

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ ALICILARI VE DAĞITIK
DİZİLİMLER KULLANILARAK ARKEOJEOFİZİK İNCELEMELER

Seçkin Sertaç LALLI

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KABLOSUZ DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ ALICILARI VE DAĞITIK DİZİLİMLER KULLANILARAK ARKEOJEOFİZİK İNCELEMELER

Seçkin Sertaç LALLI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İrfan AKCA

Doğru akım öz direnç yönteminde cihaz elektroniği ve yazılım altyapısına bağlı olarak farklı dizilim ve geometrik kurulumlarda ölçümler gerçekleştirilebilir. Profil ve/veya alan yerleşimli bu ölçümlerden elde edilen veriler ile oldukça çeşitli alanlardaki arama ve mühendislik problemlerin çözümü sağlanabilmektedir. Elektrotların belirli bir hat ya da grid üzerindeki standart yerleşimlerinden hariç dağıtık olarak yerleştirilmesini sağlayan sistemler de gündemdedir. Geleneksel öz direnç ölçüm sistemleri kablo karmaşası, sınırlı hareketlilik ve zaman alıcı kurulum süreçleri ile karşı karşıyadır. Bu sorunlara çözüm getirmek üzere bu tezde kablosuz alıcıların kullanıldığı yeni bir ölçüm sisteminin tasarım, geliştirme ve üretimi yanında doğrulama amacıyla bir uygulaması da gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemde merkezi bir cihaz tarafından yönetilen bir verici ve birbirinden bağımsız çok sayıda alıcı ile ölçüm yapılabilir. Alıcıların kablo bağımsız konumlandırılabilmesi ve yüzlercesinin sisteme dahil edilebilmesi ölçüm verimliliğini artırmaktadır. Maden aramacılığı ve jeolojik araştırmalar gibi ölçeklerdeki çalışmalarda daha verimli olacağı düşünülen sistem doğrulama amacı ile küçük ölçekli ve sığ araştırma derinliği hedeflenen bir çalışmada kullanılmıştır. Arkeolojik bir alandaki uygulamada veri yoğunluğu ve çözünürlüğü artırdığı gözlenmiştir.

Mayıs 2024, 59 sayfa

Anahtar Kelimeler: Dağıtık dizilim, Kablosuz jeofizik alıcı, Öz direnç, Arkeojeofizik

ABSTRACT

Master Thesis

ARCHEOGEOPHYSICAL SURVEYS USING WIRELESS DIRECT CURRENT RESISTIVITY RECEIVERS AND DISTRIBUTED ARRAYS

Seçkin Sertaç LALLI

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İrfan AKCA

In the direct current resistivity method, measurements can be performed in different arrangements and geometric setups depending on the device electronics and software infrastructure. Data obtained from profile and/or area-based measurements can provide solutions to a wide range of exploration and engineering problems in various fields. Systems allowing distributed placement of electrodes, apart from standard arrangements on a specific line or grid, are also being considered. Traditional resistivity measurement systems face challenges such as cable clutter, limited mobility, and time-consuming setup processes. To address these issues, this thesis presents the design, development, and validation of a new measurement system using wireless receivers. In the proposed system, measurements can be made with a transmitter managed by a central device and multiple independent receivers. The ability to position the receivers independently of cables and the possibility of including hundreds of them in the system increase measurement efficiency. The system, which is expected to be more efficient in studies at scales such as mineral exploration and geological research, was used in a study aimed at small-scale and shallow research depth for validation purposes. It has been observed to increase data density and resolution in an archaeological application.

May 2024, 59 pages

Key Words: Distributed Arrays, Wireless Geophysical Receiver, Resistivity, Archeogeophysics

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek gelişmeye katkıda bulunan danışman hocam Doç. Dr. İrfan AKCA'ya, çalışmalarım süresince desteğini esirgemeyen Elektrik Elektronik Mühendisi İbrahim Teker'e, tez sürecinde elektronik geliştirme süreçlerine katkı sağlayan LARES Mühendislik ve Yer Bilimleri Ltd. Şti. ile MPPT Elektrik Elektronik San. Tic. Ltd. Şti. firmalarına, yazılım geliştirme süreçlerinde psikolojik destek sağlayan arkadaşlarım İrem BAYSAL, M. Ali ATILGAN, Burak ÖZDEN, Güralp DİZDARER, Anıl TURAN, Oğuzhan DİNDAR ve Ebru GÜNGÖR'e, son olarak her zaman yanımda olan annem Ümmü Selma LALLI'ya çok teşekkür ederim.

Seçkin Sertaç LALLI
Ankara, Mayıs 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. KABLOSUZ DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ ÖLÇÜM ALICILARI.....	4
2.1 Analog Sayısal Dönüştürücü	7
2.2 Kayıtcı Birim	10
2.3 Elektrot Yönetimi.....	11
2.4 Kablosuz Haberleşme	13
2.5 Yönetim Birimi.....	15
3. VERİCİ BİRİMİ	18
3.1 Kare Dalga Yönetim Birimi	20
3.2 Akım Ölçümü ve Sabit Akım Kontrolü	21
3.3 Gerilim Farkı Ölçüm Birimi.....	22
3.4 Kablosuz Haberleşme Birimi	22
3.5 Tuş Takımı Yönetimi ve Ön Panel	24
3.6 Arayüz ve Sistem Yönetimi	26
4. VERİ TOPLAMA	30
4.1 Side Antik Kenti.....	31
4.2 Çalışma Alanı	33
4.3 Ölçüm Geometrisi	35
5. VERİ İŞLEM.....	43
5.1 İki Boyutlu Ters Çözüm Sonuçları.....	44
6. SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ.....	59

KISALTMALAR DİZİNİ

k	Kilo $\times 10^3$
M	Mega $\times 10^6$
G	Giga $\times 10^9$
n	Nano $\times 10^{-9}$
u	Mikro $\times 10^{-6}$
m	Mili $\times 10^{-3}$
Hz	Hertz
kB	KiloByte
kb	KiloBit
dB	Desibel
dBi	Desibel inch
dBm	Desibel metre
V	Volt
A	Amper
W	Watt
USB	Universal Serial Bus Evrensel Seri Veri Yolu
SMPS	Switched-Mode Power Supply Anahtarlama Modlu Güç Kaynağı
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu Pulse Width Modulation
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
WiFi	Wireless Fidelity Kablosuz Bağlantı
ISM	Industrial, Scientific, and Medical Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi
(S)RAM	(Static) Random Access Memory (Statik) Rastgele Erişim Belleği
CPU	Central Processing Unit Merkezi İşlem Birimi
I2C	Inter-Integrated Circuit İki İletişim Hattı
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GND	Ground, Toprak, Eksi (-) kutup, Nötr

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Bir kablosuz alıcının 5 elektrota bağlanması	6
Şekil 2.2 Çoklu kablosuz alıcılar kullanılan örnek bir ölçüm yerleşimi	7
Şekil 2.3 Kablosuz alıcı ve elektrot yönetim kartı baskı devre görünümü	9
Şekil 2.4 Sürekli sayısal dönüştürücü birim baskı devre üzerindeki görüntüsü	9
Şekil 2.5 Mikrodenetleyici ve SRAM	10
Şekil 2.6 Elektrot yönetimi için geliştirilen röle kartı	11
Şekil 2.7 Elektrot bağlantı terminal kutusu ve bağlantı noktalarının gösterimi	12
Şekil 2.8 Kablosuz alıcı elektrot bağlantı şematik gösterim	12
Şekil 2.9 Kablosuz haberleşme topolojisi	14
Şekil 2.10 Kablosuz haberleşme modülü	14
Şekil 2.11 Kablosuz alıcı yönetim birimi	16
Şekil 2.12 Kablosuz alıcı bileşen mimarisi ve bileşenler arası iş akışı	16
Şekil 2.13 Tez çalışmasında kullanılan tüm kablosuz alıcıların görüntüsü	17
Şekil 3.1 Güç üretim kartı	19
Şekil 3.2 Güç kontrol kartı	19
Şekil 3.3 Yönetim ve ölçüm kartı	20
Şekil 3.4 Köprü çevirici (inverter) devresi	20
Şekil 3.5 H Köprü çevirici (inverter) ve akım okuma devresi kart üzeri görünümü	21
Şekil 3.6 Gerilim farkı ölçüm birimi (Kırmızı)	22
Şekil 3.7 Kablosuz haberleşme birimi (kırmızı), gerçek zaman sayıcı (RTC) ve batarya gerilimi takip birimi (mavi)	23
Şekil 3.8 Tuş takımı paneli	24
Şekil 3.9 Öz direnç ölçüm sisteminin panel görünümü ve bileşenleri	25
Şekil 3.10 Ana denetim birimi üzerinde çalışan yazılımın mimarisi	27
Şekil 3.11 Sistemin ana ünitesinde çalışan kullanıcı arayüzü	28
Şekil 3.12 CERES800 Ölçüm ekranları	29
Şekil 4.1 Side Antik Kenti'nin konumu (Akca vd. 2019'dan alınmıştır.)	32
Şekil 4.2 Side Antik Kenti genel yerleşimi (solda) ve 9 numaralı alana ait öz direnç derinlik haritası (0.75m)	33
Şekil 4.3 Tez kapsamında kullanılan ölçüm alanının güncel uydu görüntüsü	34
Şekil 4.4 Kablosuz alıcılar ile yapılan bir serim ölçüm için saha yerleşimi	35

Şekil 4.5 Belirli bir elektrottan akım verilirken kullanılan alıcılar	36
Şekil 4.6 Kablosuz alıcılar ve çok elektrotlu sistemin ölçümler sırasındaki görünümü .	36
Şekil 4.7 S1 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	37
Şekil 4.8 S2 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	37
Şekil 4.9 S3 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	38
Şekil 4.10 S4 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	38
Şekil 4.11 S5 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	39
Şekil 4.12 S6 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	39
Şekil 4.13 S7 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	40
Şekil 4.14 S8 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	40
Şekil 4.15 S9 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	41
Şekil 4.16 S10 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi	41
Şekil 5.1 P1 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	45
Şekil 5.2 P2 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	45
Şekil 5.3 P3 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	46
Şekil 5.4 P4 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	46
Şekil 5.5 P5 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	47
Şekil 5.6 P6 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	47
Şekil 5.7 P7 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	48
Şekil 5.8 P8 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	48
Şekil 5.9 P9 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	49
Şekil 5.10 P10 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri	49

Şekil 5.11 Çalışma alanı verilerinin iki-boyutlu ters çözümünden elde edilen öz direnç derinlik haritaları	50
Şekil 5.12 Dağıtık dizilim ile toplanan verilerin değerlendirilmesinde kullanılan	51
Şekil 5.13 Dağıtık dizilimle toplanan verilerin üç boyutlu ters çözüm sonuçlarından elde edilen öz direnç derinlik haritaları.....	52
Şekil 5.14 Dağıtık dizilim ile toplanan verilerin ters çözümünden elde edilen 3B öz direnç modeli	52



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Analog / sayısal dönüştürücü özellikleri.....	8
Çizelge 6.1 DAÖ Ölçüm cihazları karşılaştırma çizelgesi.....	53



1. GİRİŞ

Jeofizik yöntemlerden biri olan doğru akım öz direnç yöntemi, yer altındaki kayaç ve jeolojik birimlerin elektriksel özelliklerindeki değişiklikleri tespit ederek, bu değişikliklerin belirli bir geometriye göre modellenmesi esasına dayanır. Yöntem, mineral ve hammadde araştırmaları (Gabarrón M, 2020), çevre ve kirlilik araştırmaları (Martinho, 2023), mühendislik ve jeoteknik problemlerinin çözümü (Alam MJB, 2024), gömülü nesne ve arkeolojik araştırmaları (Akca vd. 2019) gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ölçülen veri, yere uygulanan elektrotlar aracılığı ile belirli konumlardan elektrik akımından dolayı oluşan gerilim farklarıdır. Akım ve gerilim elektrotlarının konumlandırılmasına bağlı olarak sondaj, profil ya da sondaj-profil veri kümeleri oluşturulabilir. Sondaj-profil verileri belirli bir kesit alanını taradığından bu tür verilere tomografi verileri de denmektedir. Elektrotların hat üstü ya da x-y düzlemi üzerindeki dağılımları amaca yönelik olarak değiştirilebilmektedir. Farklı elektrot yerleşimleri ile elektrot dizilimi adı verilen ön tanımlı ölçme düzenleri ortaya çıkmaktadır (Eva Rolia, 2018). Bu dizilimleri çoklu elektrot kablolarına bağlı çok sayıda elektrot için otomatik olarak işleten ölçme cihaz ve donanımları geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Günümüzde geleneksel dizilimlerin yanında çeşitli problemlerin çözümüne yönelik geliştirilen hibrit ve düzensiz/dağıtık elektrot dizilimleri de kullanılmaktadır örn. (Szalai S. vd., 2015). Dağıtık elektrot ile yapılan bir çalışma örneği olarak da Martorana vd. (2023) Ancak konumsal olarak karmaşık ve çoklu alıcıların kullanıldığı ölçme düzenleri sağlayacakları yarara karşılık, kablo karmaşıklığı, iş yükü ve donanım kapasitesi gereksinimleri nedenleri ile uygulanabilir olmaktan çıkabilmektedir. Bunun nedenlerinin başında ölçme cihazının ana iki bileşeni olan alıcı ve vericinin bir arada merkezi bir birim içerisinde yer alıyor olması ve bu nedenle tüm elektrotlardan merkezi birim konumuna bir kablo çekilmesi gerekliliği gelmektedir. Çok kanallı ve akıllı kablo adıyla anılan kablolar ile bu soruna kısmi bir çözüm getirilmiş olsa da kablonun fiziksel olarak yine elektrotlar ile cihaz arasında bir bağ kurması gerekliliğinden kanal sayıları ve elektrot konumlandırma esneklikleri sınırlıdır. Sisteme bağlanabilen elektrot sayısı ve eş zamanlı kanal sayısı artırıldıkça kablo çapı ve ağırlığı artmakta, sahadaki uygulama ve işçilik buna bağlı olarak zorlaşıp ağırlaşmaktadır. Bu durum aynı cihaz ya da ölçme yapısının tüm ölçüm amaçları için kullanımı yerine problem bağımlı çözümler üretilip kullanılması

gerekliliğini ortaya koymaktadır. Tez kapsamında sunulan kablosuz alıcılar bu soruna bir çözüm getirmek üzere tasarlanmıştır. Tasarım amacı daha çok büyük ölçekli çalışmalar için olsa da deneme ve geliştirme süreçleri daha sığ bir araştırma alanı olan arkeolojik alanların araştırılmasına yönelik bir uygulamada gerçekleştirilmiştir.

Yakın yüzey araştırmalarda doğru akım öz direnç yöntemi oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Arkeoloji jeofiziği gibi yüksek ayrımlılık gerektiren uygulamalarda çok sayıda elektrot küçük elektrot aralıkları ile yerleştirilerek ölçümler yapılmaktadır (Schmidt A, 2020). Elektrotlar çizgisel hatlar üzerinde konumlandırılmakta ve yanal yöndeki değişimleri algılayabilmek için de profiller kaydırılarak alan taraması yapılmaktadır. Verilerin iki ve üç boyutlu ters çözümü ile yer içi elektrik öz direnç parametresine göre görüntülenmeye çalışılmaktadır (Örneğin Papadopoulos vd. (2006), Akca vd. 2019). Bu çalışmanın amacı yukarıda özetlenen arazi yerleşimi ve iş akışından farklı olarak ölçümlerde kullanılan elektrotları çizgisel bir hat üzerine konumlandırma zorunluluğu olmadan dağınık dizilim olarak adlandırılan bir yerleşim ile ölçüm yapılabilecek bir ölçme düzeni ve sisteminin geliştirilmesidir. Belirli bir geometrik esneklik sağlaması yanında çok sayıda elektrot kullanılarak dağınık bir dizilim ile veri ölçülebilmesi için özel bir alıcı tasarımı gereklidir. Yukarıdaki sorunlara çözüm getirmek adına, sahada konumlandırılmış herhangi iki gerilim elektrotuna bağlanabilen ve merkezi bir üniteye kablo bağlantısı gerektirmeyen kablosuz alıcılar kullanılmıştır. Kablosuz alıcılar sahada istenilen sayıda ve istenilen konumlara yerleştirilebileceğinden geometrik olarak önemli bir esneklik sağlamaktadır. Öte yandan kablo serilmesi / toplanması özelindeki işçiliği önemli ölçüde azaltmakta, ölçüm kanalı sayısını alıcı sayısı kadar artırabilmektedir. Bu alıcılar tezin yazarı ve danışmanı tarafından yürütülen TÜBİTAK-1512 projesi çerçevesinde geliştirilmiş ve sınanmıştır. Geliştirme süreçlerinde LARES ve MPPT firmalarının jeofizik ve elektronik katkıları olmuştur. Asıl tasarım amacı IP (*Induced polarization*) ölçümleri yapmak olan sistem aynı zamanda doğru akım öz direnç ölçümlerinde ve benzeri zaman ortamı ölçümlerinde de kullanılabilir.

Bu ölçme sistemi ile yakın yüzey araştırmaları içerisinde önemli yer kaplayan arkeolojik bir alan çalışılmıştır. Çalışma alanında daha önce kapsamlı doğru akım öz direnç ölçümleri yapılmış ve bunlar yayınlanmıştır (Akca vd. 2019). Araştırmadaki bulgular

oldukça belirgin olduğundan yeni bir sistemin denenmesi için uygun görülmüştür. Buna göre Side Antik Kenti'nde (Antalya, Türkiye) yer alan Piskoposluk Sarayı olarak adlandırılan yapının çevresindeki çalışma alanında ölçümler gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler değerlendirilerek sonuçlar önceki çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



2. KABLOSUZ DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ ÖLÇÜM ALICILARI

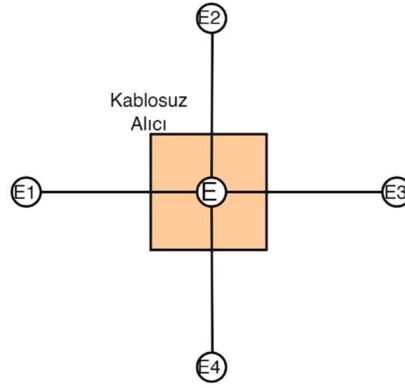
Kablosuz ölçüm sistemleri IoT (*Internet of Things*) teknolojilerindeki hızlı gelişime bağlı olarak son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. Jeofizik ölçümlerde de giderek artan sıklıkta görülmektedir. Özellikle binlerce alıcı düğüm noktasının kullanıldığı sismik yöntemlerde kablosuz jeofon ya da jeofon grupları geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur. Çok sayıda sistem bileşeni kablosuz haberleşme becerisi ile donatılarak lojistik gereksinimler azaltılmakta, ölçüm kanal sayısı artırılmakta ve farklı mühendislik alanları yanında jeofizikte de kullanım alanı bulan cihazlar geliştirilmektedir. Örneğin Sismik Yansıma yönteminde kullanılabilecek kablosuz bir jeofon çalışması Koç ve Yeğin (2013) Liu vd. (2019) nükleer manyetik rezonans yönteminde çok kanallı bir kablosuz alıcı sisteminde kablosuz alıcılar tasarlamışlardır. Bir merkezi modem ile sürekli haberleşen alıcılar ile ölçümleri yürütmüşlerdir. Doğru akım öz direnç ve yapay uçlaşma yöntemleri için ticari ürünlerde kablosuz alıcı sistemlerinin kullanıldığı bir örnek de bulunmaktadır (IRIS Instruments, 2023). Uzaktan denetime sahip çeşitli ölçüm sistemleri de literatüre geçmiştir (Oppermann & Günther, 2018). Öte yandan cihaz tasarımlarına ek olarak çeşitli amaçlarla kullanılmak üzere geleneksel olarak kullanılanlardan farklı elektrot dizilimleri de önerilmektedir. Özel durum ve ortam koşullarının gerektirdiği ya da ölçüm kolaylığı veya veri yoğunluğu gibi nedenlerle önerilen bu dizilimlerden biri de dağıtık dizilim (*distributed array*) olarak anlandırılmaktadır. Dağıtık dizilimlerde A, B, M ve N elektrotları Wenner, Schlumberger, Dipol-Dipol ve Pol-Dipol gibi sık kullanılan dizilimlere uyma zorunluluğu olmadan sahada konumlandırılabilir (Binley & Slater, 2020). Buradaki kritik nokta konumlandırmaya bağlı olarak düz ve ters çözüm kodlarının güncellenmesi gerektiğidir. Aksi halde negatif öz direnç değerlerinin ölçülmesi veya işlenmesi sorunu ile karşılaşılabilir.

Bu çalışmada yapılan ölçümler kablosuz alıcılar kullanılarak dağıtık elektrot dizilimleri ile gerçekleştirilmiştir. Bir akım konumu için belirli bir alana konumlandırılmış çok sayıda alıcıdan eş zamanlı ölçüm yapılabilmesi için kablosuz alıcılar kullanılmıştır. Bu çerçevede “kablosuz alıcı” olarak adlandırılan ölçüm birimini tanımlamak gerekir. Doğru akım öz direnç ölçümlerinde kullanılan cihazlar bir verici ve bir alıcı birimden oluşur. Verici kare dalga formunda bir akım çıkışı üretirken, alıcı akımla eş zamanlı gerilim

farklarını sayısallaştırarak kaydeder. Kablosuz alıcının tasarım mantığı ise merkezi cihazdan alıcıyı bağımsız hale getirmektir. Kendi güç beslemesi olan ve kablosuz olarak iletişim kurulabilen alıcılardan çok sayıda birim eş zamanlı olarak sisteme bağlanabilir. Bu açıdan bakıldığında öz direnç ölçüm sisteminin kanal sayısı onlara hatta yüzlere ulaşabilmektedir. Bugün ticari olarak satışta bulunan ölçüm cihazlarındaki kanal sayısı en fazla 10 civarındadır. Kablosuz haberleşme alıcının kurulumu (ölçüm ayarları), ölçümün başlatılması (trigger), ölçülen verilerin aktarılması gibi komutları içermektedir. Bu tasarım çerçevesinde alıcı ve vericiye ölçümde kullanılacak ayarlar gönderilir, kurulum tamamlandıktan sonra ölçümü başlatma komutu gönderilir, sonuçlar toplanır şeklinde bir ölçüm algoritması izlenebilir. Kablosuz alıcılar gelişmiş bir ölçüm sisteminin barındırdığı alıcıların tüm özelliklerini taşır. Buna göre kablosuz alıcıların giriş gerilimi aralığı $\pm 15V$, analog sayısal dönüştürücü çözünürlüğü 24bit, örnekleme sıklığı 40ksps düzeyindedir. Kablosuz haberleşme menzili açık alanda 3 km'dir. *Star, Mesh, Cluster Tree* gibi ZigBee topolojilerini desteklemektedir (Lallı, 2018). Teorik olarak sonsuz sayıda kablosuz alıcı aynı sisteme bağlanarak denetlenebilmektedir. Saha ölçümleri için her bir bağımsız kablosuz kayıtçı belirli bir ağ yapısının düğüm noktalarına yerleştirilebilmektedir. Önceden tasarlanmış bir ölçüm geometrisine bağlı yerleşim konumlandırma bilgilerinin oluşturulması açısından önemlidir. Aksi durumda tüm elektrotların konumları GPS benzeri bir ölçüm sistemi ile alınarak kayda geçirilmelidir.

