiştir.

Kazı ve tümleşik jeofizik sonuçlarının birlikte irdelenmesiyle jeofizik verilerin arkeolojik olarak yorumlanmasında önemli gelişmeler sağlanmıştır. Kazı sonuçlarında ortaya çıkan yapıların mimari planıyla çok uyumlu manyetik gradyometre ve ERT görüntüleri elde edilmiştir. Yer radarı yönteminde ise derinlik kesme görüntüleri çok uyumlu sonuçlar ortaya koymasa da arkeolojik bağlam ile ilişkili yorumlar radargramlar üzerinde yapılarak arkeolojik bağlamda deformasyonlara bağlı olarak yapılarda ortaya çıkan zaman-mekan kaymaları ile ilişkili sorunlar çözülebilmiştir. Manyetik gradyometre çalışmasıyla alanda önemli düzeyde yangının varlığını ortaya koyan bulgularla karşılaşılmıştır. Özellikle pozitif 60 nT/m değerine ulaşan yüksek değerli manyetik veriler yangının şiddetli olduğu kısımları vermiştir. Yanmaya bağlı oluşan yüksek pozitif manyetik değerler genelde yapıların iç kısımlarında yoğunlaşmıştır. Kazılarda bu kısımda yanmış ve yıkılarak dağılmış kerpiç duvarlarıyla karşılaşılmıştır. Kireçtaşı ve konglomeralar kullanılarak yapılan örgülü sistem taş duvarlarda ise kullanılan malzeme manyetik özelliğe sahip olmadığından, manyetik görüntülerde negatif izler şeklinde gözükmektedir. İki-boyutlu ERT modellerinde ve derinlik kesme görüntülerinde bu duvar yapıları belirgin bir şekilde tespit edilmiş ve kazılan kısımda ortaya çıkan yapı grubunun mimari

planıyla neredeyse birebir uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Yer radarı verilerinin değerlendirilmiş radargram görüntülerinde yaklaşık 1 metre derinliğe kadar olan kısımda kireçtaşı ve konglomeralar kullanılarak yapılan örgü taş duvarlarla uyumlu izler tespit edilmiştir. Taş yoğunluğunun fazla olduğu duvar yapılarında radar izlerinde daha belirgin sonuçlara ulaşılmıştır. Yer radarı derinlik kesme görüntülerinde ise karmaşık izler baskındır. Yer radarı yönteminin yüzey koşullarında diğer yöntemlere kıyasla daha fazla etkilenmesi bu çalışma için radar yanıtlarını etkileyen olumsuz faktörlerdendir. Ayrıca çalışma alanının toprak yapısı, yüksek kil oranı ve hacimsel su içeriğine sahip bir zemin özelliğindedir. Yer radarı kesmelerindeki bazı izlerin yüzeyden başlayıp derine doğru uzama yapması bu iki durumla ilişkili olmalıdır.

Yer radarı verilerinin yorumunun geliştirilmesi için öncelikle jeofizik verilerin toplandığı her bir hat ayrı olarak irdelenmiş ve kazı sonuçlarıyla birlikte karşılaştırılmıştır. Böylece hangi koşullarda manyetik, ERT ve yer radarı anomalilerin kazıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Manyetik eğrilerde pozitif manyetik izlerin önemli bir bölümü yangına maruz kalmış yapı elemanları ile ilişkilidir. Yangının yoğunluğuna bağlı olarak manyetik değerler artmaktadır. Elde edilen sonuçlar yangın geçirmiş kerpiç duvarlar, ocak, fırın vb gibi yapı elemanlarında elde edilecek manyetik değerin genliğine bağlı olarak yapının yangından etkilenme düzeyini belirleyeceğinden, bu tür alanlarda arkeolojik bağlamın yangın etkisini ortaya koymak anlamında manyetik yöntemin önem taşıdığı görülmüştür. ERT verilerinde yüksek resistiviteler yapıların taş örgülü duvarlarında görülürken, toprak olan ve kerpiçli kısımlarda toprağın nem içeriğine bağlı olarak düşük resistiviteli değerlere ulaşılmıştır. Yöntemin rezolüsyonu diğer yöntemlere kıyasla az olmasından dolayı bir açmada ortaya çıkan künk boru ERT modellerinde görülememektedir. Oysa manyetik analizlerde yaklaşık 3 ile 4 nT/m düzeyinde pozitif izlerle bu boru bulunduğu lokasyonda eğriler üzerinde açıkça belirlenebilmektedir. Çalışma alanında elektriksel olarak uygun zıtlıkların bulunması ERT çalışmasının başarısını artırmıştır. Özellikle yöntemin yüzey koşullarında diğer yöntemlere göre daha az etkilenmesi yöntemin başarısında önemli olmuştur. Yer radarı radargramları ile 2-boyutlu ERT modelleri genelde birbiriyle uyum izler verirken, bu uyum manyetikte genellikle negatif özellikteki izlerde ortaya çıkmıştır. Radargramlarda yapı izleri yüksek genlikli yansıma izleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu izler duvardaki taş yoğunluğuna bağlı olarak bazı duvarlarda daha belirgindir. Ancak yapı izlerine ilişkin anomalilerin farklı derinliklerde görülmesi dikkat çekici önemli bir bulgudur. Bu durum 2-boyutlu ERT modellerinde de görülmekle birlikte, yöntemin rezolüsyonuyla ilgili