Uzaktan denetim özellikleri bulunan kablosuz alıcıların ölçüm ayarları ve ölçümün başlatılması komutları bir bilgisayar aracılığı ile iletilmektedir. Sisteme sürekli bağlı olan alıcılar dinleme durumunda beklemekte, kurulum ve ölçüm komutlarını anlık olarak işlemektedir. Linux tabanlı bir işletim sistemi üzerinde Python dilinde kodlanmış bir işletme yazılımı ile çalışmaktadır. Kare dalga akım formu için ölçüm komutu alan bir alıcı kurulum yapılan periyot ve örnekleme sıklığı için zaman serisini işleyerek gerilim farkı ve doğal potansiyel değerini (SP) merkezi bilgisayara iletir. Bu ilke çerçevesinde çalışan bir alıcının 5 elektrot girişi bulunmaktadır. Bu beş elektrottan biri ölçü noktasının merkezinde yer almakta ve kayıtçının merkez elektrodu olarak kullanılmaktadır. Merkez elektrottan x+, x-, y+ ve y- yönlerinde *a* uzaklığında olacak şekilde 4 adet elektrot yerleştirilerek + işareti şeklinde bir ölçüm geometrisi oluşturulmaktadır. Böylece merkezdeki elektrot ortak olmak üzere bir kablosuz alıcı ile toplam 4 farklı geometride

ölçüm yapılabilir. Buna göre merkez elektrotun konumu (0,0) kabul edildiğinde diğer elektrotlar sırasıyla (-1,0), (0,1), (1,0) (0,-1) koordinatlarında yer almaktadır. Ölçüm sistemi bir akım noktası için bu 5 elektrotun tümünün olası kombinasyonlarında ölçüm yaparak birbirine dik yönlerde gerilim ölçümü yapabilmektedir. Her bir kablosuz alıcı akım elektrotlarının nerede olduğundan bağımsız olarak haberleşme mesafesi içindeki merkezi birime ölçüm sonuçlarını kablosuz olarak iletmektedir. Burada özetlenen alıcı kurulumunun konumlandırılması Şekil 2.1’de verilmiştir.



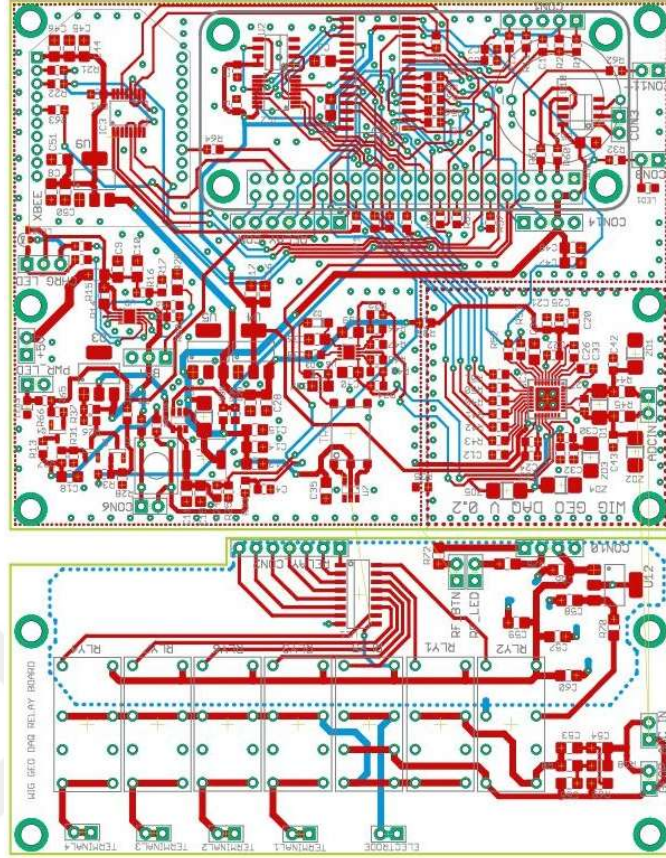
Şekil 2.1 Bir kablosuz alıcının 5 elektrota bağlanması

Çok kanallı eş zamanlı ölçüm ve konumlandırma serbestliği kablosuz alıcıların üstünlük sağladığı özellikleridir. Bu üstünlükten faydalanabilmek için uygun bir yapı kurmak gereklidir. Akım elektrotları pol ya da dipol olarak sahada elle hareket ettirilebilir ya da akıllı bir kablo denetiminde seçilebilir. Örneğin C_1 elektrotu sonsuz sayılabilecek bir uzaklıkta iken C_2 elektrotu anlatıldığı gibi değiştirilebilir. Verinin anlamlı ve düzenli bir küme halinde işlenebilmesi için bir ölçüm şeması önceden oluşturulmalı ve ölçüm sırasında bu şema işletilmelidir. Çok sayıda alıcının kullanıldığı bir ölçüm kurulumu için bir örnek yerleşim Şekil 2.2’de gösterildiği gibi olabilecektir.

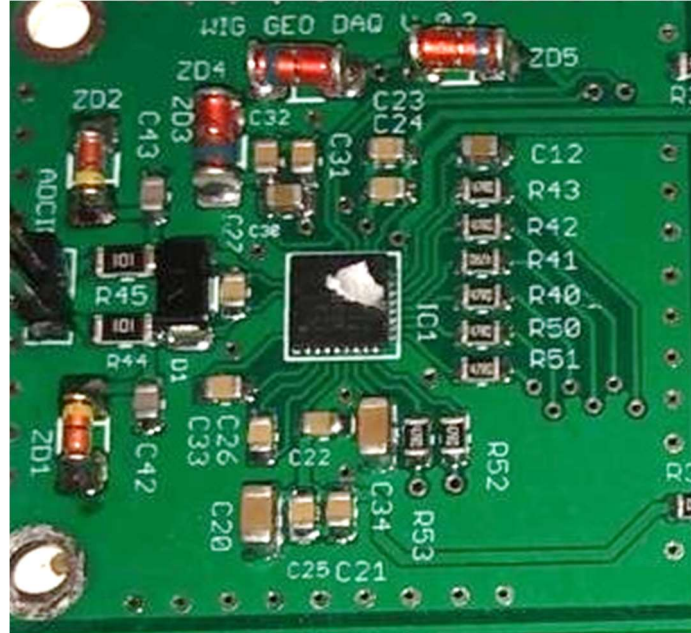
Çizelge 2.1 Analog / sayısal dönüştürücü özellikleri

A/S Dönüştürücü Teknik Özellikleri	
Giriş empedansı	>1 G.ohm
Örnekleme Hızı	2.5S/s – 40kS/s ayarlanabilir
Kazanç	0.125–128 ayarlanabilir
Giriş Voltajı Aralığı	±20V
Çözünürlük (Bit)	24 Bit
Hassasiyet (Teorik)	2.38 μ V – 0.00238 μ V (2.38nV)

Giriş empedansının yüksek olması yer yüzeyinden okuma yapılırken oluşan gerilim farkının voltaj bölücü gibi davranmasını engellemektedir. Düşük giriş empedansına sahip sürekli sayısal dönüştürücülerde yer yüzeyinin direnci (okuma elektrotları arası direnç) ile dönüştürücü iç direnci (empedansı) arasında gerilim bölücü davranışından dolayı gerçek değerden daha düşük bir değer okunmasına sebebiyet verir. Uluslararası mevcut cihazlarda bu değer en az 100 M.ohm ve üzeri olan dönüştürücüler tercih edilmektedir. Geliştirilen proje kapsamında bu konuya özellikle dikkat edilerek 1 giga ohm (1000 M.ohm) ve üzerinde olan bir dönüştürücü tercihi ile ölçüm kalitesinin en üst seviyede tutulması hedeflenmiştir. Alıcı ana kart ve röle kontrol kartının baskılı devre tasarım şemaları Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de verilmiştir. Şekil 2.4’de ZD1, ZD2, ZD3, ZD4 ve ZD5 isimli devre elemanları zener diyotlardır. Zener diyotların görevi dönüştürücünün giriş gerilim aralığı üzerinde gelecek bir gerilim farkı olması durumunda gerilim seviyesinin yükselmesini engellemek suretiyle dönüştürücüyü korumaktadır. Anlık olarak 600V civarındaki gerilim farklarına kadar 100 ms kadar koruma görevini yerine getirebilmektedirler. Gerilim farkı yüksek olarak devam edecek olursa, zener diyotlar ve R44, R45 dirençleri açık devre konumuna geçerek dönüştürücüyü yüksek gerilimden ayırarak dönüştürücü sistemden dışarı çıkartmış olacaktırlar.



Şekil 2.3 Kablosuz alıcı ve elektrot yönetim kartı baskı devre görünümü



Şekil 2.4 Sürekli sayısal dönüştürücü birim baskı devre üzerindeki görüntüsü

2.2 Kayıtçı Birim

Kayıtçı birim sürekli sayısal dönüştürücünün denetimini ve tüm sistemin güç yönetimini üstlenen birimdir. 70 MHz işlemci frekansına sahip 64 kB programlanabilir alanı olan 8 kB RAM ile desteklenen bir mikrodenetleyici ile güç yönetimi ve sürekli sayısal dönüştürücü yönetilmektedir. Mikrodenetleyicinin düşük RAM kapasitesi olması sebebiyle bir ölçüme ait tam zaman serisinin depolanabilmesi için harici RAM kullanılmıştır. İşlemci 24 bit çözünürlükteki sürekli sayısal dönüştürücünün ham verisini ve dönüştürücü sıcaklığı ile batarya seviyesini 8 bit alana ekleyerek toplamda 32 bitlik örnek verisinden 131072 adetini bu RAM üzerinde saklamaktadır. RAM depolama alanı 512kB büyüklüğündedir. RAM'in mimarisi gereği 32 bitlik sayfalara veriler yazılmaktadır. 24 bit ham veri de 32 bitlik sayfada saklanacağı için kalan 8 bitlik alan batarya seviyesi ve dönüştürücü sıcaklığını için kullanılmaktadır. Şekil 2.5'de de U1 mikro kontrolcü, IC2 SRAM'ın baskı devre üzerindeki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.5 Mikrodenetleyici ve SRAM

2.3 Elektrot Yönetimi

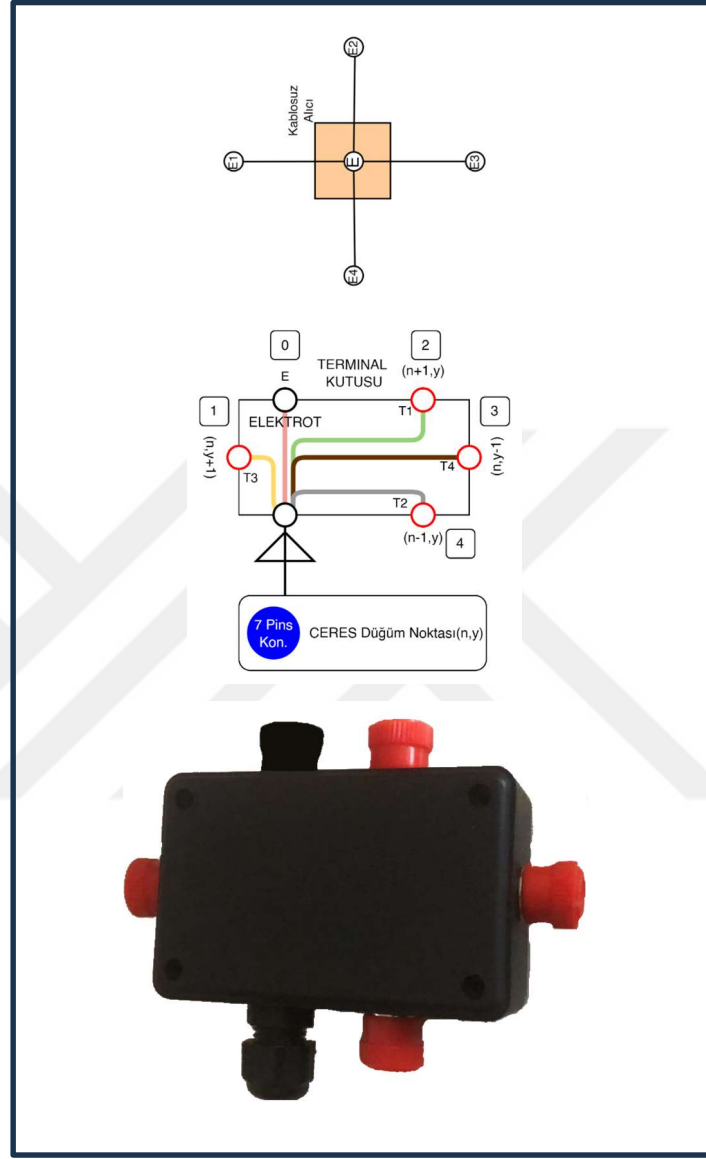
Kablosuz alıcının etkin kullanımını sağlamak amacıyla ikiden daha çok elektrotun alıcıya bağlanabilmesine olanak verecek bir röle kontrol kartı da geliştirilmiş ve alıcıya entegre edilmiştir. Bu kart sayesinde dört adet elektrotun merkezdeki elektrot ile birleştirilerek dört dipol çifti elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 2.6 Elektrot yönetimi için geliştirilen röle kartı

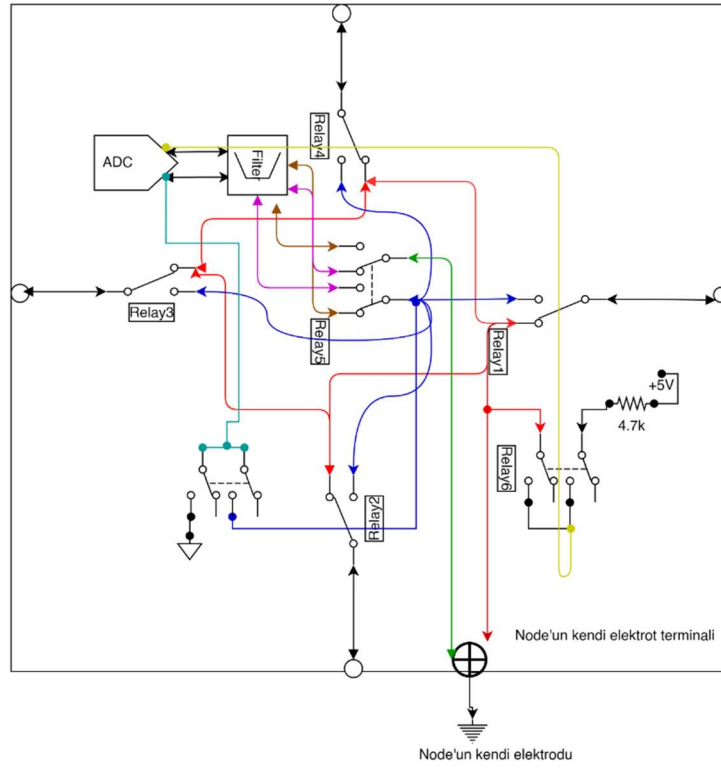
Kart üzerinde 7 adet röle görünmektedir. Bu rölelerden 5 adeti E (Merkez Elektrot), E1, E2, E3 ve E4 elektrotlarını yönetmek içindir. Diğer 2 röleden 1 adeti kart üzerinde bulunan bant durdurucu analog filtre içindir. Bu filtre 48-62Hz aralığı -60dB düşürmek için kullanılmaktadır. Çok yüksek genlikte 50-60Hz bandında gürültü var ise analog sayısal dönüştürücü ve mikrodenetleyici içerisindeki sayısal süzgecin zayıf kaldığı durumlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu filtrenin getirdiği üstünlükler kadar zayıflıkları da vardır. Sürekli sayısal dönüştürücünün yüksek giriş empedansını azaltmakta ve yer yüzeyinden gelen giriş gerilimini seviyesini düşürmektedir. Bu filtre devreye alındığında 2 elektrot arasındaki yüzey direnci bilinmeli ve düzeltme katsayısı ile analog sayısal dönüştürücü yanıtı iyileştirilmelidir. Yüzey direncinin belirlenebilmesi için kalan 1 adet röle kullanılmaktadır. Bu röle ile $\pm 5V$ kare dalga üreticisi ilgili dipol ile yer yüzeyine gerilim uygulamakta ve geçen akım miktarına göre yüzey direnci (resistance) belirlenmektedir. Elektrot denetimi için kullanılan röle kartına ulaşmak üzere

harici bir elektrot bağlantı terminal kutusu da tasarlanmıştır. Röle kartının tasarım bilgileri ve terminal kutusu Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Elektrot bağlantı terminal kutusu ve bağlantı noktalarının gösterimi

Röle kartı ve alıcı elektroniğinin genel entegrasyonunu gösteren çizim Şekil 2.8’de verilmiştir.

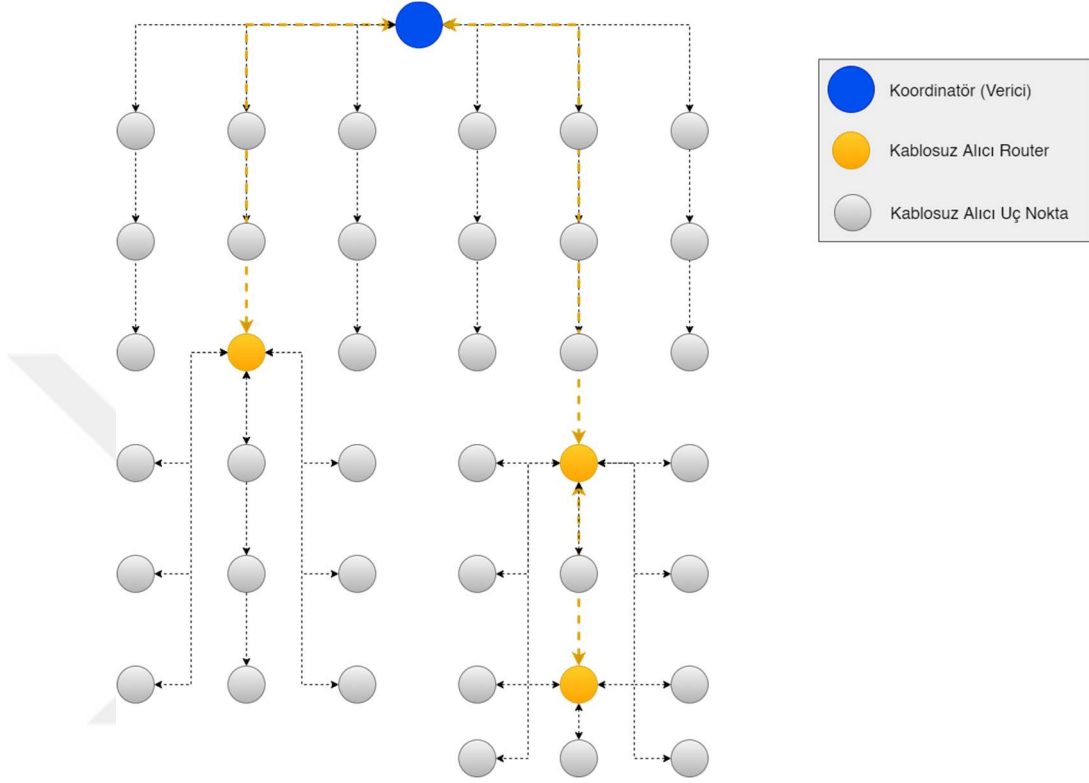


Şekil 2.8 Kablosuz alıcı elektrot bağlantı şematik gösterim

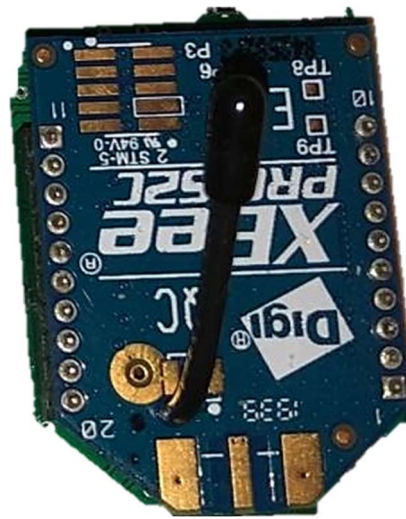
2.4 Kablosuz Haberleşme

Sistemin bir diğer önemli bileşeni kablosuz haberleşme birimidir. Alıcının, verici birimden gelen ölçüm ayarları ve ölçüm başlatma sinyalinin alınması ve ölçüm sonrasında ölçüm sonuçlarını verici (merkez) birime iletmesini sağlayan bileşendir. Geliştirilen sistemde Digi International firmasının kablosuz haberleşme modülleri kullanılmaktadır. Digi Xbee-2 (Zigbee 2) RF (Radyo Frekansı) modülleri sistemin kablosuz haberleşme birimi yönetmektedir. Sistemin işleyişinde ağaç topolojisi kullanılmaktadır. Ağaç topolojisinde 1 adet koordinatör, istendiği kadar yönlendirici (router) noktası ve istenilen kadar uç nokta kullanılabilir. Alıcı birimlerin kablosuz haberleşme modülüne uzaktan gönderilen sinyaller ile rolü değiştirilebilmektedir. Saha uygulamasında konumlandırma sırasında ilgili ürün merkez ile iletişim kuramadığı takdirde merkez noktası, sahadaki haberleşme yapamayan uç noktaya en yakın olan ilgili uç ürünü, dağıtıcı olarak yeniden ayarlayabilmektedir.

Böylelikle sahada haberleşme sorunu en aza indirgenerek tüm uç ürünler ile iletişim sağlanabilecek kurgu yapılabilmektedir. Haberleşme ağının yapısı ve kablosuz haberleşmeyi sağlayan modülün görüntüsü sırasıyla Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.9 Kablosuz haberleşme topolojisi



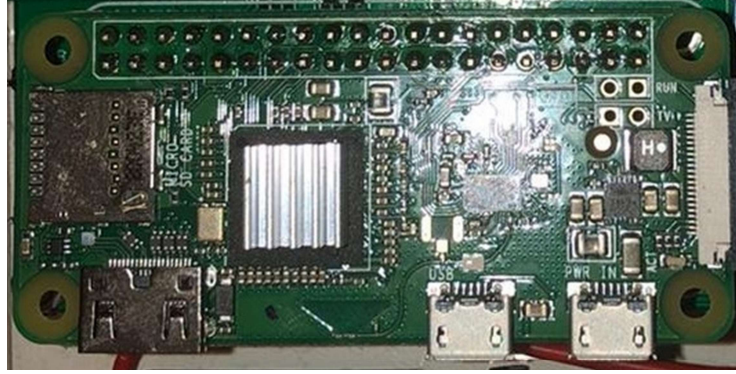
Şekil 2.10 Kablosuz haberleşme modülü

Şekil 2.10'da yer alan görüntüde kablosuz haberleşme modülünün pol anteni görülmektedir. Saha uygulamasında pol anten sökülüp ve yerine +5dBi çok yönlü (Omni-Directional) anten uygulanmıştır. Böylelikle haberleşme mesafesi arttırılmıştır. Xbee2 modülü 2.4GHz merkezi bant ve çevre frekanslarında (ISM Bant) da haberleşebilmektedir. Çıkış gücü maksimum 11.02dBm 12.65mW, 5MHz geçişler ile 2405MHz – 2480MHz aralığında ayarlanabilmektedir. Radyo Frekansı (RF) haberleşme sırasında gelen mesajları algılaması için olan alıcı hassasiyeti ise -101dBm olarak üreticisi tarafından beyan edilmektedir. RF haberleşme hızı 250kb/saniyedir. Ölçüm parametreleri 32kb'lık yer tutmaktadır. Ölçüm sonrası sonuçlar 32kb (4kByte) içerisinde dönmektedir. RF haberleşme hızı, mesafesi ve veri aktarım boyutu tasarlanan ölçüm sistemi için yeterli görülmektedir.

2.5 Yönetim Birimi

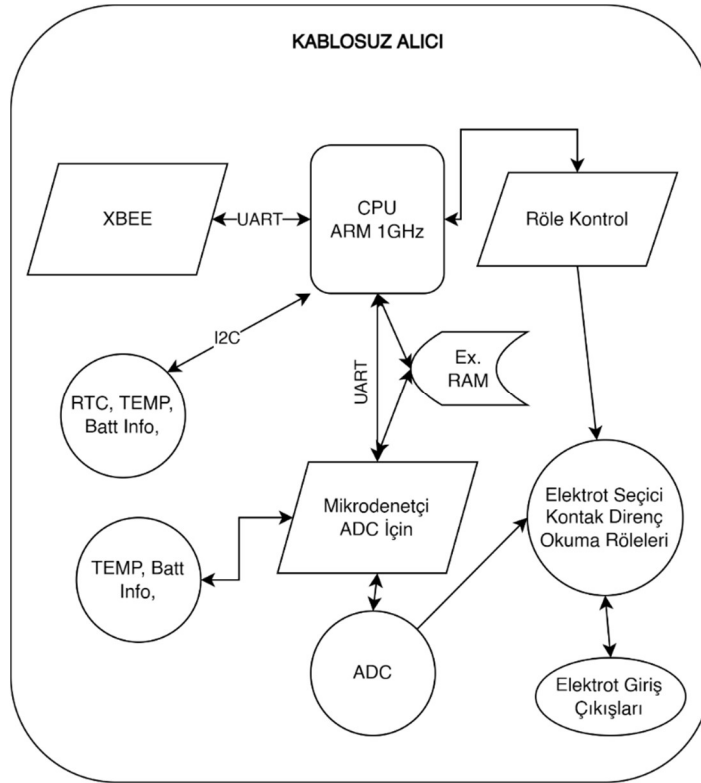
Kablosuz alıcı sisteminin genel işletimini sağlayan bir elektronik birime gereksinim bulunmaktadır. Bu gereksinimi karşılamak üzere ARM tabanlı 1GHz hızında tek çekirdekli bir işlemci ile donatılmış, 512MB RAM desteği yanında bluetooth ve WiFi bağlantı olanakları sunan ve 16GB ve üstü SD bellek kapasitesi ile linux dağıtımlarından biri koşturulan bir yönetim birimi kullanılmıştır. Bu birimin görevleri, kablosuz haberleşmeden gelen veriyi takip etmek, ilgili veriye göre sürekli sayısal dönüştürücüyü programlamak üzere mikro kontrolcü ile konuşmak, 52kB RAM'den zaman serisini okumak ve depolamak, elektrot yönetim kartını yönetmek, gerilim farkı, doğal gerilim (self-potential) ve yüklenebilirlik (IP) değerini hesaplamak, tüm sonuçlarını depolamak, kablosuz modül aracılığı ile ölçüm sonuçlarını iletmek, batarya seviyesine göre sistemin çalışabilirliğini yönetmek, WiFi TCP/IP üzerinde çalışan MQTT protokolü ile güncellenme ve depolanan zaman serileri indirilmesine olanak sağlamak, dahili gerçek zaman sayıcı (RTC) ile senkron saatini takip etmek şeklinde sıralanabilir. Yönetim birimi 4200mA/Saat batarya kapasitesi ile 10 saat kesintisiz çalışabilmektedir. Batarya kapasitesi arttırılabilir olup harici güneş enerji paneliyle de şarj edilerek uzun süreli gözlemler yapılabilir. Harici GPS modül bağlantı desteği ile konum verisi de

kayıtlar arasına dahil edilebilmektedir. Yönetici birimin görüntüsü Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Kablosuz alıcı yönetim birimi

Önceki bölümlerde sayılan sistem bileşenlerinin birbirleri ile haberleşmesi ve birimler arası bağlantılar Şekil 2.12’de şematik olarak gösterilmiştir. Kablosuz alıcının içerisinde yer alan birimlerin CPU Yönetim birimi ile olan ilişkisini ve süreç akışı ilgili şekilden takip edilebilir.



Şekil 2.2 Kablosuz alıcı bileşen mimarisi ve bileşenler arası iş akışı

Tez kapsamındaki verilerin ölçülmesinde kullanılan kablosuz alıcıların tümü bir arada Şekil 2.13’de verilmiştir. Şekildeki görüntü de alıcıların yerleşik bataryaları şarj edilmektedir. Dahili bataryalar tam dolu şarj ile bekleme konumunda 24 saat, aktif halde ölçüm yoğunluğuna bağlı olmakla birlikte ortalama 8 saat kullanım süresi sunmaktadır. Bu süreler 1 günlük bir çalışma boyunca kullanım için oldukça yeterlidir. Ayrıca batarya kapasiteleri artırılabilir. Tüm alıcıların tekil birer kimlikleri bulunmaktadır. Bu sayede verileri bu kimlik ile eşleştirilmektedir. Haberleşme ve veri aktarımında da bu kimlik bilgileri kullanılmaktadır. Kurulum ve ölçüm komutları anonim olarak tüm alıcılara eş zamanlı gönderilebileceği gibi doğrudan bir kimlik belirtilerek tekil alıcılara da ulaştırılabilmektedir. Bu özellik de ölçüm şeması konusunda ayrı bir esneklik sağlamaktadır. Belirli bir akım konumu için sadece bazı düğüm noktalarının ölçüm yapması istenebilmektedir. Ayrıca farklı alıcılar farklı ölçüm ayarları ile ölçüme ayarlanabilmektedir. Bu çalışmada 20 adet bağımsız kablosuz alıcı kullanılmıştır.

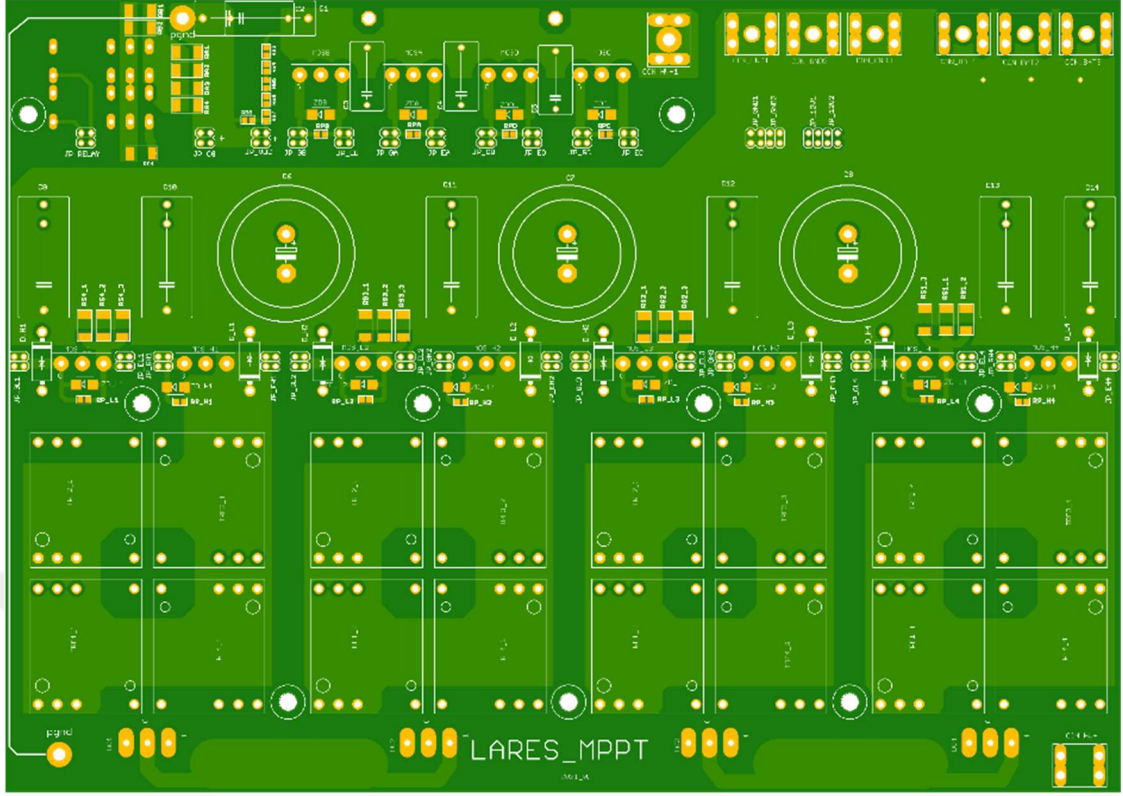


Şekil 2.13 Tez çalışmasında kullanılan tüm kablosuz alıcıların görüntüsü

3. VERİCİ BİRİMİ

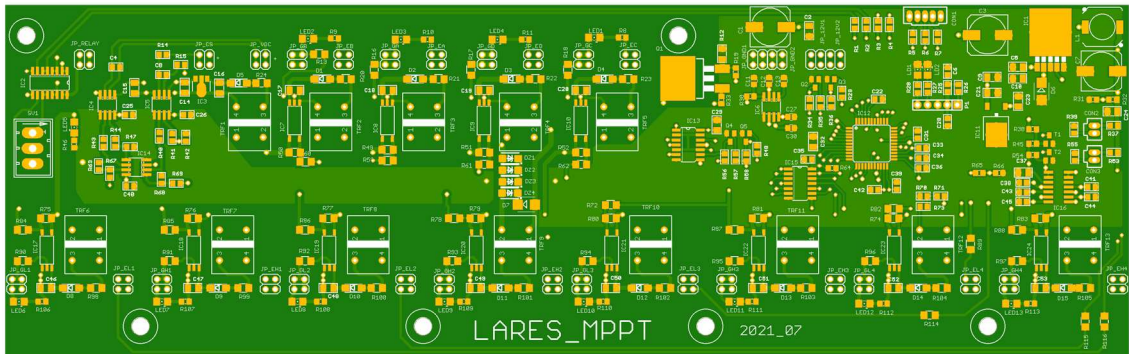
Elektrik özdirenç ölçümlerinin gerilim farkı okuması kadar hassas olması gereken bir diğer bileşeni verici (*transmitter: TX*) olarak isimlendirilen güç çıkış birimidir. TÜBİTAK 1512 proje kapsamında geliştirilen kablosuz alıcılar ile entegre olarak çalışabilecek bir verici de geliştirilmiştir. Bu vericinin çıkış gücü optimize edilmiş ve 800Watt olarak sabitlenmiştir. Vericinin kablosuz alıcılar ile senkronize çalışma zorunluluğu bulunduğundan aynı kablosuz haberleşme ağına dahil olması dolayısı ile kendisinin de kablosuz haberleşme yeteneği olması gereklidir. Bu nedenle verici sistem de bir kablosuz haberleşme modülü ile donatılmıştır. Verici tarafından üretilen çıkışın gerilimi de ölçümlerin yürütülebilmesi için önemlidir. Bu bakımdan verici sistemin çıkış gerilimi tepeden tepeye (*peak to peak*) 1600V ($\pm 800V$) olarak düzenlenmiştir. Vericinin 0-5A aralığında kullanıcı tarafından ayarlanabilir çıkış akımını kare dalga formunda üretebilmektedir. Vericinin kendi sağlığını korumak ve iş güvenliği açısından çeşitli koruma sistemleri bulunmaktadır. Acil durdurma butonu ile akım aniden durdurulabilirken, kısa devre benzeri elektronik koşullar için de koruma tedbirleri alınmıştır. Ayrıca pratikte karşılaşılan önemli sorunlardan biri de yüksek güç seviyelerine çıkan vericinin ters polaritede beslenmesi nedeni ile ortaya çıkan arızalardır. Bu durum için de bir koruma devresi sisteme eklenmiştir. Verici sistemin kendi kontrol biriminde 70MHz 64KB programlama alanına sahip, 16Kb RAM alanı olan, 3M örnek/saniye örnekleme hızında 4 kanal sürekli sayısal dönüştürücüsü olan, 10 adet SMPS PWM kanalı olan bir mikro kontrolcü tercih edilmiştir.

Verici birimin üç ana bileşeni vardır. Bu bileşenler, güç üretim kartı, güç kontrol kartı, yönetim ve ölçüm kartıdır. Bu bileşenlere ait teknik çizimler sırası ile Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de verilmiştir.

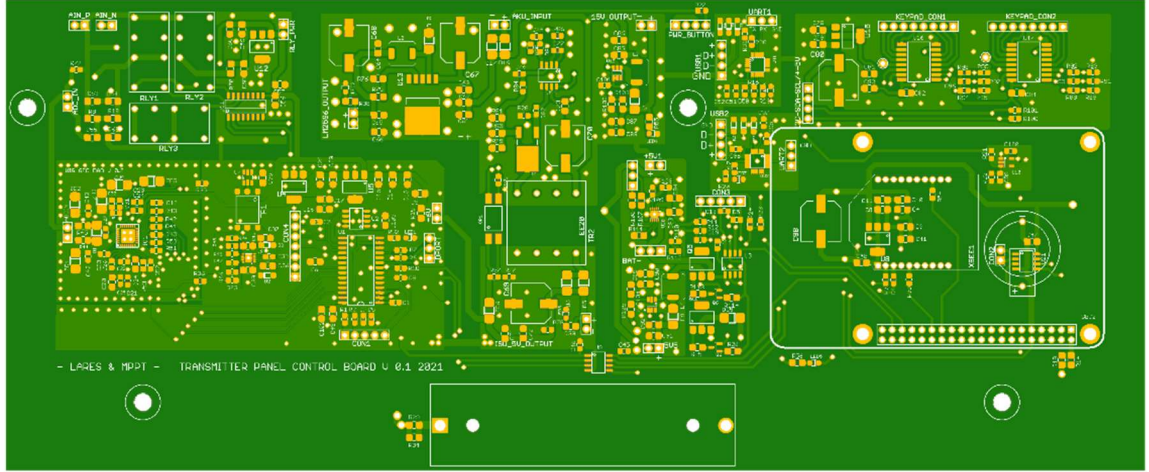


Şekil 3.1 Güç üretim kartı

Şekil 3.1’de verilmiş olan güç üretim kartı A4 kâğıt boyutundadır. 16 adet trafonun seri ve paralel kombinasyonu ile kurgulanan mimari, 12V giriş gerilimini, 0-800V aralığına darbe genişlik modülasyonu %50 dolulukta 100kHz frekansta faz kaydırma ile yöntemi ile çıkartmaktadır.



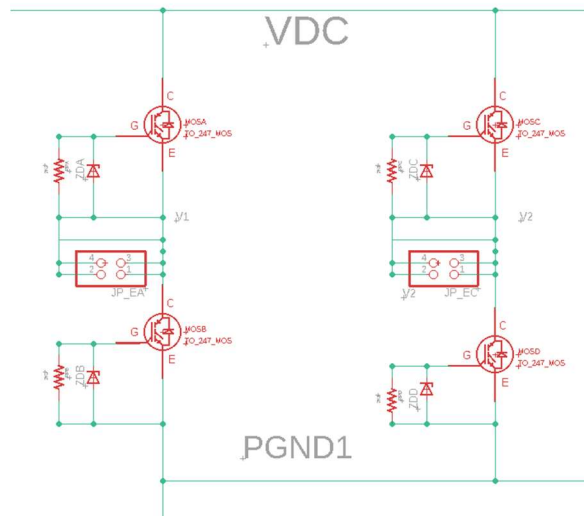
Şekil 3.2 Güç kontrol kartı



Şekil 3.3 Yönetim ve ölçüm kartı

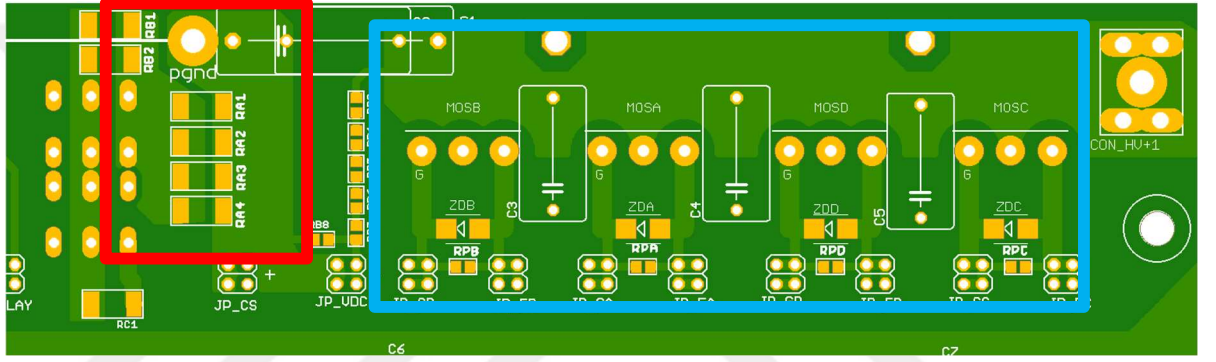
3.1 Kare Dalga Yönetim Birimi

Doğru akım özdirenç ölçümlerinde yere uygulanan akım formu farklı yaklaşımlar da bulunmasına karşın genellikle kare dalga formundadır. Kare dalganın periyodu ölçüm amacı (DES, Tomografi, IP vb.) çerçevesinde değişebilmektedir. Genel bir yaklaşım ile 0.125Hz-4Hz aralığında değiştiği söylenebilir. Ölçümlerde kare dalga kullanmanın bir nedeni de yerde doğal olarak bulunan doğal gerilim (*self potential*, *SP*) etkisinin ölçümlerden arındırılmasıdır. Bu nedenle cihaz çıkışının kare dalga periyoduna bağlı olarak pozitif ve negatif polaritelerde akım çıkışı sağlaması gereklidir.



Şekil 3.4 Köprü çevirici (inverter) devresi

Güç kartında üretilen çıkış gerilimi Şekil 3.4’de verilen H köprü çevirici devresi aracılığı ile $\pm$ çıkış gerilimi olarak yer yüzeyine uygulanmasını sağlar. Bu devrede kullanılan MOSFET veya IGBT devre elemanlarının iletme girme ve iletimden çıkma hızlarına bağlı olarak çıkış devresinin sinyal üretebilme kabiliyeti belirlenir. Farklı frekanslarda sinyal üretebilme hızı sadece bu bileşenlere bağlı değildir. Birim tarafından üretilen akımın büyüklüğü hassas bir şekilde ölçülmelidir. Bu nedenle cihaz tarafından üretilen akımın büyüklüğü Şekil 3.5’de kırmızı işaretli olarak verilen şönt direnç bloğu ile yapılmaktadır. Öte yandan, mavi ile işaretli yer H Köprü çeviri birimidir.



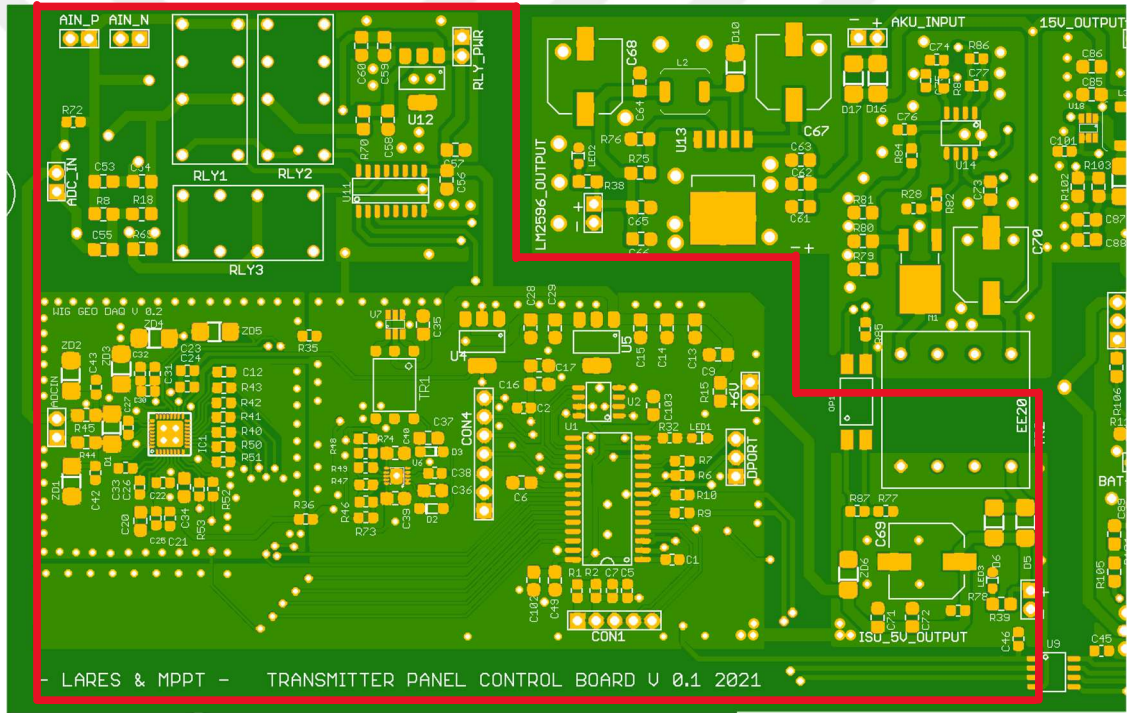
Şekil 3.5 H Köprü çevirici (inverter) ve akım okuma devresi kart üzeri görünümü

3.2 Akım Ölçümü ve Sabit Akım Kontrolü

Sistem akım okumasını iki kademedeyi yapmaktadır. 0-100mA aralığında olan akımları görece yüksek değerli şönt direnç üzerinden geçen sistemin dönüş akımının oluşturduğu gerilim değerinden tespit etmektedir. Çıkış gerilimi, H-köprü devresinden geçtikten sonra yer yüzeyinden ve daha sonra H-köprünün dönüş kolu üzerinden güç kartına geri gelmektedir. 100 mA-2000 mA aralığında görece orta değerli şönt direnç üzerinden okuma yapılmaktadır. 2000mA-5000mA aralığında da görece düşük değerli şönt direnç üzerinden okuma yapılmakta ohm yasası çerçevesinde bilinen direnç üzerinde okunan gerilim değerlerinden akımın büyüklüğü hesaplanmaktadır.