olarak daha az belirgindir. Bu durum kazı sonuçlarıyla da uyumludur. Altı farklı açmada gerçekleştirilen kazılarda ortaya çıkartılan yapıların kot derinliklerindeki değişimler bu durumun sebebinin depreme bağlı oluşan bir düşey deformasyon olgusuna bağlı olduğunu düşündürmektedir. Şapinuva'da önceki yıllarda yapılan kazı çalışmalarında ortaya çıkartılan diğer yapılarda da önemli derecede deprem izlerine rastlanılmıştır. Özellikle çalışma alanının yakınında bulunan ve aynı zamanda arkeosismolojik çalışmaların yapıldığı G binasında bu deprem izleri çok belirgindir ve yapılan çalışmalarla belgelenmiştir (Drahor ve diğ., 2023). Çalışma alanımız olan H binası olarak adlandırılan yapıda da benzer bir etkinin olduğu özellikle yer radarı verilerinden elde edilen radargramlarda açıkça görülmektedir. Ayrıca radargramlarda yapı duvarları üzerinde görülen difraksiyon (saçılma) izlerinin bu deformasyonlarla ilgili olabileceği de düşünülmektedir. Radargramların birleştirilmesiyle oluşturulan derinlik/zaman kesme görüntülerinin kazıyla ortaya çıkartılan yapıyla uyumunun zayıf olmasının da yeraltında deformasyona bağlı olarak ortaya çıkan ötelenmeye bağlı olarak farklı derinliklere ve lokasyonlara saçılan yapıların dağılımıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. H binasındaki kazı çalışmaları tamamlandığında buradaki olgu sonuçların yorumu için daha net bir durumu ortaya çıkaracaktır.

Bu çalışmayla arkeolojik alanlarda karmaşık ve deformasyona uğrayan arkeolojik bağlamlarda jeofizik araştırmaların tümleşik olarak gerçekleştirilmesinin önemli olduğu ve yorumlamayı güçlendirdiği tez kapsamında yapılan karşılaştırılmalı analizler ve kazı sonuçlarıyla ortaya konmuştur. Manyetik yöntemin diğer yöntemlerden farklı olarak özellikle yangın geçirmiş ortamları belirlemede önemli olduğu bilinmektedir ve bu çalışmada da bu olgu açıkça tanımlanmıştır. ERT yönteminin ölçüm hızı ve rezolüsyonu diğer yöntemlere kıyasla daha az olmasına rağmen böylesi ortamlarda neredeyse kazı sonuçlarıyla birebir uyumlu sonuçlar edilebileceği görülmüştür. Diğer yöntemlere kıyasla yüksek rezolüsyonlu sonuçlar vermesi ve uygulanabilirlik kolaylığı bakımında arkeolojik alanlarda yaygın olarak kullanılan yer radarı yönteminde özellikle yalnızca derinlik/zaman kesme görüntüleri üzerinden yorumlama yapmanın sakıncaları net olarak belirlenmiştir. Arkeolojik yorumlamanın değerlendirilmiş radargram üzerinden diğer yöntemlerle karşılaştırılarak yapılmasının yorumlamada başarı şansını önemli oranda artırdığı görülmüştür. Alanda deprem etkisine bağlı olarak yapılarda ortaya çıkan yatay ve düşey yönlü yer değiştirmelerin diğer yöntemlere kıyasla yer radarı verilerini önemli ölçüde etkilediği ve yorumu güçleştirdiği ve böylece başarı oranını etkilediği görülmüştür. Ancak deformasyon etkilerinin yapılacak radargram analizleri ve