3.3 Gerilim Farkı Ölçüm Birimi

Kablosuz alıcılarda tasarlanan ölçüm birimi (analog/sayısal dönüştürücü) verici içerisinde de yerleşik olarak kullanılmaktadır. Bir öz direnç ölçüm sistemindeki alıcı tarafı oluşturan bu birimin sistemin kalanından elektronik olarak izole olması gereklidir. Bu nedenle besleme kaynağı, alıcı devresi, haberleşme kanalları birbirinden izole edilerek tasarlanmış ve üretilmiştir. Kablosuz alıcılardaki mimari bu devrede de kullanılmıştır. Filtre tasarımı, kontak direnç ölçüm yapısı, zaman serisi kaydı için gerekli RAM dahil tüm yapı verici içerisine taşınmıştır. Bu birimin teknik çizimi Şekil 3.6’da verilmiştir.



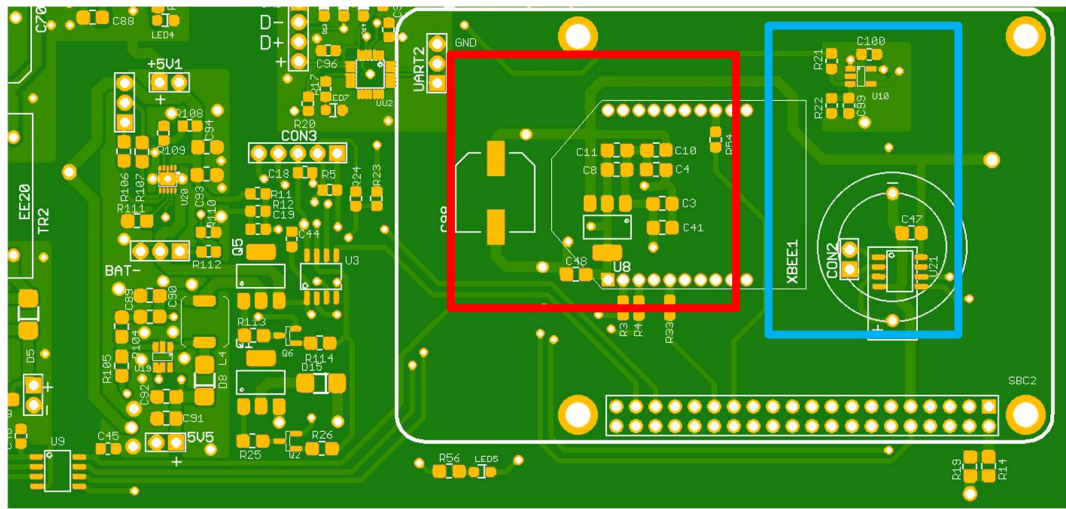
Şekil 3.6 Gerilim farkı ölçüm birimi (Kırmızı)

3.4 Kablosuz Haberleşme Birimi

Vericinin kablosuz haberleşmeye dahil olabilmesi için Bölüm 2.4’de verilen kablosuz alıcılardaki mimari kullanılmıştır. Xbee2 modülü aracılığı ile verici birim koordinatör olarak görev almakta ve tüm sistemi yönetmektedir. Tüm sistemin ölçüm parametreleri

iletilmekte, elektrot seçimleri yaptırılmakta ve ölçüm başlangıç anında tetikleme sinyali iletilmektedir. Ölçüm 2 farklı şekilde gerçekleştirilmektedir.

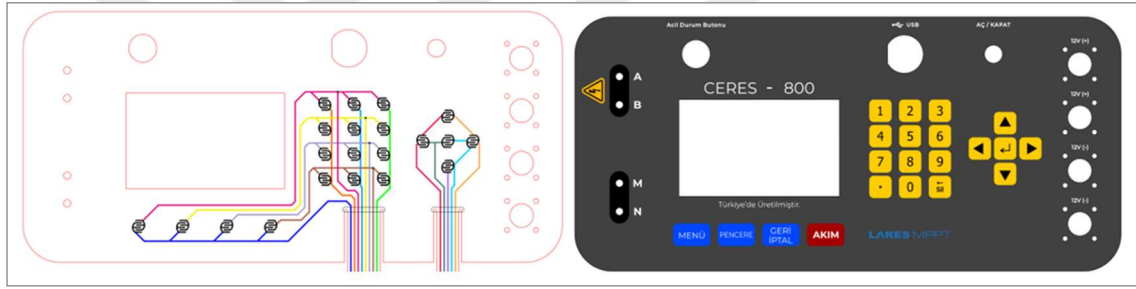
1. Doğrudan tetik sinyalinin iletilmesi: Tüm düğüm noktalarına geçerli akım elektrotlarından yere akım uygulanmaya başlanacağına dair bir tetik (*trigger*) sinyali yayınlanmakta ve haberleşme sürelerini gözeterek 50ms sonra akım üretimini başlatmaktadır. Eş zamanlı olarak sisteme bağlı tüm alıcılar ölçüme başlamaktadır.
2. Ölçüm başlangıç zamanının iletilmesi: Tüm düğüm noktalarına ve dağıtıcılara ölçümün başlangıç zamanı bilgisi gönderilmektedir. Bu yöntem ile tüm alıcılarda gerçek zamanlı senkron bir ölçüm yapılabilmesi için zaman bilgisinin tüm düğüm noktalarında aynı olması gereklidir. Bu koşulun sağlanabilmesi için tüm alıcıların saha kurulumu öncesi dahili RTC saatleri aynı saat bilgisine senkron edilmesi gerekmektedir. Bu senkron işlemi GPS modülü bağlı olması durumunda GPS zamanı üzerinden de sağlanabilmektedir. Bu sayede tüm düğüm noktalarına ölçüm saati bilgisi iletilerek ilgili zamanda akım uygulaması başlamakta ve düğüm noktaları (kablosuz alıcılar) ölçümlerini yapmaktadırlar. Verici üzerinde de bir RTC ve kablosuz haberleşme elektronığı yer almaktadır. Bu bileşenlerin elektronik kart devresi üzerindeki konumları Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 Kablosuz haberleşme birimi (kırmızı), gerçek zaman sayıcı (RTC) ve batarya gerilimi takip birimi (mavi)

3.5 Tuş Takımı Yönetimi ve Ön Panel

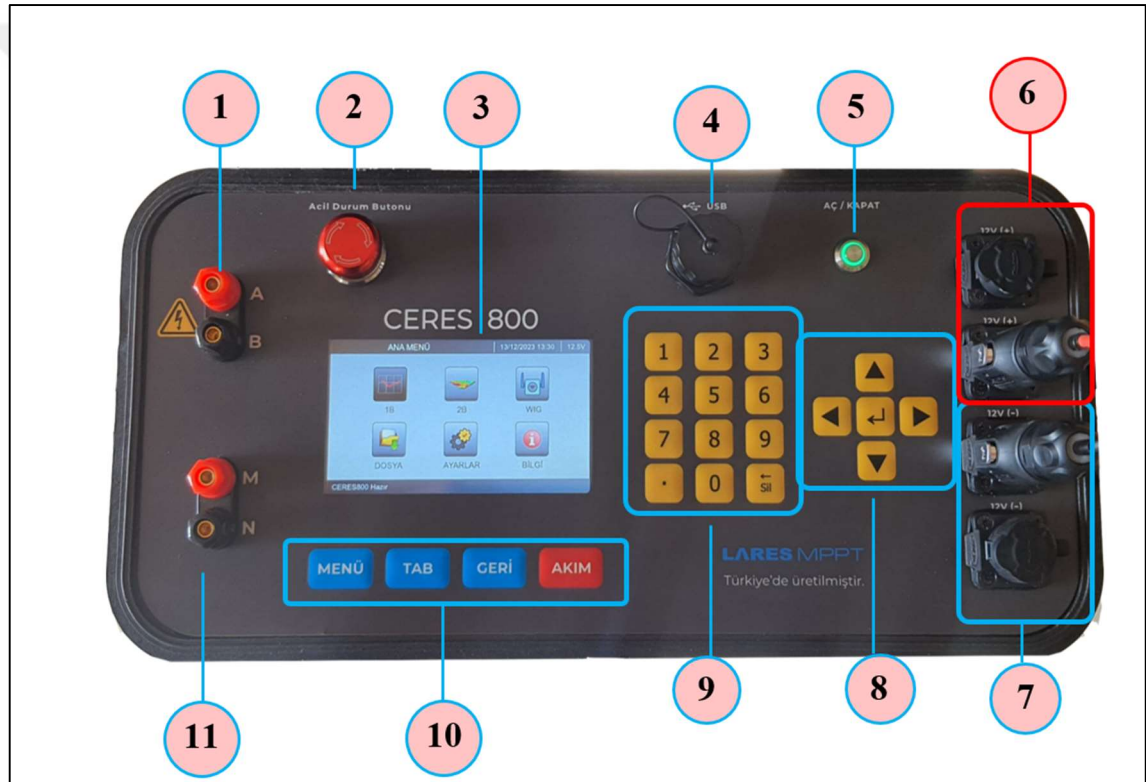
Sistemin yönetilmesi için bir tuş takımı tasarlanmıştır. On adet rakam, altı adet görev tuşu beş adet yönlendirme ve onay tuşlarından oluşan tuş takımı cihaz üzerinde çalışan işletim sistemine komutlar iletmek, ayarları değiştirmek, ölçümleri başlatıp durdurmak için işlevsel görevlere atanmıştır. Tuş takımı üzerinden basınç uygulanan buton bir matris mimarisindeki düğüm noktalarının kesişim yerlerinden ilgili olduğu noktaya göre kısa devre olmaktadır. Bu kısa devre noktasında ilgili giriş/çıkış pinlerinin mantıksal seviyesi 0V (0) olduğu gözlenmektedir. Bu ilişkiden yola çıkarak hangi tuşa basıldığı belirlenip kullanıcı arayüzünde tepki oluşturulmaktadır. Cihazın paneli, tuş takımı şeması Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8 Tuş takımı paneli

Ön panel üzerinde 4 adet batarya (Akü) giriş konnektör yuvası vardır. Sistem 12V standart kurşun asit (otomobil) aküler ile beslenecek şekilde kurgulanmıştır. 800W güç çıkışı sağlayan sistem besleme girişi olan aküden 80 amper düzeyinde akım çekebilmektedir. Bu akım 8 AWG (10 mm²) çapında 1 metrelik 2 adet 12V, 2 adet GND kablosu üzerinden taşınmaktadır. Kablo başına 40A düşmektedir. Her bir konnektör üzerinden de 40A akım akmaktadır. 800W güce çoğu zaman ihtiyaç duyulmamaktadır. Gerekli durumlarda ise darbe süresi kadar bu güç ihtiyacı olduğu için sistemin bağlantı bileşenleri bu akım seviyelerinde çalışabilecek şekilde tercih edilmişlerdir. Ön panelde 5” boyutunda renkli 800x480 piksel LCD ekran bulunmaktadır. Ayrıca IP67 standardını sağlayan USB bağlantı noktası, açma kapama düğmesi, acil durdurma tuşu, iki adet muz soket (Banana Socket) noktası vardır. Tüm bu bileşenlerin yerleştirildiği kullanıcı panelinin ve sistem üzerinde çalışan yazılımın arayüz görüntüsü Şekil 3.9’da verilmiştir.

Burada paylaşılan ölçüm cihazı aynı zamanda kablosuz alıcıların denetimini de yapan merkezi birimi de içermektedir. Şekil 3.3’de verilen yönetim kartı üzerinde yer alan tek kart bilgisayar (SBC: *Single Board Computer*) kablosuz tüm bileşenleri ve kablosuz alıcıları eş zamanlı denetlemekte, ölçülen verileri bir kayıt biriminde saklamakta, ölçüm sırasında ve sonrasında ise verileri görüntülemektedir. Raspberry Pi adıyla bilinen bu sistemler çok sayıda giriş/çıkış arabirimini desteklemektedir (www.raspberrypi.com). Bu yönüyle temel, orta ve üst düzey donanımların birçoğu ile bir arada kullanılabilmekte, elektronik cihaz tasarım ve üretiminde önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Sistemde kullanılan Raspberry Pi Model 3B sürümüdür.



Şekil 3.9 Öz direnç ölçüm sisteminin panel görünümü ve bileşenleri

Panel üzerindeki bileşenler aşağıda tarif edilmiştir:

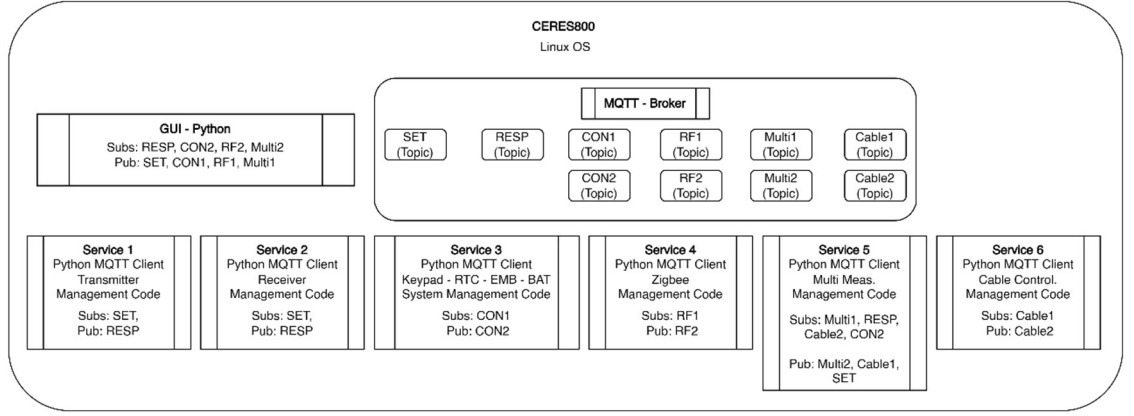
1. Akım elektrotları (A – B) çıkış konnektörleri
2. Acil durdurma butonu
3. LCD ekran (5")
4. USB bağlantı noktası
5. Açma kapama butonu

6. Güç besleme + girişleri
7. Güç besleme GND (-) girişleri
8. Yön tuşları ve giriş (enter) tuşu
9. Numerik tuş takımı
10. Menü tuşları
11. Gerilim elektrotları (M-N) giriş konnektörleri

3.6 Arayüz ve Sistem Yönetimi

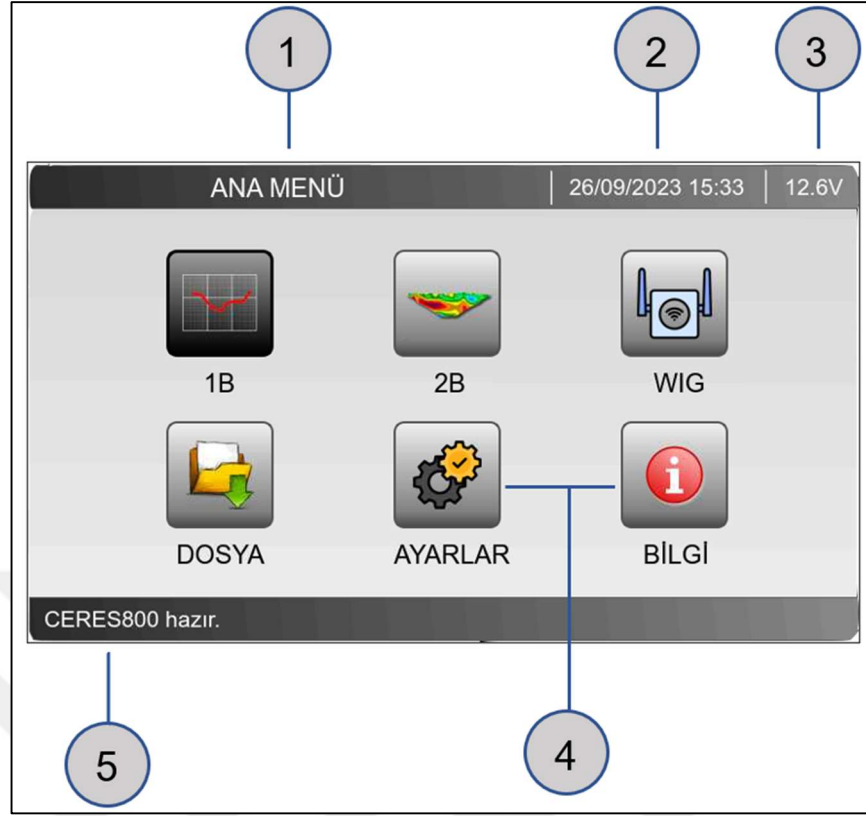
Bütün sistemi işleten yönetim yazılımı verici birimin de içinde yer aldığı ana ünite de çalışmaktadır. ARM firmasının 8 çekirdek 1.4 GHz çalışma frekansı sahip 64 bit işlemci, 1 GB LPDDR2 SDRAM, 2.4GHz IEEE 802.11 b/g/n standardını karşılayan kablosuz WiFi alt yapısı bulunan bir tek kart bilgisayar bulunmaktadır. Bu bilgisayar linux çekirdeği ile yönetilmektedir. İşletim sisteminin üzerinde tüm ölçüm bileşenlerini yöneten, ölçüm ayarlarının yapılmasını ve ölçülen verilerin kaydedilmesini sağlayan yazılım Python programlama dilinde geliştirilmiştir. Çok sayıda birimi denetleyen ana ünitenin birden fazla görevi eş zamanlı yapması gerekebilmektedir. Dolayısı ile yukarıdan aşağıya tek yönlü akan bir yazılım mimarisi ile bu gereksinim karşılanamaz. Asenkron programlama olarak adlandırılan bir yapı ile birçok görev eş zamanlı gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum ancak farklı servis ya da program rutinlerinin eş zamanlı çalışması ve bunların aralarında kesintisiz haberleşebilmesi ile olanaklıdır. Python programlama dili ve çeşitli destekleyici araçlar ile bu mimari kurulabilir. Mevcut cihazda ana denetim birimi üzerindeki işletim sistemi içerisinde çalışan bir servis (Mosquitto Broker: MQTT) tüm asenkron bileşenler/servisler arasındaki haberleşmeyi sağlamaktadır. İstemci (Client) konumunda olan Python programları abone oldukları ve yayın yaptıkları konular (Topic) üzerinden birbirleri ile yerel ağ (sadece PC) da iletişim kurmaktadır. Her bir Python programı işletim sistemine bir hizmet olarak tanımlanmaktadır. İşletim sistemi hizmetlerin bir hata oluşması durumunda otomatik olarak yeniden başlatabilmektedir. Bu linux hizmet yapısı tamamen özgün olup tüm yazılım ve hizmet girdileri tezin yazarı ve danışmanı tarafından geliştirilmiştir.

Sistem yönetimi için kullanılan yazılım ve servis altyapısının şematik gösterimi Şekil 3.10’da verilmiştir. Burada tüm hizmet ve yazılımların işletim sistemi üzerindeki çalışma mimarisi genel hatları ile verilmiştir. Şekilde grafik olarak özetlenen tüm altyapı bir düzeyde teknik bilgi olup son kullanıcı açısından çok anlamlı bulunmayabilir. Bu nedenle kullanıcı dostu, etkileşimli bir arayüz tasarlanarak ön planda çalıştırılmıştır. Bu kullanıcı arayüzü ile panel üzerindeki tuşlar ile etkileşim sağlanmaktadır. Gerekli durumlarda menüler arasında gezilebilmekte, sayısal tuş takımı ve yönlendirme tuşları ile kullanıcı girişleri sağlanabilmektedir.



Şekil 3.10 Ana denetim birimi üzerinde çalışan yazılımın mimarisi

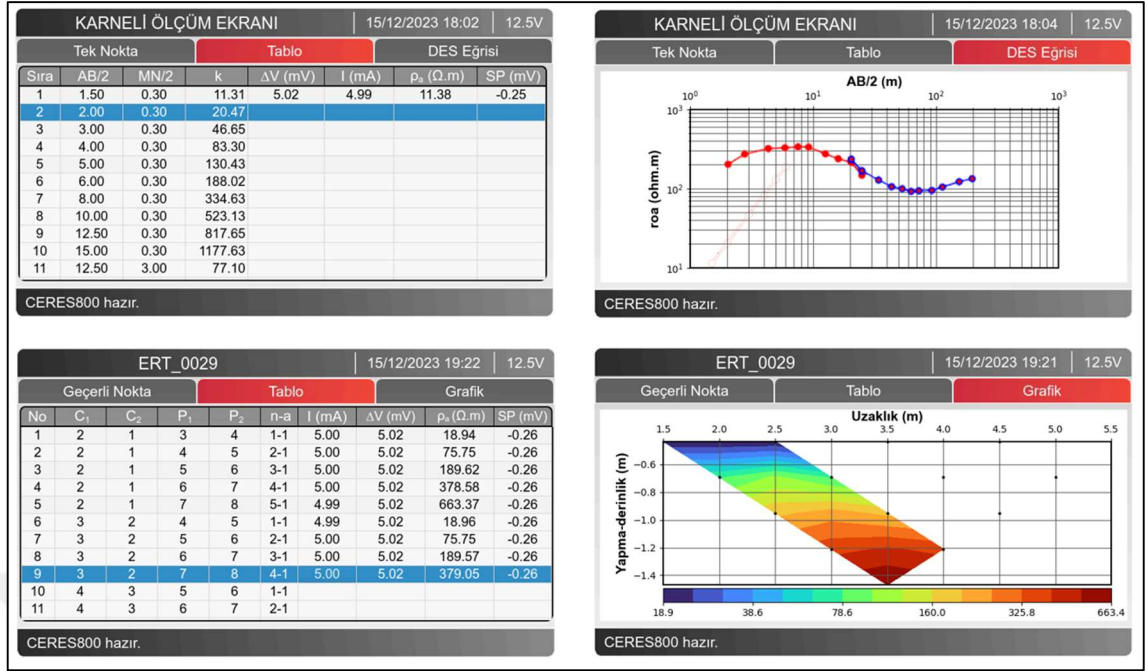
Bu arayüz tüm ölçüm denetimlerini ve ölçüm sonuçlarını bir ekranda kullanıcıya sunmakta, önceki bölümlerde anlatılan tüm birimler ile ilgili denetimleri kullanıcıya görsel ve etkileşimli olarak açmaktadır. Burada ayrıntılarına girilmeyecek olup yazılımın ana ekranına ait bir görsel Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11 Sistemin ana ünitesinde çalışan kullanıcı arayüzü

Kullanıcı arayüzü cihaz panelinde bulunan tuşlar aracılığı ile yönetilmektedir. Şekil 3.11’de verilen ana menü görünümündeki simge ve alanların karşılığı aşağıda verilmiştir.

1. Bulunulan menünün (ekranın) başlığı
2. Tarih saat paneli
3. Akü gerilim göstergesi
4. Menü seçenekleri
5. Durum bildirim çubuğu



Şekil 3.12 CERES800 Ölçüm ekranları

4. VERİ TOPLAMA

Ölçüm sisteminin bütününi oluşturan verici, yerleşik alıcı ve kablosuz alıcılar laboratuvar ve saha koşullarında denenerek doğrulanmıştır. Sahada yapılacak ölçüm sonuçlarının da doğrulamaya ihtiyacı bulunduğuundan buna uygun bir uygulama alanı olan arkeojeofizik araştırma seçilmiştir. Arkeojeofizik araştırmalarda ele alınan yer modeli genel olarak bir dolgu tabakası içerisinde gömülü görece yüksek öz dirence sahip kalıntılardan oluşmaktadır. Jeofizik açıdan basit sayılabilecek bu modelde yanal ya da çizgisel süreklilikler söz konusu olduğundan uygulanacak ölçme düzeneğini denemek açısından uygun olacaktır. Burada önemli bir noktanın altını çizmek yararlı olacaktır. Çalışmada kullanılan kablosuz alıcılar temel olarak doğru akım öz direnç ölçümlerindeki kanal sayısını artırmak, bunu yaparken kablo karışıklığına neden olmamak, standart dizilimler dışına çıkan yerleşimler yapmak, merkezi bir cihaza bağlı olmadan görece uzak bir noktada ölçüm yapabilmek amaçları için tasarlanmıştır. Sayılan özelliklerin tümü büyük ölçekli örneğin maden araştırmaları gibi bir jeofizik araştırmada daha önemli kazanımlar ve kolaylıklar sağlayacaktır. Ancak burada uygulamanın başlıca amacı daha çok kavramsal doğrulama (*proof of concept*) olduğundan görece daha küçük ve kolay bir uygulama alanı olan arkeolojik araştırma seçilmiştir.

Arkeolojik alanların araştırılmasında doğru akım öz direnç, en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Ancak bu alanların araştırılmasında uygulanacak yöntemin seçiminde hız, duyarlılık ve çözünürlük parametrelerini öne çıkmaktadır Becker (2009) Akca (2022). Son zamanlardaki gelişmelere bağlı olarak bu üç parametre aynı anda yer radarı yöntemi tarafından sağlanmaktadır. Bu nedenle bu alanların araştırılmasında baskın yöntem haline gelmiştir. Elektrik yöntemler çok başarılı sonuçlar sunuyor olmakla birlikte birim zamanda taranan alan ve işçilik yükü açısından bakıldığında yer radarına göre tercih edilmesi daha zor bir yöntem haline gelmektedir. Öte yandan yer radarı yönteminin saha uygulaması çeşitli durumlarda kısıtlı hale gelebilmektedir. Örneğin yüzey örtüsünün kil içerikli olması gibi durumlarda elektriksel iletkenlik artmaktadır. Buna bağlı olarak elektromanyetik dalgalar yer içine nüfuz edemeden sönmektedir. Yer radarını uygulanabilir olmaktan çıkaran bu gibi durumlarda doğru akım öz direnç çözüm sağlayan bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada daha önce kapsamlı doğru akım özdirenç ölçümleri yapılan ve sonuçları yayınlanmış (Akca vd. 2019) olan bir çalışma alanında önerilen kablosuz alıcılar ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Pamfilya bölgesinin önemli bir kenti olan Side antik kentinde gerçekleştirilen çalışmalarda önemli bulgulara ulaşılmıştır. Sonuçları oldukça belirgin olan alanda tez kapsamında geliştirilen ölçüm sistemi ile ölçümler yapılmıştır. İzleyen bölümde çalışmanın yapıldığı alan ile ilgili bilgiler, ölçümlerin yapılmasında kullanılan düzenek ve bulgular verilmiştir.

4.1 Side Antik Kenti

Side, antik dönemde Pamphylia olarak adlandırılan bir bölgede yer alan eski bir Anadolu şehridir. (Bosch, 1957) Şehir, Antalya Körfezi'nin doğusunda konumlanmış olup, bölgedeki tek doğal limana sahip olan kıyı yapısıyla dikkat çeker. Bu nedenle, Side kısa sürede en önemli bir liman şehri ve ticaret merkezi haline gelmiştir. Şehirde "Sidetic" adında yerel bir dilin konuşulduğu bilinmektedir (Nollé, 1993) (Nollé, 2001). Side, MÖ 3. ila 1. yüzyıllarda ve Roma ile geç antik dönemde (özellikle MS 2.-3. ve 5.- 6. yüzyıllarda) en zengin ve mamur dönemini yaşamıştır. Şehir, Helenistik, Roma ve Bizans dönemlerinde Pamphylia'nın tanınmış merkezi olarak varlığını sürdürmüştür. Doğu Akdeniz ticaretinde önemli bir merkez haline gelmesi, şehrin sosyal, siyasal ve sanatsal yaşamını etkilemiştir. Şehrin bu zenginliğini kaybetmesi ile ilgili olarak (Mansel, 1978), ünlü Arap coğrafyacısı El-Idrisi'ye atıfta bulunarak yaklaşık 1150 yılında düştüğü hakkında şu bilgileri vermiştir: "Bu seyrek nüfuslu ve harap yer, önceden parlak ve kalabalık bir şehirdi. Sakinleri şehri terk edip iki gün uzaklıkta bulunan Yeni Antalya'ya (Attalia) taşındı". Buradan da anlaşılacağı üzere şehir MS 12-13. yüzyıllara kadar yerleşim görmüş sonrasında Anadolu'da hâkim olan diğer medeniyetlerce de dönem dönem yerleşim için kullanmıştır.

Side, konum olarak Türkiye'nin Akdeniz sahilinde, Antalya Körfezi boyunca yer almakta olup eski Melas Vadisi'nin yaklaşık 5 km batısında ve Antalya'nın yaklaşık 65 km doğusunda küçük, düz bir yarımada üzerine kurulmuştur (Şekil 4.1). Yarımada alt tabakası, Pamphylia'daki diğer şehirlerde yaygın olan sert, koyu renkli ve değişik boyutlardaki çakıl taşlarından oluşur. Kara tarafını savunmak kolay olduğu için erken

yerleşimcileri çekmiştir. Verimli bir ova, konumu ilk yerleşimciler için cazip hale getirmiştir. Yüzyıllar boyunca refah içinde olmasına rağmen, şehir sakinlerinin 12. yüzyılda terk etmesinin ardından Side'nin takip eden dönemlerde yeniden yerleşim görmemiştir. 1895'te, sonradan "Selimiye" olarak adlandırılan küçük bir köy, başlangıçta Girit Adası'ndan gelen göçmenler tarafından kurulmuştur. Bu ilk yerleşim, zamanla yarımada geneline yayılmıştır.

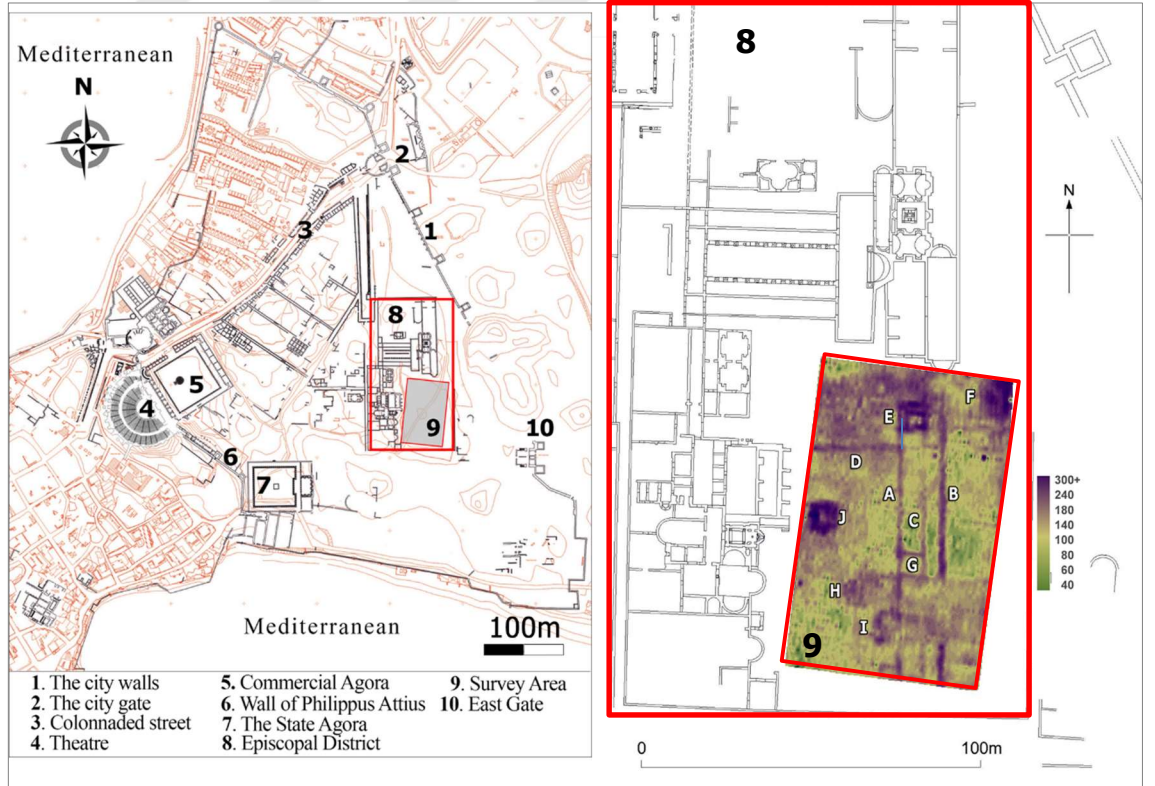


Şekil 4.1 Side Antik Kenti'nin konumu (Akca vd. 2019'dan alınmıştır.)

Şehrin günümüzdeki planı, ana yapılar ve bu çalışmanın kapsamındaki alanın konumunun birlikte gösterimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Bugün, Side, tiyatrosu, şehir dokusu, piskoposun sarayı ve şehrin sembolü haline gelen Apollo ve Tyche Tapınakları ile ünlü bir turistik merkez olarak dikkat çekmektedir.

4.2 Çalışma Alanı

Side'deki arkeolojik çalışmalar yaklaşık 70 yıllık bir geçmişe sahiptir. Özellikle, 1947'den 1967'ye kadar kazı başkanı olan Arif Müfid Mansel'in (1963) (1978) Roma İmparatorluğu ve Bizans dönemlerine tarihlenen birçok özel, kamusal ve kutsal binaları ortaya çıkardığı çalışmaları dikkate değerdir. Arkeolojik faaliyetleri sırasında Mansel, aynı zamanda şehrin kuzeydoğusundaki devasa bir alanı (Şekil 4.2'de 8 ile işaretlenmiş dikdörtgen alan) incelemiştir. Bu alan döneminin en büyük piskoposluk merkezlerinden biri olarak tanımlanmıştır. Tüm kompleks, yaklaşık 2.2 hektarlık bir alanı sınırlayan bir duvarla çevrilidir. Günümüzde yer yüzeyinde yer alan çeşitli yapılar bulunmaktadır. Ancak Şekil 4.2'de 9 numara ile numaralandırılmış alanda yüzeyde hiçbir yapı kalıntısı bulunmamaktadır. Bu alanın piskoposluk sarayına ait özel olarak düzenlenmiş bir bahçe olabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle, bu alanın jeofizik bir yöntem ile araştırılması planlanmıştır. Ayrıca, jeofizik araştırmaların sonuçlarının, Roma İmparatorluğu döneminde tüm alanın tasarımı ve düzeni hakkında bilgi sağlayacağı beklenmiştir.



Şekil 4.2 Side Antik Kenti genel yerleşimi (solda) ve 9 numaralı alana ait özdirenc derinlik haritası (0.75m)

Elektrik özdirenç tomografisi gibi modern jeofizik yöntemlerin kullanılması, Side Antik Kenti'nin altındaki gizli yapıları ve tarihî detayları anlamak için önemli bir araç olabilir. Bu yöntemler, kablosuz alıcılar ve dağıtık elektrot dizilimleriyle birleşerek, antik kentteki arkeolojik kalıntıların daha etkili bir şekilde haritalanmasına ve anlaşılmasına yardımcı olabilir. Yukarıda genel arkeolojik arka planı verilen alanda yaklaşık 60x90m boyutlarında bir alan doğru akım özdirenç yöntemi ile daha önce araştırılmıştır. Verilerin ters çözümünden elde edilen yer elektrik modelinden 0.75m derinliğe ait bir özdirenç haritası Şekil 4.2 (sağ)'da verilmiştir. Buradaki özdirenç dağılımı incelendiğinde açıkça bir dolgu tabakası içerisinde gömülü arkeolojik kalıntılar görülebilmektedir. Kuzey-güney yönünde neredeyse bütün çalışma alanı boyunca süren yapıların izleri seçilebilmektedir. Şekilde E harfi ile işaretlenen belirti özellikle ilginçtir. Burada iç içe iki duvar yapısı ile sınırlandırılmış bir mimari bölüm görülmektedir. Çalışmalarda ortaya konulduğu üzere, sarayın bahçesinde döneme ait bir süsleme bulgusu belirlenmemiştir. Yer içi modelleri arkeologlarla beraber değerlendirildiğinde saray döneminden önceki dönemlere ait yapısal devamlılıkların olduğu kanaatine varılmıştır. Bu alan tez kapsamındaki ölçüm düzeneği ile yapılacak ölçümler için seçilmiştir. Çalışma alanının güncel uydu görüntüsü üzerindeki konumu Şekil 4.3'te verilmiştir.

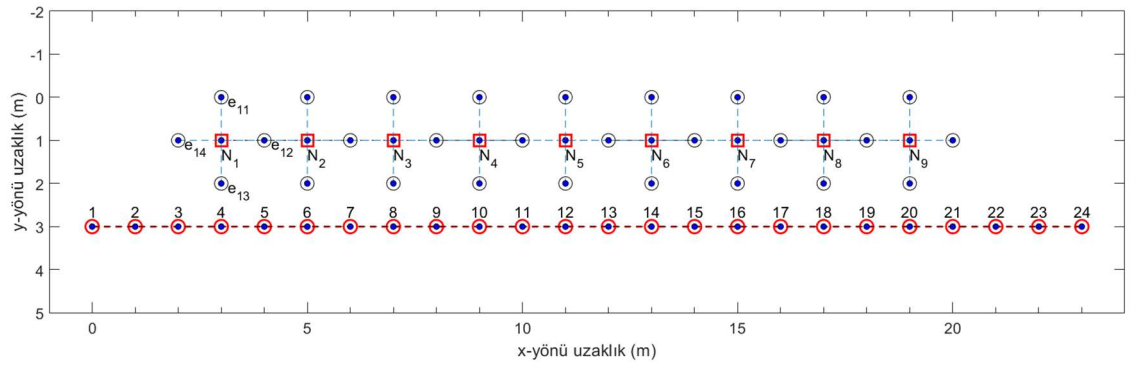


Şekil 4.3 Tez kapsamında kullanılan ölçüm alanının güncel uydu görüntüsü

Çalışma alanı D-B yönünde 23m, K-G yönünde ise 13m boyutlarındadır. Bu alanda yapılan ölçümlerin yerleşimleri ve geometrisi 4.3 bölümünde açıklanmıştır.

4.3 Ölçüm Geometrisi

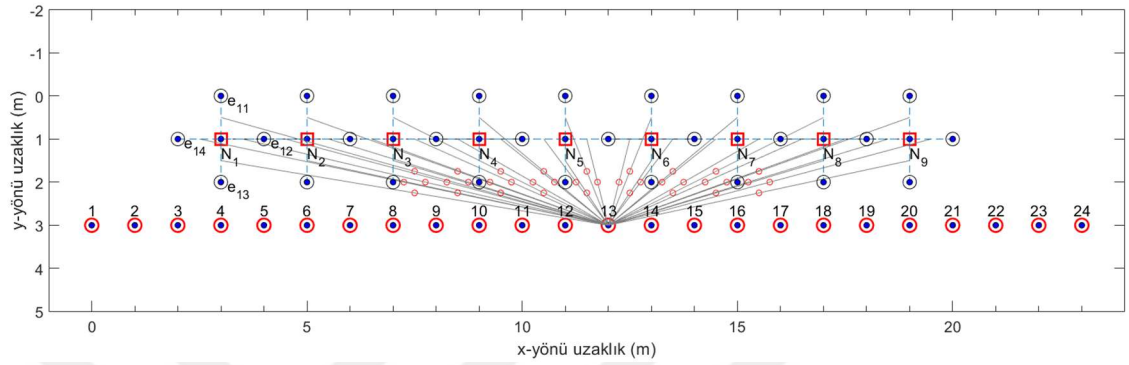
Alandaki ölçüm yönü, gömülü yapıları olanaklı olduğu ölçüde dik kesmek adına DB yönlü olarak planlanmıştır. Alandaki öncül çalışmada (Akca vd. 2019) da aynı doğrultu seçilmiştir. Ölçümlerde 9 adet kablosuz alıcı ve 24 elektrottan oluşan çok elektrotlu bir ölçüm sistemi bir arada kullanılmıştır. Tek bir serilim için kablosuz alıcılar ve çok elektrotlu ölçüm sisteminin saha yerleşimi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Kablosuz alıcılar ile yapılan bir serim ölçüm için saha yerleşimi

Şekil 4.4’te kırmızı daireler ile çevrili ve 1-24 arasında numaralanan konumlarda çok elektrotlu ölçüm sisteminin elektrotları yer almaktadır. N1-N9 arasından numaralanan ve kırmızı kareler ile işaretlenen konumlarda kablosuz alıcılar yer almaktadır. Her bir kablosuz alıcıya 5 elektrot bağlıdır. Elektrotların numaraları kuzeyden başlamak üzere saat yönünde e_{11} , e_{12} , e_{13} ve e_{14} şeklinde verilmiştir. Merkezde yer alan elektrot ise e_{10} şeklinde numaralandırılmıştır. Bu numaralandırmada, e_{14} bir numaralı kablosuz alıcıya bağlı 4 numaralı elektrot anlamına gelmektedir. Ardışık yerleştirilen kablosuz alıcıların 2 ve 4 (e_{12} ve e_{24} gibi) numaralı elektrotları ortaktır. Buna göre bir kablosuz alıcı ile M ve N gerilim elektrotları [0 1], [0 2], [0 3] ve [0 4] şeklinde seçilerek 4 yönde ölçüm yapılabilmektedir. Akım elektrotları için ise 1-24 numaralı elektrotlar pol-dipol dizilimi

çerçevesinde sırayla kullanılmaktadır. Bir örnek olması açısından 13 numaralı elektrottan akım verilirken kablosuz alıcılara bağlı elektrotlar ile yapılan ölçümlerin şematik görüntüsü Şekil 4.5’de verilmiştir. Kablosuz alıcılar haricinde ölçüm sistemi aynı anda çoklu kablo kullanarak da ölçümleri yaptığından eş zamanlı olarak klasik hat üstü (inline) ölçüm de yapılmaktadır.



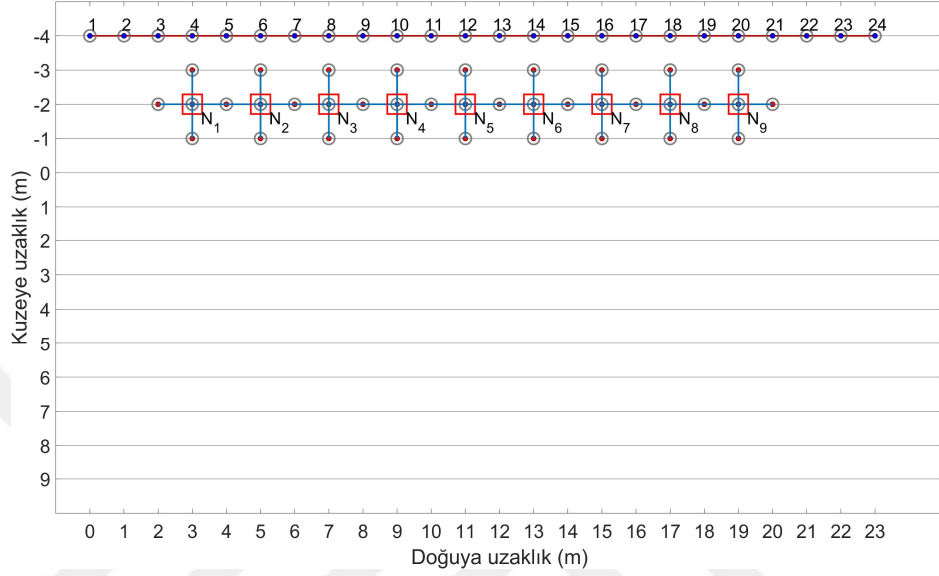
Şekil 4.5 Belirli bir elektrottan akım verilirken kullanılan alıcılar

Kablosuz alıcılar ile her bir akım konumu için K-G ve D-B eksenli toplamda 4 adet ölçü alınmaktadır. Çok elektrotlu sistemde sol yönlü pol-dipol elektrot dizilimi ile 5 seviye ölçüm alınmıştır. Bu düzenekle her bir serim için toplam 964 gerilim farkı okuması yapılmaktadır. Ölçümler sırasında sahada çekilmiş fotoğraflar Şekil 4.6’da verilmiştir.