yorumlamalarıyla çözülebileceği bulgusuna erişilmiştir. Böylece deprem dışında toprak kayması, zemin oturması ve benzeri etkenlere bağlı olarak arkeolojik yapı elemanlarında oluşacak yatay ve düşey yönlü yer değiştirmelerden kaynaklı deformasyonların etkilediği alanlarda yapılacak yer radarı çalışmalarında zaman/derinlik kesmelerinden ziyade, radargram analizlerinin yorumlamada daha önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Aitken, M. J., 1974, Physics and Archaeology, Oxford, Clarendon.

Albora, A.M., 2020, Image Processing on Ruins of Hitite Civilization Using Random Neural Network Approach, Journal of Scientific and Engineering Research, 7(3):196-205.

Albora, A.M., Hisarlı, Z.M., Uçan, O.N., 2004, Application of Wavelet Transform to Magnetic Data Due to Ruins of Hittite Civilization in Turkey, Pure and Applied Geophysics, (161):907-930.

Annan, A. P., 2001, Ground penetrating radar workshop notes, Mississauga, Ontario, Sensors and Software Inc.

Annan A.P., 2008, Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. H.M. Jol, (Ed), Ground Penetrating Radar: Theory and Application (3-38), Elsevier. Part 1, 4-38.

Barka, A.A., Kadinsky-Cade, K., 1988, Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. Tectonics, 7(3), 663-684.

Berge, A.B., 2011, Elektrik Özdirenç Ters-Çözümüyle Çok Katmanlı Arkeolojik Yerleşmelerin Görüntülendirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bevan, B. and Kenyon, J., 1975, Ground-penetrating radar for historical archaeology, MASCA

Newsletter, Vol. 11, No. 2, pp. 2–7.

Bevan, B.W., 1977, Ground-penetrating radar at Valley Forge, Geophysical Survey System, North Salem, New Hampshire.

Bristow, C.S., Chroston, P.N. and Bailey, S.D., 2000, The structure and development of foredunes on a locally prograding coast: Insights from ground penetrating radar surveys, Norfolk, England. Sedimentology, Vol. 47, pp. 923–944.

Cassidy, N. J., 2001, The Application of Mathematical Modelling in the predominantly controlled by the magnetic losses. In addition, Interpretation of Ground Penetrating Radar Data. Thesis (Ph.D.), Keele University.

Conyers, L.B. 2018, Ground-penetrating Radar and Magnetometry for Buried Land-scape Analysis, Springer, Switzerland, ISSN:2211-4165.

Conyers, L.B., Connell, S., 2007, The applicability of using ground-penetrating radar to discover and map buried archaeological sites in Hawaii. Hawaiian Archaeology Journal, Vol. 11, pp. 62–77.

Conyers, L.B., Cameron, C.M., 1998, Ground-penetrating radar techniques and three-dimensional computer mapping in the American Southwest. Journal of Field Archaeology, vol. 25, pp. 417–430.

Conyers, L.B., Goodman, D., 1997, GPR: An introduction for archaeologists: Walnut Creek, CA, Alta Mira Press, pp. 232p.

Daniels, D.J. 2004, Ground Penetrating Radar (2nd Edition, Institution of Engineering and Technology (The IET), United Kingdom, ISBN:978-0-86341-360-5.

Donati, J.C., Sarris, A., Papadopoulos, N., Kalaycı T., Simon, F.X., Manataki, M., Moffat, I., García, C.C., 2017, A Regional Approach to Ancient Urban Studies in Greece Through Multi-Settlement Geophysical Survey, Journal of Field Archaeology, 450-467.