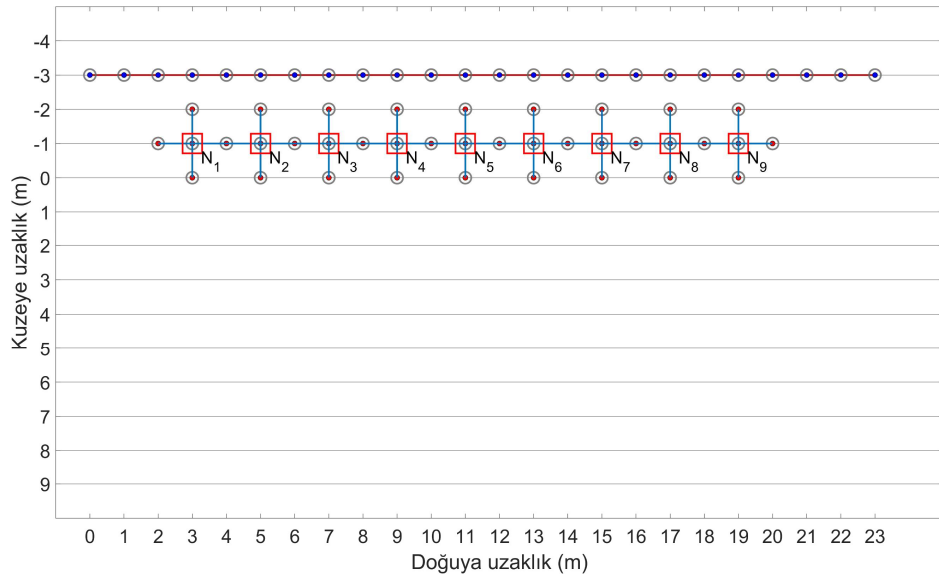


Şekil 4.6 Kablosuz alıcılar ve çok elektrotlu sistemin ölçümler sırasındaki görünümü

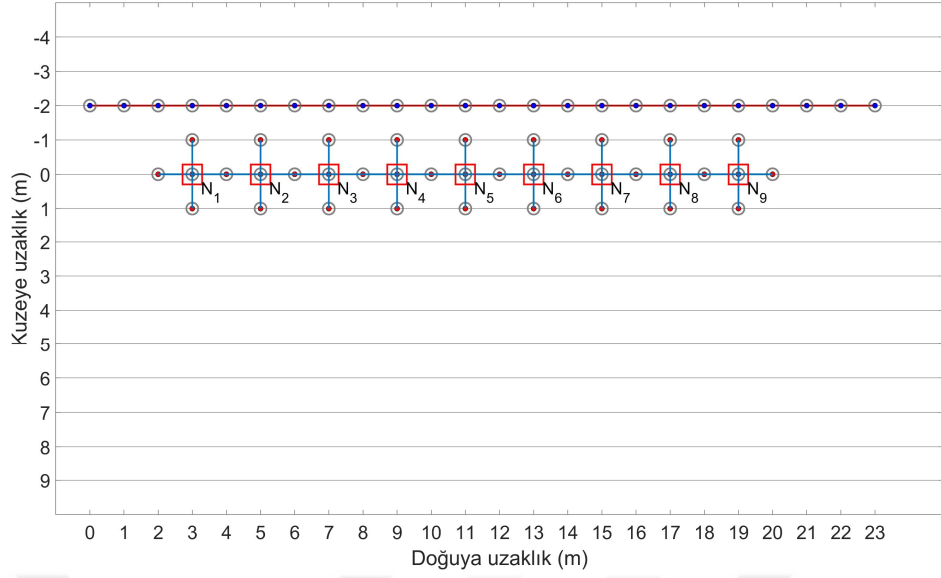
Şekil 4.6’da da görülen yerleşim bir serim olarak tanımlanabilir. Bu tanıma bağlı olarak toplam 10 serimde ölçüm yapılmıştır. Her bir serimde 9 adet kablosuz alıcının konumu ve akım verilen ve hat üstü ölçümlerin yapıldığı 24 elektrotun konumları izleyen şekillerde verilmiştir.



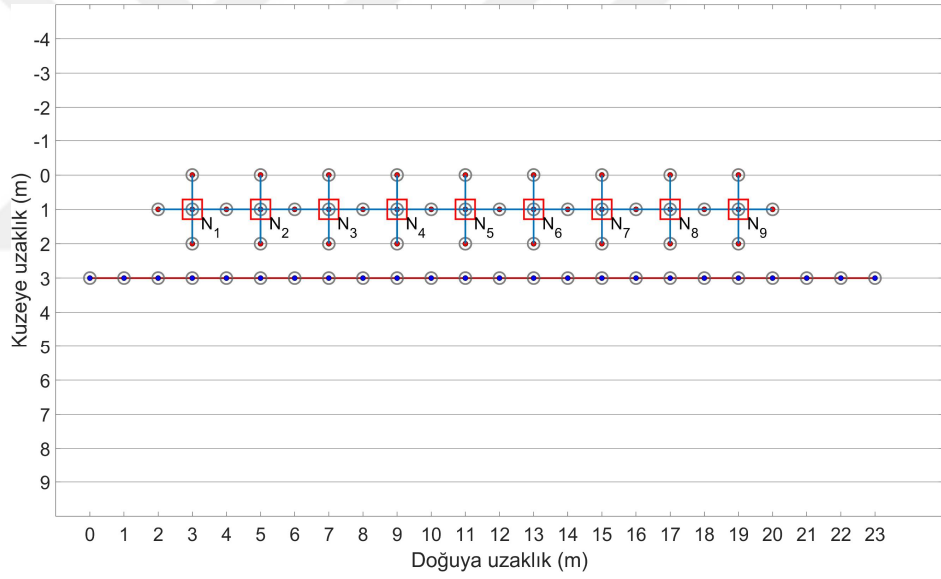
Şekil 4.7 S1 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



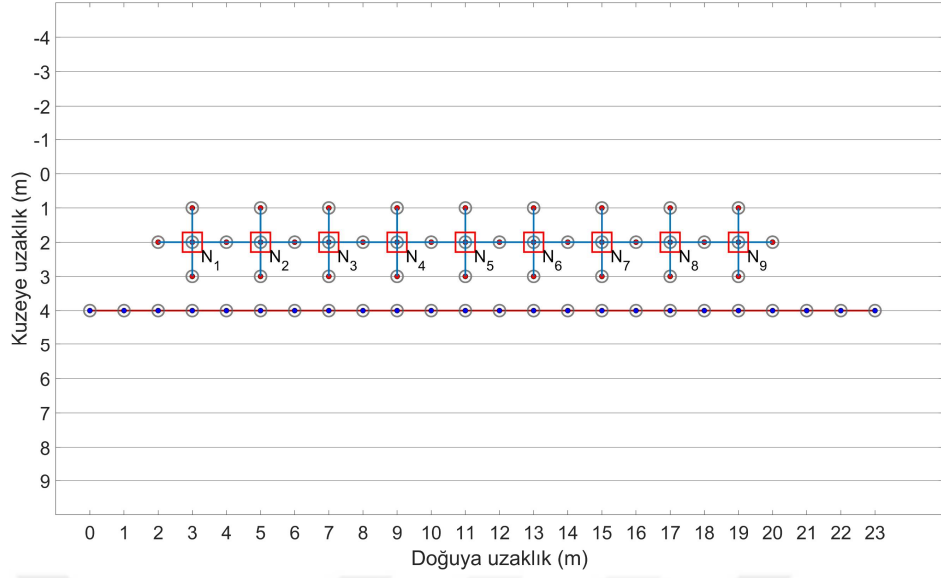
Şekil 4.8 S2 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



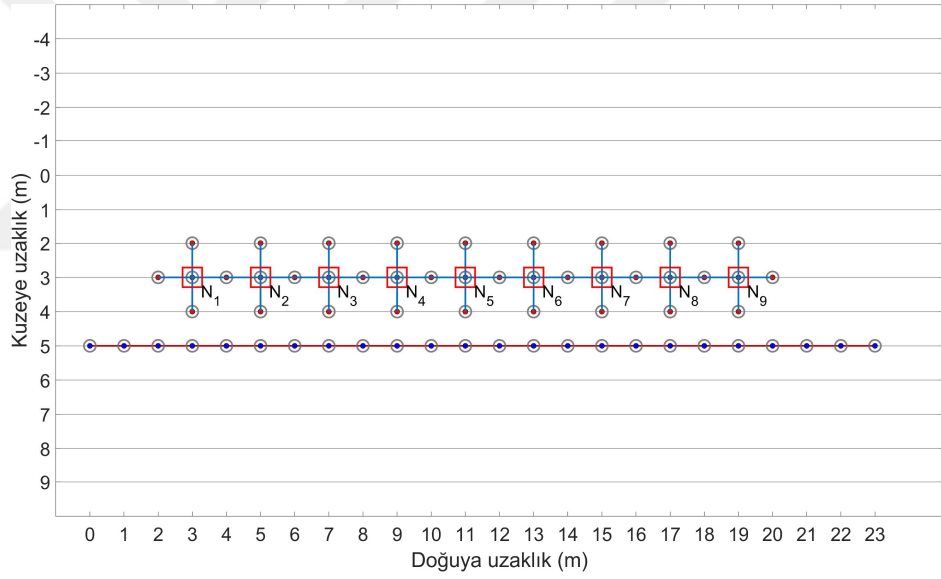
Şekil 4.9 S3 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



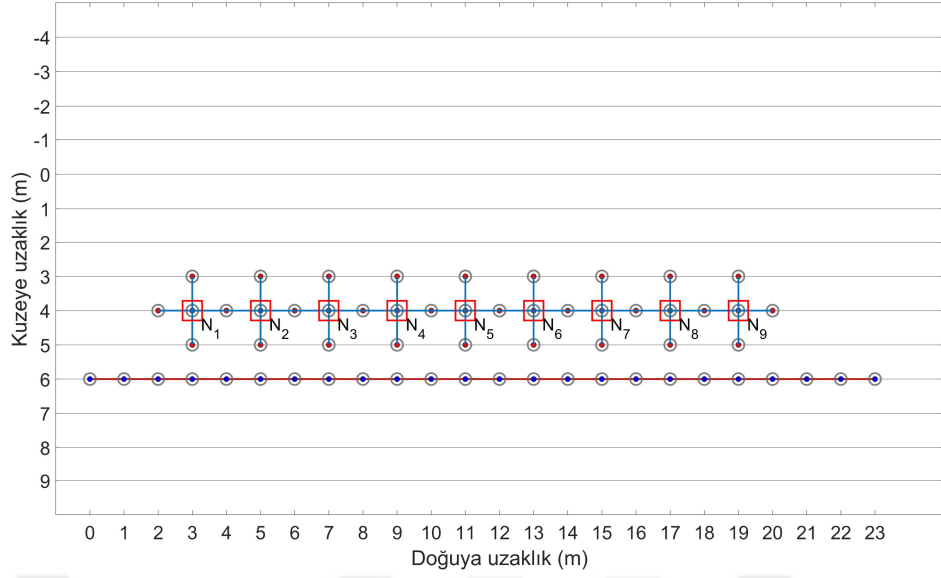
Şekil 4.10 S4 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



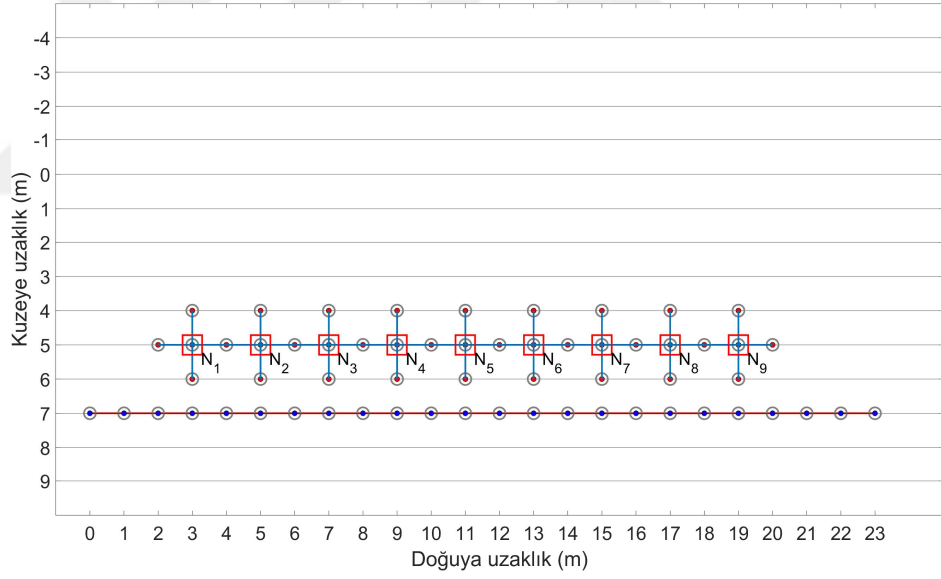
Şekil 4.11 S5 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



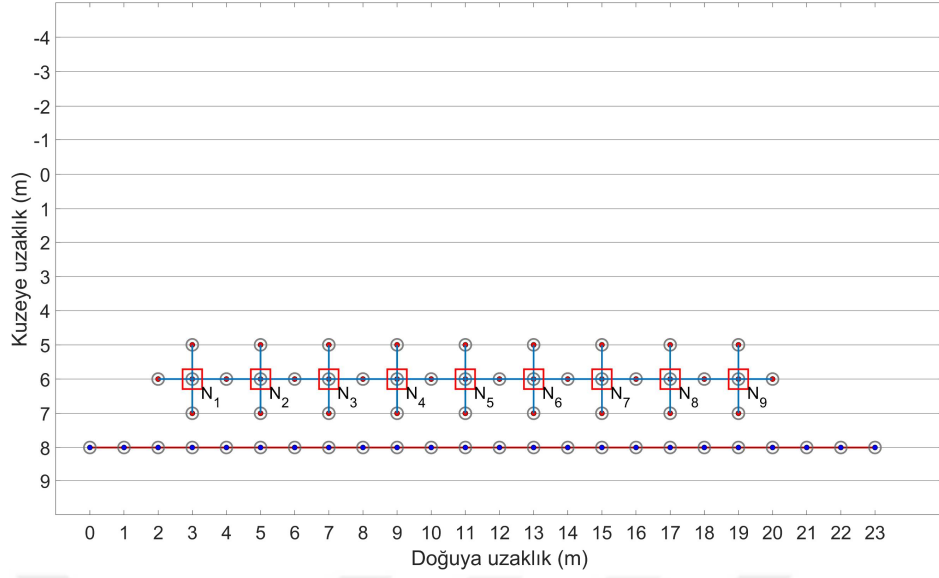
Şekil 4.12 S6 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



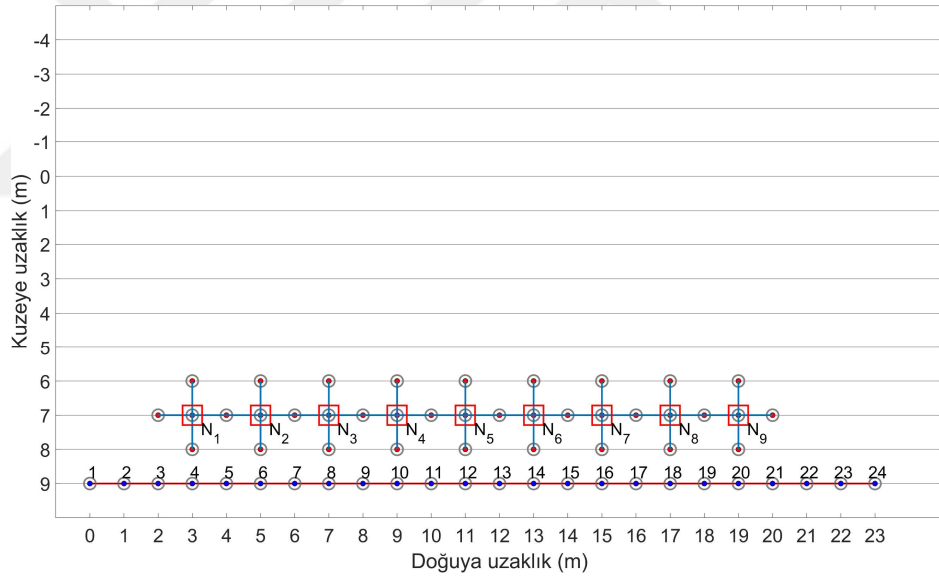
Şekil 4.13 S7 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



Şekil 4.14 S8 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



Şekil 4.15 S9 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi



Şekil 4.16 S10 seriminin çalışma alanındaki yerleşimi

Dağıtık kabloless alıcılar ile ölçümler alınırken akım elektrotlarının konumlandırıldığı profillerde pol-dipol verisi de toplanmıştır. 10 adet profilde 24 elektrot kullanılarak toplanan 5 seviye olan veri kümesinde toplamda 1000 adet 10 profil pol-dipol elektrik özdirenç verisi yer almaktadır. Dağıtık kabloless alıcılar, akım profilinden elektrot aralığı kadar kuzey veya güney yönde konumlandırılmıştır. 9 adet kabloless alıcı kullanılarak veri toplanmıştır. Profil boyunca sıralı olarak yer alan kabloless alıcıların sırasıyla ilkinin

doğusundaki elektrot ile ikincinin batısındaki bir elektrotları ortak kullanılmıştır. Bu şekilde kurgulanan çalışmada toplamda 8064 adet veri toplanmıştır. Akım hattı üzerindeki ölçümlerin de verisi eklenerek toplamda 9064 adet veri kümesi oluşturulmuştur. Yakın yüzey araştırması yapıldığı için dağıtık kablosuz alıcıların akım elektrotuna olan konumuna bağlı olarak görece daha derin seviyelerin ölçümleri de yapılmaktadır. Ters çözümde hedeflenen derinlikler göz önüne alınarak geometrik faktörün -10000'den daha küçük ve 10000'den daha büyük olduğu veriler 9064 adet veriden oluşan veri kümesinden çıkartılmıştır. Bu işlem sonucunda 5876 adet veri ile Bölüm 5'de yer alan ters çözüm aşamasına geçilmiştir.



5. VERİ İŞLEM

Doğru akım özdirenç verileri uygun elektrot dizilimi ile ölçüldükten sonra görünür özdirenç kesit ya da haritaları olarak sunulurlar. Ancak ham veri olarak adlandırılabilen bu içerik yer altındaki elektrik özdirenç dağılımını yansıtmaz. Dolayısı ile bu veriler sayısal yöntemler ile değerlendirilerek yer içinin özdirenç modeline dönüştürülmelidir. Bu işleme ters-çözüm adı verilmektedir. Bu çalışmada doğru akım özdirenç verilerinin değerlendirilmesi için sonlu farklar yaklaşımı ile çalışan bir modelleme ve sönümlü en küçük kareler yaklaşımı temelli bir ters-çözüm algoritması kullanılmıştır. Algoritma MATLAB dilinde daha önce (Gölebatmaz & Akca, 2021) tarafından geliştirilen kodlar düzenlenerek geliştirilmiştir. Bu kod ise Spitzer (1995) tarafından önerilen akış izlenerek yazılmıştır.

Çalışmada toplanan verilerin bir bölümü hatüstü (inline) olmakla birlikte alıcı ve verici elektrotlar birden çok profile de dağılmaktadır. Bu durum dağıtık elektrot adı ile açıklanmaktadır. Bu nedenle geliştirilen kablosuz alıcı sistemi ile toplanan verilerin tümünün iki boyutlu ters çözümü olanaklı değildir. Bu yüzden veri değerlendirme ve sonuç sunumunda iki yaklaşım kullanılmıştır. İlk olarak hat üstü veriler tekil olarak iki boyutlu ters çözüm ile değerlendirilmiştir. Ardından tüm veriler tekil bir veri dosyasında birleştirilerek üç-boyutlu ters çözüm ile değerlendirilmiştir. Her iki durum için düşey kesitler ve özdirenç derinlik haritaları üretilerek sunulmuştur.

Elektrik özdirenç verilerinin iki ve üç boyutlu ters-çözümü kötü durumlu (*ill-posed*) bir optimizasyon problemidir. Problem bir başlangıç modelinin yinelemeli olarak iyileştirilmesi ve ters-çözüm işleminin durağanlaştırılması yönelik tedbirlerin alınması ile çözülür. Optimizasyonu sağlanmaya çalışılan amaç fonksiyonu

$$\Phi(p) = \left\| \mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{p})) \right\|_2^2 + \alpha \left\| \mathbf{W}_p(\mathbf{p} - \mathbf{p}_{ref}) \right\|_2^2 \quad (5.1)$$

şeklinde verilir. Burada eşitliğin sağındaki ilk terim veri çakışmazlıkları ile ilgili amaç fonksiyonu, ikinci terim ise parametrik amaç fonksiyonu olup $\mathbf{W}_d$ veri ağırlık dizeyi, $\mathbf{d}$ ölçülen veri, $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ kuramsal veri, $\mathbf{p}$ model parametre yöneyidir. Eşitlikteki ikinci terim parametrik amaç fonksiyonu olup $\mathbf{W}_p$ parametre ağırlık dizeyi, $\mathbf{p}_{ref}$ referans model

(önceki yinelemedeki model parametreleri olarak seçilmiştir), α ise bir ölçekleme sabitidir. Burada kullanılan veri ve parametre ağırlık dizeylerinin belirlenmesi ile ilgili (Gölebatmaz & Akca, 2021)'e ve ekinde açık kaynak kodlu olarak paylaşılan ELRIS3D yazılımına bakılabilir. Verilen amaç fonksiyonunu en küçükmek için ifadenin parametrelere göre kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlenerek izleyen dizey denklemi elde edilebilir:

$$(\mathbf{J}\mathbf{W}_d^T\mathbf{W}_d\mathbf{J} + \alpha\mathbf{W}_p^T\mathbf{W}_p)\Delta\mathbf{p}_k = \mathbf{J}\mathbf{W}_d^T\mathbf{W}_d\Delta\mathbf{d} - \alpha\mathbf{W}_p^T\mathbf{W}_p(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{ref}). \quad (5.2)$$

Burada $\mathbf{J}$ kuramsal verinin parametrelere göre kısmi türevlerini içeren Jacobian dizeyini, $\Delta\mathbf{p}$ k numaralı yineleme adımında parametrelere yapılacak düzeltmeleri içeren yöney, $\Delta\mathbf{d}$ ise veri farkları yöneyidir. DAÖ verilerinin 3B ters çözümü doğrusal olmayan bir problem olduğundan çözüme bir başlangıç modelinin yinelemeli olarak iyileştirilmesi ile ulaşılır. Bu nedenle 3.2 denklemi bir veri kümesinin ters çözümü sırasında birkaç kez çözülür. Parametre düzeltme dizeyinin hesaplanmasında gerekli bilgi Jacobian dizeyinde bulunmaktadır. Bu dizeyin hesaplanması ile ilgili Spitzer (1998) tarafından benimsenen ve Smith ve Vozoff (1984) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır.