Doolittle, J.A., Minzenmayer, F.E., Waltman, S.W., Benham, E.C., Tuttle, J.W., and Peaslee, S., 2007, Ground penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States: Geoderma, 141/3–4, 416–421.

Drahor, M.G., Berge, M.A., 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, 2231-2242.

Drahor, M.G., Sümer, Ö., Berge, M.A., Öztürk, C., Ongar, A., Süel, A., Schachner, A., 2023, Integrated Geoscience Investigations in Hittite Imperial Sites Affected by Earthquakes, Sustainable Conservation of UNESCO and Other Heritage Sites Through Proactive Geosciences, El-Qady, G., Margottini, C., (ed), Springer, ISSN: 2197-9545.

Drahor, M.G., Öztürk, C., Ongar, A., Berge, M.A., 2016. Applications of the GPR Technique to indoor, bridge deck and pier structures: case studies in Turkey. Near Surface Geophysics. 14, 156-169.

Drahor, M.G., Berge, M.A., Öztürk, C., Ortan, B., 2015. Integrated geophysical investigations at a sacred Hittite Area in Central Anatolia, Turkey. Near Surface Geophysics. 13, 523-543.

Drahor, M.G., 2005, Arkeolojik Prospeksiyon, Arkeoloji Sanat Yayınları, ISBN: 13004514-119.

Drahor, M.G., 2006, Arkeolojik Alan İncelemelerinde Manyetik Prospeksiyon, Arkeoloji Sanat Yayınları, ISBN: 13004514-123.

Drahor, M.G., 2007a, Arkeolojik Alan İncelemelerinde Yer Radarı Prospeksiyonu, Arkeoloji Sanat Yayınları, 125, 107-125.

Drahor, M.G., 2007b, Arkeolojik Alan İncelemelerinde Özdirenç Prospeksiyon, Arkeoloji Sanat Yayınları, ISBN:13004514-124.

Drahor, M.G., 2019, Integrated Geophysical Investigations in Archaeological Sites: Case Studies from Turkey, Archaeogeophysics, El-Qady, G., Metwaly, M., (ed), Chapter 2, Springer, ISBN: 978-3-319-78861-6, p27-68.

Ercan A., Temizsöz İ., 1998, 10x10 Metrelik Birim Kazı Peteğinde, Jeofiziğin Arkeolojik kazıya Klavuzluğu: Hitit İmparatorluğu Dönemi, Külhöyük, Ankara, Jeofizik, TMMOB jeofizik Mühendisleri Odası Sürekli Yayınları, 12, 35-51.

Erturaç, M.K., Tüysüz, O., 2012, Kinematics and basin formation along the Ezinepazar-Sungurlu fault zone, NE Anatolia, Turkey. Turkish Journal of Earth Science, 21(4), 497-520.

Eski Ahlat Şehri Kazı Başkanlığı, 2013, Bitlis Eski Ahlat Şehri Mezarlığı Jeomanyetik ve Jeoradar Araştırma Raporu, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü.

Goodman, D. and Nishimura, Y., 1993, Ground radar view of Japanese burial mounds. Antiquity, Vol. 67, pp. 349–354.

Goodman, D., Nishimura, Y., Roger, J.D., 1995, GPR time slices in archaeological prospection. Archaeological Prospection, Vol. 2, pp. 85–89.

Goodman D., Salvatore P., Yasushi N., Kent S., Hiromichi H., Noriaki H., John S., and Brian D., 2009, GPR Archaeometry. In Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, edited by Harry M. Jol, pp. 479-508. Elsevier, Amsterdam.

Griffiths, D. J., 1989, Introduction to electrodynamics: Prentice-Hall, Inc.

Griffiths D.H., Barker R.D., 1993, Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. Journal of Applied Geophysics, 29, 211-226.

Hasankeyf Kazı Başkanlığı, 2013, Hasankeyf Arkeolojik Kazısı Jeomanyetik ve Jeoradar Araştırma Raporu, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü.

Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D., Annan, A.P., 2003, Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review, Vadose Zone Journal, Vol. 2, pp. 476–491.

Hulsmeyer, C., 1904, German Patent Number 165546.

Kanlı, A.İ., Taller, G., Nagy, P., Tildy, P., Pronay, Z., Toros, E., 2015. GPR survey for reinforcement of historical heritage construction at fire tower of Sopron, Journal of Applied Geophysics, 112, 79-90.

Kanlı, A.İ., Pronay, Z., Tildy, P., Toros, E., Neducza, B., Nagy, P., 2018. Integrated geophysical survey on the ancient Deák Ferenc Sluice of Hungary. Acta Geophysica. 66, 1397-1411.

Karadenizli L., 2011, Oligocene to Pliocene palaeogeographic evolution of the Çankırı-Çorum Basin, central Anatolia, Turkey, Sedimentary Geology, 237 1–29.

Klein, K.A., Santamarina, J.C., 2003, Electrical conductivity of soils: Underlying phenomena. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 8, No. 4, pp. 263–273.

Kvamme, K.L., 2001, Current practices in archaeogeophysics: Magnetics, resistivity, conductivity,and ground-penetrating radar, in Goldberg, P., Holliday, V.T. and Ferring, C. R., eds., Earth Sciences and Archaeology: New York, Kluwer/Plenum Publishers, pp. 353–382.

Kvamme, Kenneth L., 2003, Geophysical surveys as landscape archaeology. American Antiquity 68: 435-457.

Leckebusch, J., 2000, Two and three-dimensional ground-penetrating radar survey across a medieval choir: a case study in archaeology, Archaeological Prospection, p189-200.

Leckebusch J., 2003, Ground-penetrating radar: a modern three-dimensional prospection method, Archaeological Prospection, 10, 213–240.

Leucci, S., 2002, Ground-penetrating radar survey to map the location of buried structures under two churches, Archaeological Prospection, 217-228.

Linford N., Linford P., Payne A., 2015, Chasing aeroplanes: developing a vehicle-towed caesium magnetometer array to complement aerial photography over three recently surveyed sites in the UK. Near Surface Geophysics, p623–631.

Loke M.H., Barker R.D., 1996a, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.

Loke M.H., Barker, R.D., 1996b, Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques. Geophysical Prospecting, 44, 499-524.

Lowy, H., 1911, German Patent Number 254517.

Lucius, J.E., Olhoeft, G.R., Hill, P.L. and Duke, S.K., 1992, Properties and hazards of 108 selected substances -1992 Edition, U.S. Geological Survey Open-File Report 92-527.McNeill, J. D., 1980. Electrical conductivity of soils and rock. Technical Note TN-5. Geonics Limited, Mississauga, Ontario.

Matera L., Noviello M., Ciminale M., Persico R., 2015, Integration of multisensor data: an experiment in the archaeological park of Egnazia (Apulia, Southern Italy), Near Surface Geophysics, 13:613–621.

Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S.S., Melichar, P., 1999, Integrated geophysical prospection of Roman Villas in Austria, in Archaeological Prospection, 3rd International Conference on Archaeological Prospection, Munich, Sept., Bayerisches Landesamt fur Denkmalpflege, pp. 62–64.

Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., Melichar, P. 2002. Georadar in the roman civil town Carnuntum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data, Archaeological Prospection, 9, 135-156.

Nyari, Z., Kanlı, A.I., 2007. Imaging of buried 3D objects by using electrical profiling methods with GPR and 3D geoelectrical measurements. Journal of Geophysics and Engineering. 4, 83–93.

Öztürk, C., 2013, Yeraltına Nüfuz Eden Radar (YNER) Modellemesinde Işın İzleme ve FDTD Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Pérez-Gracia, V., Caselles, O., Clapés, J., Osorio, R., Canas, J. A., Pujades L. G., 2009, Radar exploration applied to historical buildings: a case study of the Marques de Llió palace, in Barcelona-Spain, Engineering Failure, 16, 1039-1050.

Piro S., Goodman D., Nishimura Y., 2003, The study and characterization of Emperor Traiano's Villa (Altopiani di Arcinazzo, Roma) using high-resolution integrated geophysical surveys, Archaeological Prospection, 10, 1–25.

Piro, S. and Goodman, D., 2009, Integrated GPR and archaeological investigations to characterise the Palatino's area and Coliseum Valley (Forum, Roma, Italy), Archeo Sciences, p233-235.

Piro S., Mauriello P., Cammarano F., 2000, Quantitative integration of geophysical methods for archaeological prospection, Archaeological Prospection, 203–213.

Sardis Antik Kenti Başkanlığı, 2021, Integrated Geophysical Investigation at Sardis in 2021, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü.

Seren, S., Eder-Hinterleitner, A., Neubauer, W. and Groh, S. 2004. Combined high-resolution magnetics and GPR surveys of the roman town of Flavia Solva, Near Surface Geophysics, 63-68.

Seren, S., Eder-Hinterleitner, A., Neubauer, W., 2007, Extended comparison of different GPR systems and antenna configurations at the Roman site of Carnuntum, Near Surface Geophysics, 389-394.

Simyrdanis K., Papadopoulos N., Kim J.H., Tsourlos P.I., Moffat I., 2015, Archaeological investigations in the shallow seawater environment with electrical resistivity tomography. Near Surface Geophysics, 13:601–611.

Smekalova T.N., Voss O., Smekalov S.L., 2005, Magnetic Survey for Archaeology, 2nd ed, Publishing House of the Polytechnical University, St. Petersburg, ISBN 978-87-89531-29-8.

Süel A., Süel M., 1996, 1994 yılı Çorum-Ortaköy Kazı Çalışmaları", XVII. Kazı Sonuçları Toplantısı, T.C. Kültür Bakanlığı Yayınları, No.1808, Ankara, s.263-282.

Süel A., Süel M., 2002, 2000 Yılı Ortaköy – Şapinuva Kazı Çalışmaları, 23. Kazı Sonuçları Toplantısı, T.C. Kültür Bakanlığı Yayınları, s.413-418

Süel A., Süel M., 2010, 2007-2008 Yılı Ortaköy-Şapinuva Kazı Çalışmaları, 31. Kazı Sonuçları Toplantısı, s.23-40.

Süel A., Süel M., 2011, Başkent Şapinuva: Hitit Dünyasındaki Yeri ve Önemi, I. Çorum Kazı ve Araştırmalar Sempozyumu, s.93-110.

Stern, W., 1930, Principles methods and results of electrodynamic thickness measurement of glacier ice, Zeitschrift fur Gletscherkunde, 18-24.

Taymaz, T., Yılmaz, Y., Dilek, Y., 2007, The geodynamics of the Aegean and Anatolia: introduction. Geological Society, London, Special Publications, 291(1), 1-16.

Tripp, A. C., Hohmann, G. W. ve Swift Jr, C. M., 1984, Two-dimensional resistivity inversion. Geophysics, 49, 1708-1717.

Tsokas, G.N., Tsourlos, P.I., Vargemezis, G., Novack, M., 2008, Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea church in Athens, Archaeological Prospection, 15, 47e61.

Tsokas G.N., Kim J.H., Tsourlos P.I., Angistalis G., Vargemezis G., Stampolidis A., Diamanti N., 2015, Investigating behind the lining of the Tunnel of Eupalinus in Samos (Greece) using ERT and GPR. Near Surface Geophysics, p571–583.

Tüysüz, O., Dellaloğlu, A.A., 1992, Cankırı havzasının tektonik birlikleri ve jeolojik evrimi. Ninth Petroleum Congress and Exhibition of Turkey, Proceedings, Geology, Turkish

Association of Petroleum Geologists/UCTEA Chamber of Petroleum Engineers/UCTEA Chamber of Geophysical Engineers, 333–349.

Uçan, O.N., Albora, A.M., 2009, Evaluation of Ruins of Hittite Empire in Sivas-Kusakli Region Using Markov Random Field (MRF), Near Surface Geophysics, 7(2): 111-122.

Vafidis, A., Economou N., Ganiatsos Y., Manakou M., Poulioudis G., Sourlas G., Vrontaki E., Sarris A., Guy M., Kalpaxis Th., 2005, Integrated geophysical studies at ancient Itanos (Greece), Journal of Archaeological Science, 1023-1036.

Wilken D., Wunderlich T., Stümpel H., Rabbel W., Pašteka R., Erkul E., Papčo J., Putiška R., Krajňák M., Kušnirák D., 2015, Case history: integrated geophysical survey at Katarínka Monastery (Slovakia), Near Surface Geophysics, 13:585–59.