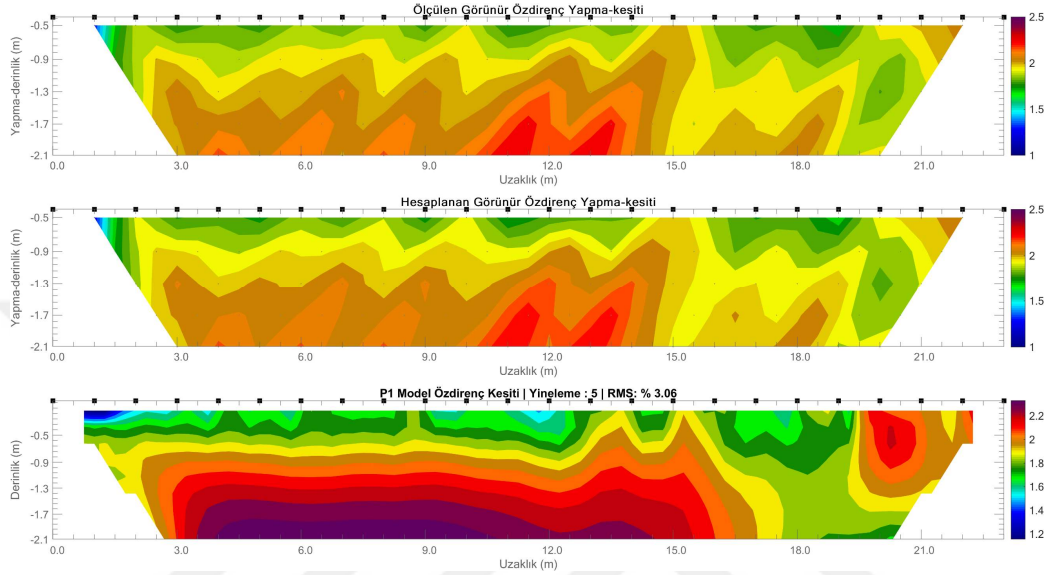
$$RMS = \sqrt{\frac{(\mathbf{W}_d\Delta\mathbf{d})^T(\mathbf{W}_d\Delta\mathbf{d})}{N}} \quad (5.3)$$

Burada N veri sayını, $\mathbf{W}_d$ parametre ağırlık dizeyi, $\mathbf{d}$ ölçülen veri, $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ kuramsal veri, $\mathbf{p}$ model parametre yöneyidir.

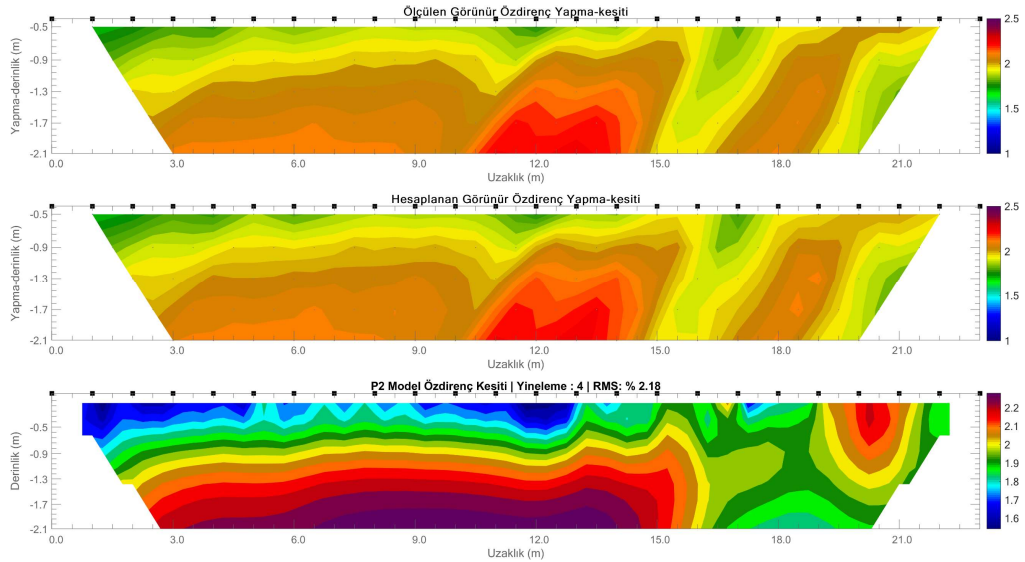
5.1 İki Boyutlu Ters Çözüm Sonuçları

İki ve üç-boyutlu ters-çözüm işlemlerinin tümünde yukarıdaki yaklaşımlar kullanılmıştır. Buna göre ilk olarak hat üstünde toplanan pol-dipol verilerinin iki boyutlu ters çözümleri yapılarak izleyen bölümde sunulmuştur. Ters çözüm işleminin başarımı ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki çakışma ile ölçülür. Bu çalışmada ortalama karesel hata (%RMS) ölçütü olarak kullanılmıştır. Toplam on profile ait verilerin hata oranları %1.86-

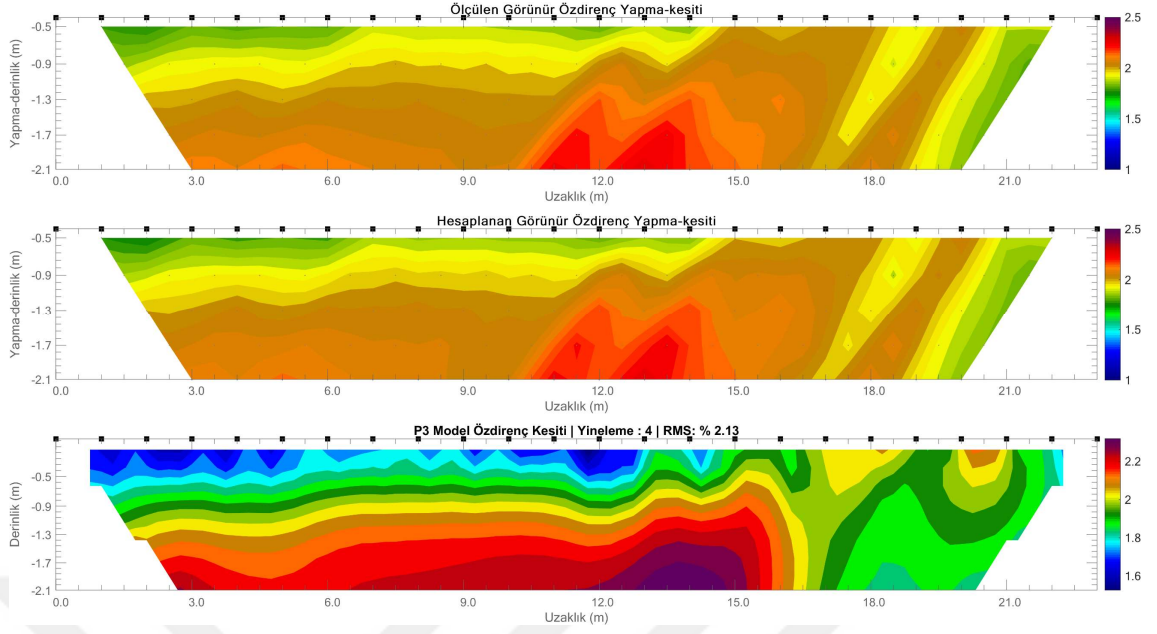
%3.4 arasında değişmekte olup veri çakışmazlıkları tatmin edici düzeylerdedir. Şekil 5.1 ile Şekil 5.10 arasında bu profillere ait ölçülen veriler, hesaplanan veriler ve iki-boyutlu özdirenc modelleri verilmiştir. Her bir modelin yanıtı ile ölçülen veriler arasındaki %RMS değerleri de modeller ile birlikte verilmiştir.



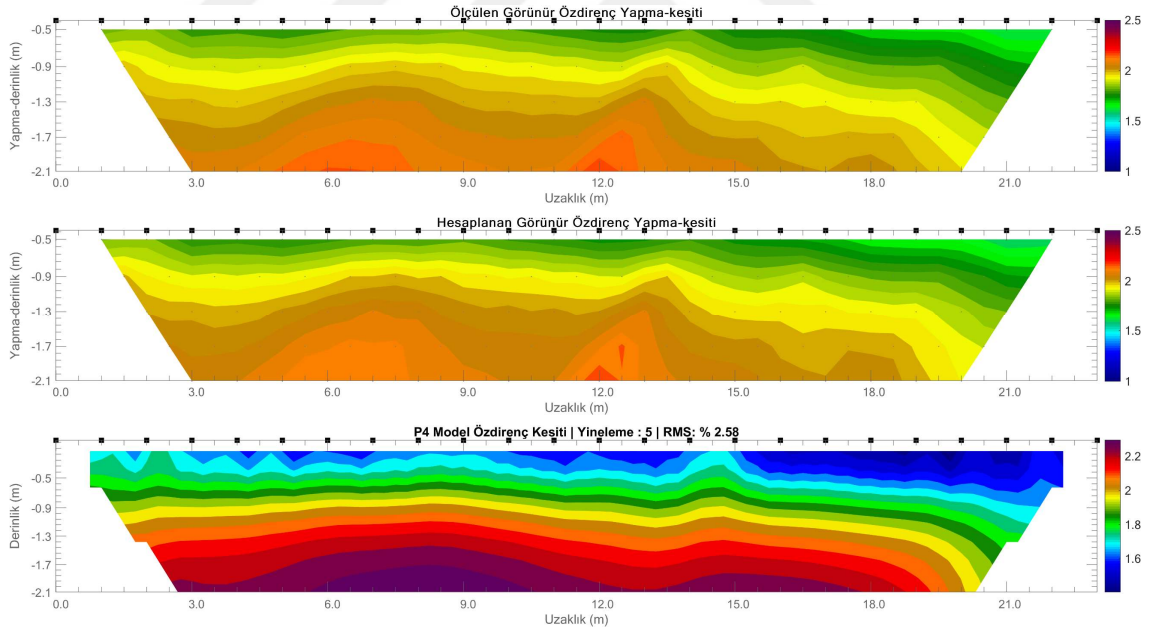
Şekil 5.1 P1 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model özdirenc kesitleri



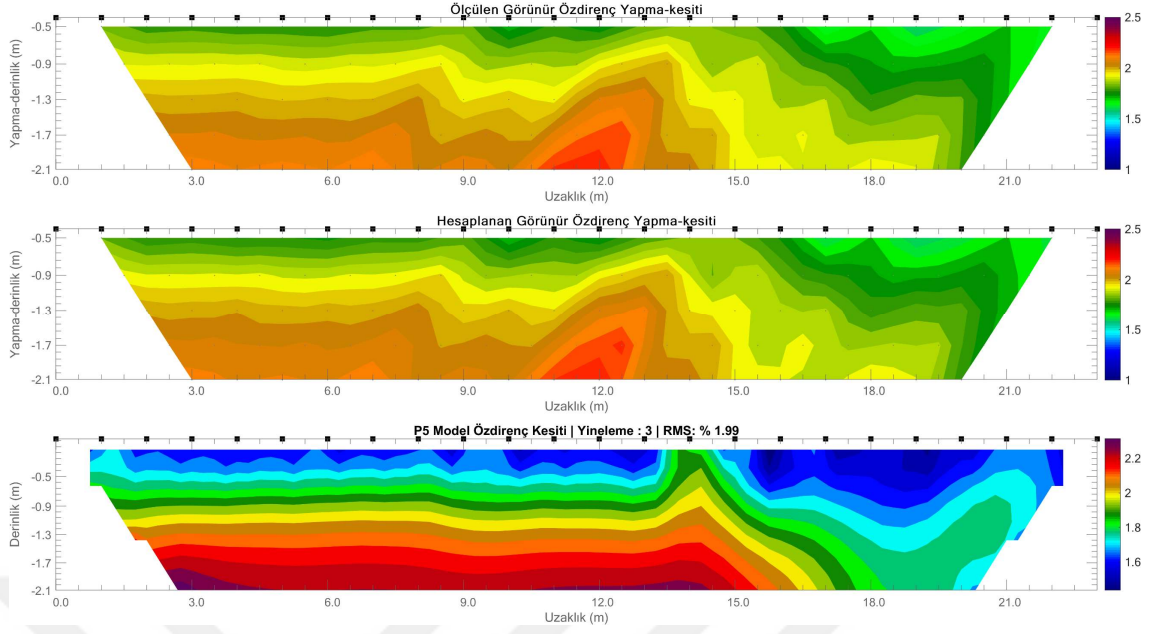
Şekil 5.2 P2 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model özdirenc kesitleri



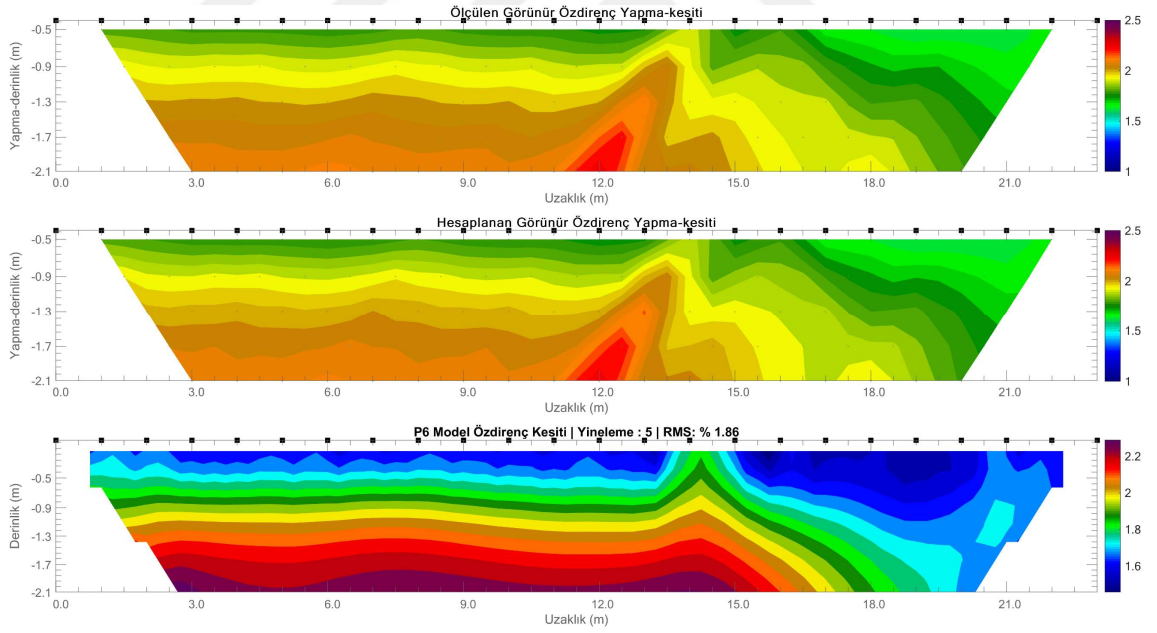
Şekil 5.3 P3 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri



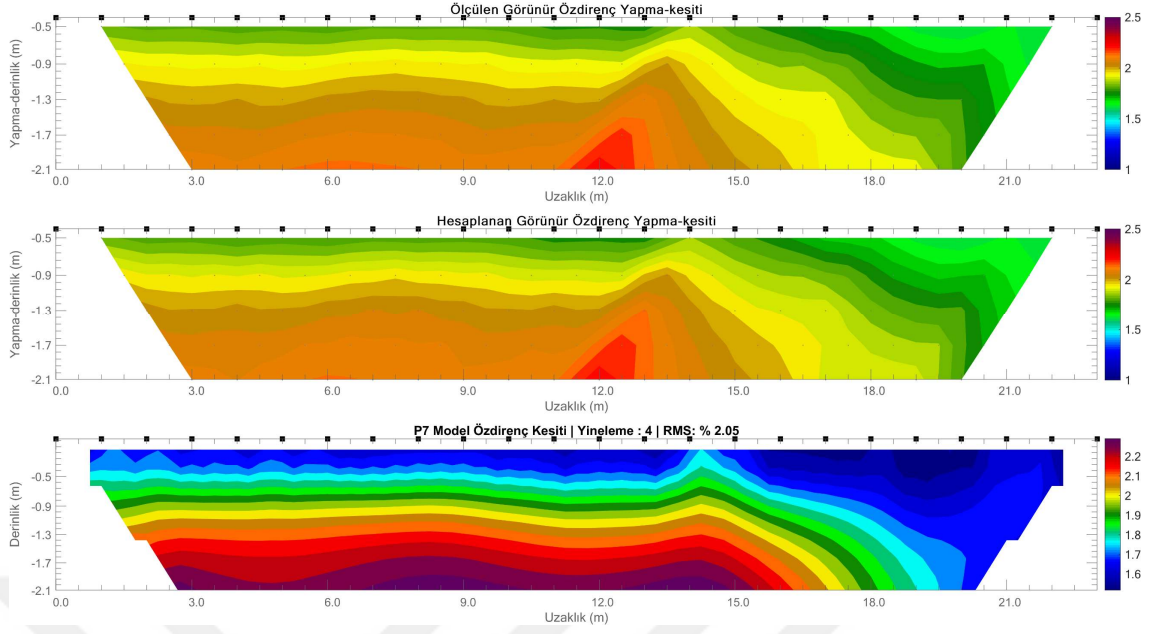
Şekil 5.4 P4 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri



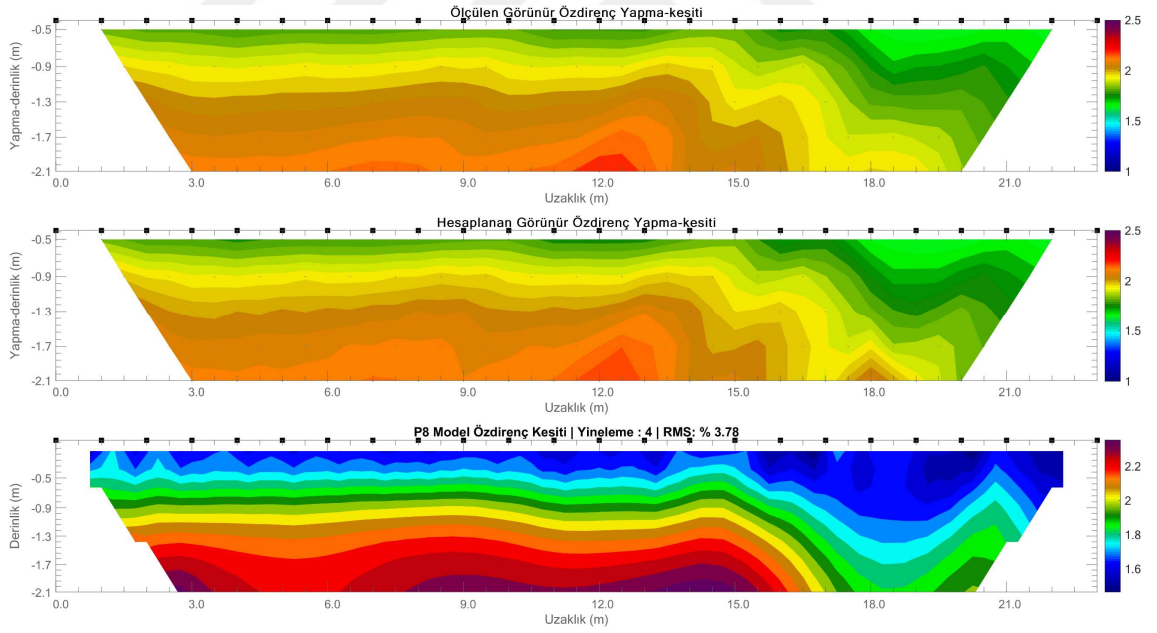
Şekil 5.5 P5 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri



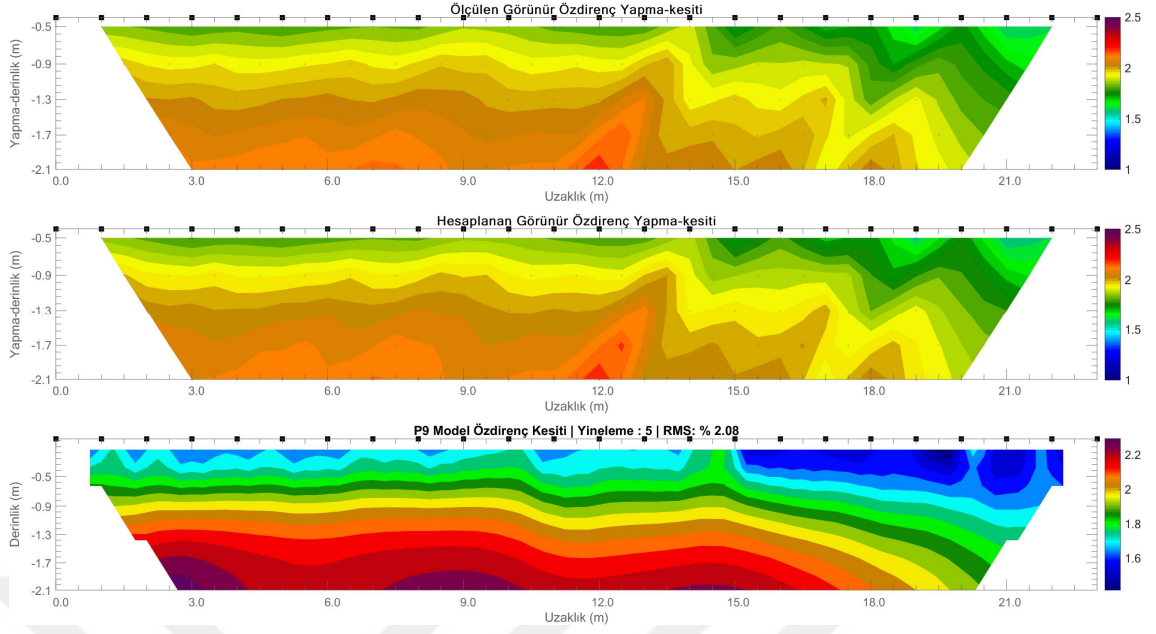
Şekil 5.6 P6 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri



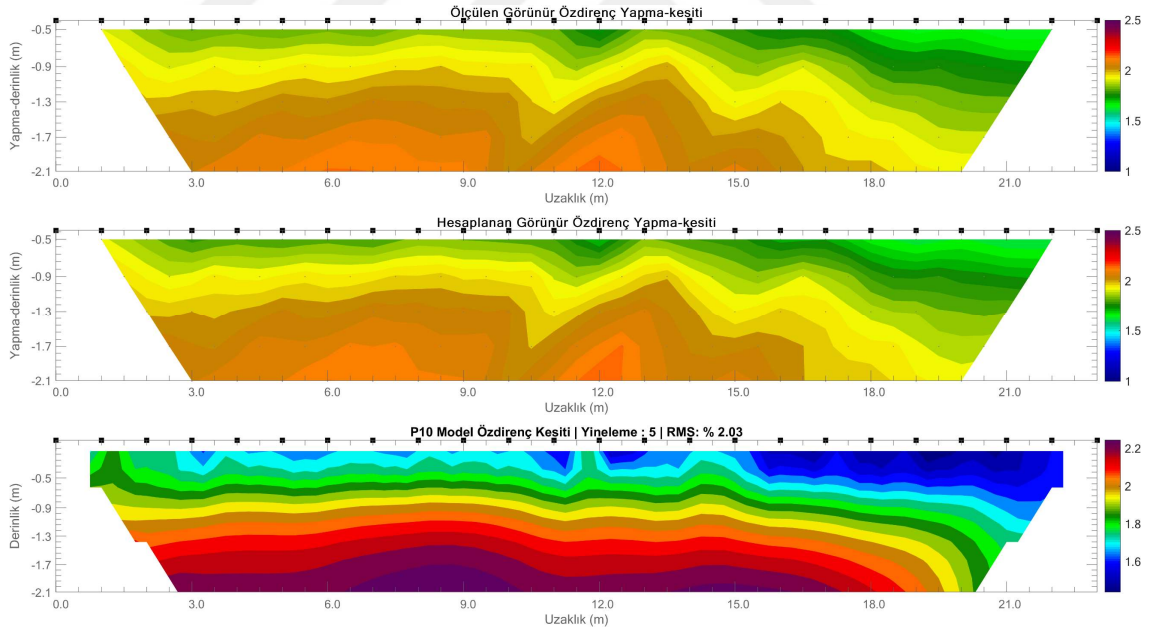
Şekil 5.7 P7 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri



Şekil 5.8 P8 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model öz direnç kesitleri



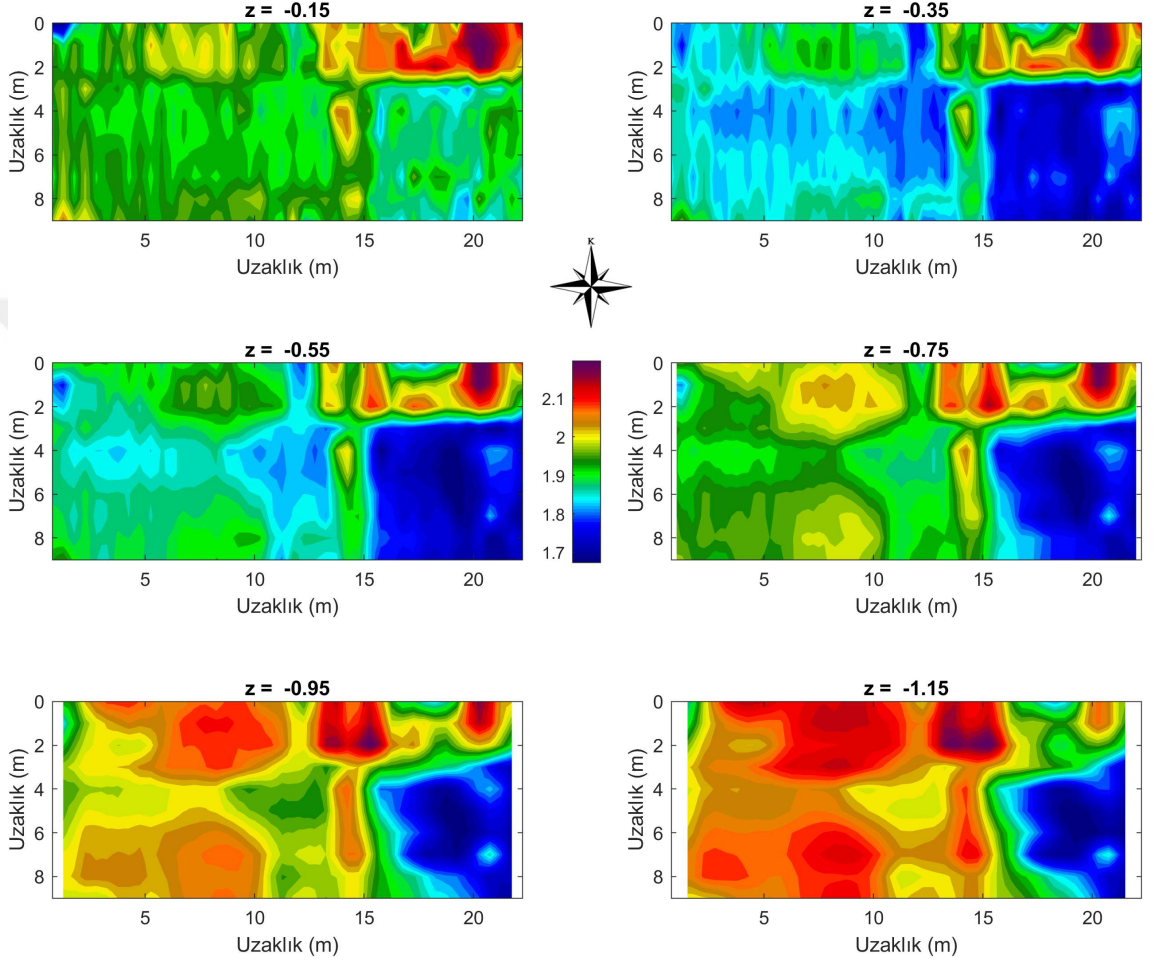
Şekil 5.9 P9 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model özdirenç kesitleri



Şekil 5.10 P10 profiline ait (üst) ölçülen veri, (orta) hesaplanan veri ve (alt) model özdirenç kesitleri

İki boyutlu veriler ile yapılan ters çözüm işlemlerinde veri çakışmazlıklarının oldukça düşük olması ölçüm sisteminin gayet iyi çalıştığını göstermektedir. Öte yandan model kesitlerinde oldukça sığ derinliklerde özdirenç belirtileri gözlenmektedir. 1-1.5m

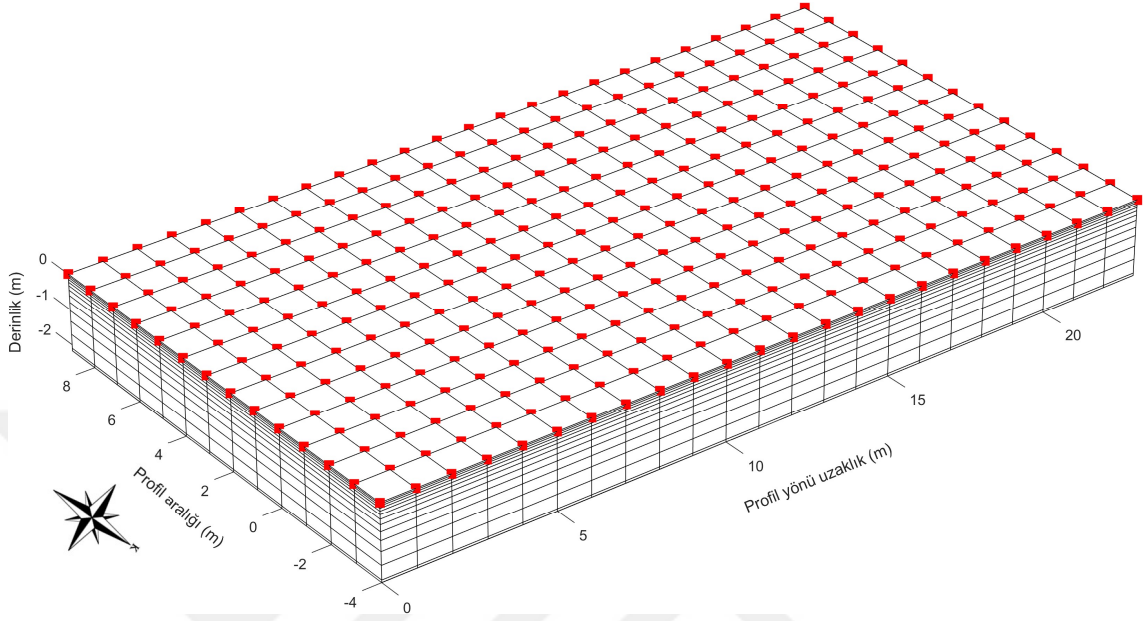
derinlikten itibaren ise bir görece yüksek öz dirençli (>300 ohm.m) bir temele rastlanmaktadır. Arkeolojik bir alan incelemesinde gömülü yapıların uzanımlarını inceleyebilmek önemlidir. Bu nedenle yukarıda sunulan iki-boyutlu kesitlerden öz direnç derinlik haritaları oluşturulmuş ve Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11 Çalışma alanı verilerinin iki-boyutlu ters çözümünden elde edilen öz direnç derinlik haritaları

Öz direnç derinlik haritaları incelendiğinde kuzey güney yönlü süreklilik gösteren yapıların yüksek öz dirençli belirtileri gözlenmektedir. Belirtiler oldukça sıkça yer almaktadır. Bu çalışmada denenen kablosuz alıcılar ile dağıtık olarak yerleştirilen ölçüm düzeni ile toplanan veriler iki boyutlu değerlendirmeye uygun değildir. Dolayısı ile tüm veriler tek bir veri dosyasında birleştirilerek üç boyutlu olarak ayrıklaştırılan bir yer modeli için değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde kullanılan ayrık yer modelinin bir görünümü Şekil 5.12’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm elektrotları kapsayan

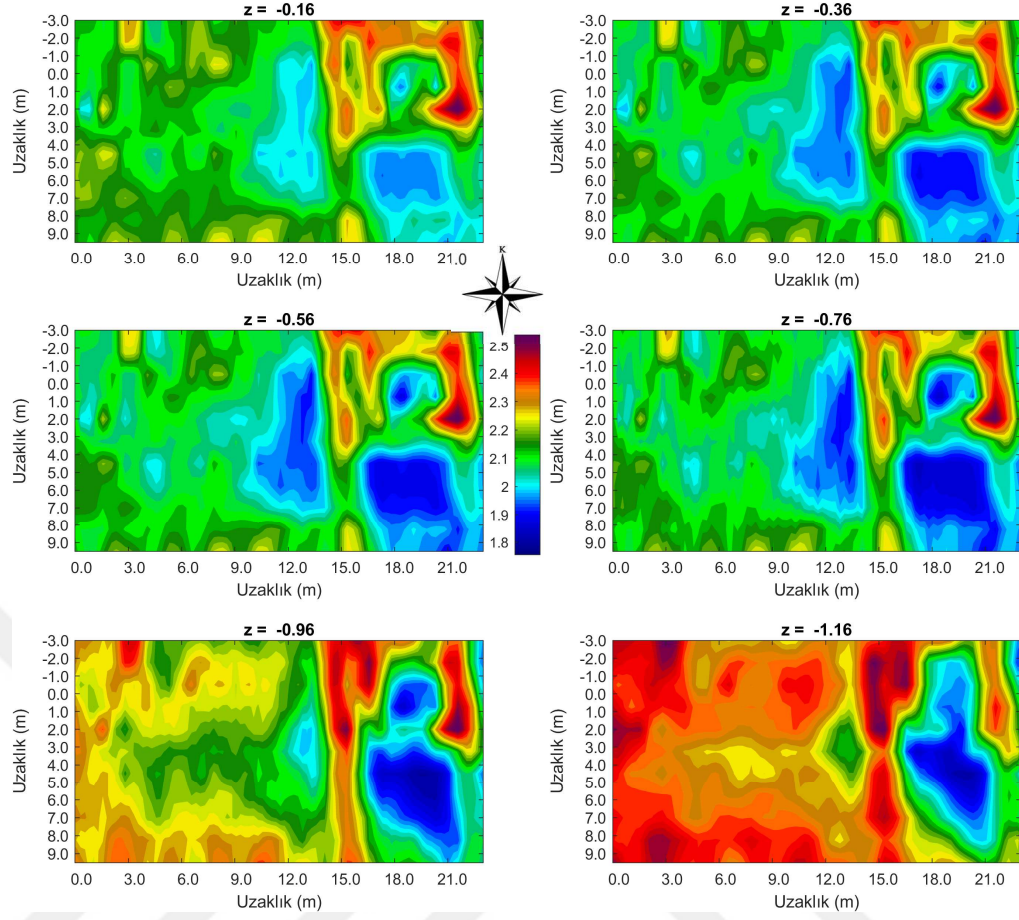
modelin yalnızca parametreleştirilen bölümü görüntülenmiştir. Model 23x13x8 boyutlarında olup toplam 2392 model parametresinden oluşmaktadır.



Şekil 5.12 Dağıtık dizilim ile toplanan verilerin değerlendirilmesinde kullanılan

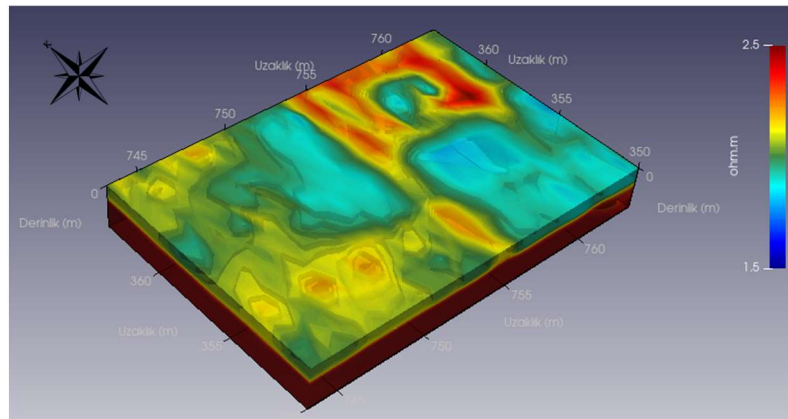
Yukarıda verilen ayırık model kullanılarak yapılan ters-çözüm sonucunda alandaki üç-boyutlu öz direnç dağılımı elde edilmiştir. Ölçülen veriler ve model yanıtı arasındaki hata %3.72 olarak hesaplanmıştır. Son iki yinleme arasındaki bağıl değişim %1'in altında olması koşulu ile işlem 5. yinlemede durdurulmuştur. İşlem 2.4GHz hızında işlemci ve 16 GB bellek ile donatılmış bilgisayarda 6 dk içinde tamamlanmıştır.

Dağıtık dizilimdeki veriler yerleşim nedeni ile önceki bölümde sunulan sonuçlardan biraz daha geniş bir alanı kapsamaktadır. Ters çözümünden elde edilen öz direnç dağılımı yüzeyden ilk 1m derinliğe kadar dilimler halinde Şekil 5.13'de verilmiştir. Derinlik haritaları incelendiğinde önceki sonuçlardan daha ayrıntılı bir görüntü elde edilebildiği söylenebilir. Burada görülen yapılar mimari kalıntılar ile açıklanabilir. Öte yandan Akca vd. (2019) tarafından sunulan ve daha geniş bir alandaki ayrıntılı sonuçlar ile de uyumludur. Veri kalitesi ve üretilen yer altı modelinin sunduğu bilgiler açısından kablosuz alıcılar ile bütünleşmiş çalışan ölçüm sisteminin doğrulandığı, beklenen ölçüm kalitesine ulaştığı değerlendirilmektedir.



Şekil 5.13 Dağıtık dizilimle toplanan verilerin üç boyutlu ters çözüm sonuçlarından elde edilen öz direnç derinlik haritaları

Sunulan derinlik haritalarının alındığı üç boyutlu öz direnç modeli Şekil 5.14’de verilmiştir. Modelin çiziminde Paraview programı kullanılmıştır.



Şekil 5.14 Dağıtık dizilim ile toplanan verilerin ters çözümünden elde edilen 3B öz direnç modeli

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yaygın şekilde kullanılan doğru akım öz direnç yönteminde kullanılmak üzere, çok sayıda uygulama alanına sahip özgün bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Sistemin özgünlüğü geleneksel olarak bütünleşik bir cihaz içerisinde yer alan alıcı-verici birimlerin bağımsız hale getirilmesindedir. Böylece gerilim ölçümü yapılacak elektrot çiftlerinin çok sayıda ayrı kablo ya da tekil bir akıllı kablo ölçüm cihazına bağlanma zorunluluğu ortadan kalmaktadır. Böylece iki alanda önemli kazanım elde edilmektedir. İlk olarak sistemin eş zamanlı ölçüm yapabileceği kanal sayısı istenildiği kadar artırılabilir (örneğin 128). Bu durumda bir akım noktası için onlarca hatta yüzlerce gerilim okuması eş zamanlı yapılabilir. İkinci olarak ise merkezi ölçüm cihazına kablo bağı gerektirmediğinden ölçüm elektrotlarının konumlandırılması son derece esnek hale gelmektedir. Geleneksel dizilimler ve yerleşimlerin dışına çıkılabilmesine olanak sağlayan bu durum dağıtık dizilim olarak da adlandırılan ölçme yerleşimlerine izin vermektedir. Buna göre kullanıcı özel olarak tasarlayacağı bir ölçüm geometrisi için alıcıları yerleştirerek duruma özgü ölçümler gerçekleştirebilir.

Çizelge 6.1 DAÖ Ölçüm cihazları karşılaştırma çizelgesi

Özellik / Ürün	GF Instruments ARES 2 10 CH ÇEKYA	AGI SuperSting R8 ABD	ABEM Terrameter LS 2 8 CH İSVEÇ	LARES MPPT CERES800 WIG TÜRKİYE
Giriş Empedansı	20 M.ohm	>150 M.ohm	200-20 M.ohm	> 1 G.ohm
Ölçüm Aralığı	±20V	±5V	±2.5V, ±15V	± 20V
Hassasiyet	2.38uV	30nV	3nV	2.38nV
Çözünürlük	24 Bit	24 Bit	24 Bit	24 Bit
Çıkış Gücü	850W	200W	250W	800 W
Çıkış Gerilimi	± 1000 V	± 800 V	± 600 V	± 800 V
Çıkış Akımı	5A	2A	2.5A	2A
Kanal Sayısı	10	8	12	Sınırsız
IP Ölçüm	Var	Var	Var	Var
Veri Aktarımı	Kablolu	Kablolu	Kablolu	Kablosuz

Alıcıların sistemden bağımsız hale getirilmesi ve sisteme çok sayıda alıcının eş zamanlı bağlanması bütünleşik çalışma ve birimler arası kablosuz haberleşmeyi zorunlu kılar. Bu

nedenle geliştirilip üretilen sisteme dahil tüm alıcılar ve merkezi birim kablosuz haberleşme altyapısı ile donatılmıştır. Açık alanda 3 km, ortalama 1 km menzile mesafesinde kesintisiz iletişim sağlanabilmektedir. Kablosuz haberleşme için tanımlanan protokolle tüm alıcı ve vericilerin ölçüm için kurulum parametreleri (örnekleme sıklığı, ölçüm periyodu, ölçüm türü (SP, IP, R), tekrar sayısı vb.), ölçümün başlatılma emri, ölçüm tamamlandıktan sonra elde edilen verilerin iletimi sağlanabilmektedir. Bunun dışında alıcıların yönetimi için gerekli pil durumu, işlemci sıcaklığı bilgileri, kimlik bilgileri gibi sorgular da yapılabilmektedir. Alıcıların bağımsız ve kablosuz olması ölçümlerin yapılacağı en az bir çift elektrotla bağlı olması gerekliliğini ortadan kaldırmaz. Dolayısıyla kablosuz ibaresi merkezi bir cihaz ile herhangi bir kablo bağının olmadığı anlamındadır. Öte yandan aynı alıcıya “+” şeklinde yerleştirilmiş 5 elektrot bağlanabilmektedir. Bu sayede yön bağımlı ölçümler de gerçekleştirilebilmektedir. Bir röle kontrol sistemi ile hangi elektrotların ölçümde kullanılacağı yine kablosuz olarak gönderilecek bir komut ile uzaktan denetlenebilmektedir. Akım uygulanacak elektrotların verici ile kablo bağı olmak zorundadır. Ölçümlerde çok sayıda noktadan akım verme gerekliliği nedeni ile kablosuz alıcılar ile kullanım için iki yol izlenebilir. İlk olarak bir alana yayılan alıcıların aralarındaki ya da dışındaki konumlarda dipol ya da pol elektrotların elle (manuel) gezdirilmesi düşünülebilir. Kimi durumlar için uygulanabilir olan bu yöntem yerine çok elektrotlu bir akıllı kablo belirli bir geometride örneğin bir hat üstüne ya da “S” şeklinde konumlandırılarak akım verilebilir. Bu çalışmada ikinci yöntem uygulanmıştır.

Önerilen ölçme sisteminin saha uygulamasındaki asıl kazanımının akım ve gerilim elektrotları arasındaki uzaklığın yüzlerce metreye ulaştığı araştırmalarda ortaya çıkacağı açıktır. Örneğin madencilik ile ilgili jeofizik aramalarda kimi durumlarda profil uzunluğu birkaç kilometreye ulaşmaktadır. Bu uygulamada çok kanallı ölçüm yapılabilmesi için her alıcı elektrottan (gerilim elektrotu) merkezi cihaza bir kablo taşınması gerekmektedir. Ancak kablosuz alıcılar bu zorunluluğu ortadan kaldırarak örneğin aralarında 50m olan bir çift elektrotla bağlantı sağlamak yeterli olacaktır. Bu önemli bir kazanım ve uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Ancak sistemin böyle bir çalışmadan önce elektronik olarak istenilen şekilde çalıştığının doğrulanması için bahsedilen çalışmalar ile karşılaştırıldığında oldukça küçük ölçekli başka bir alanda denenmesi yoluna gidilmiştir.

Arkeolojik alanların jeofizik yöntemlerle araştırılması yaygın bir uygulamadır. Elektrik yöntemler bu alanda gömülü yapılar ile örtü tabakasını ayırmak konusunda başarılı sonuçlar vermektedir. Bu çerçevede kapsamlı bir jeofizik araştırma yürütülen bir alan ölçme sisteminin denenmesi amacıyla seçilmiştir. Seçilen alan Manavgat ilçesi yakınlarında yer alan Side Antik Kentidir. Görece küçük 12x23m genişliğinde bir alanda gerçekleştirilen çalışmalarda önceki sonuçlar ile uyumlu çıktılar elde edilmiştir. Veri kalitesi ve model yanıtları oldukça yeterli görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında ölçme sisteminin başarı çalıştığı sonucuna ulaşılmıştır.



KAYNAKLAR

- Akca, İ., & vd. (2019). Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side. *Journal of Applied Geophysics*, 22-30. doi:https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.02.006
- Akca, v. (2019). Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey). s. 22-30. doi:https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.02.006
- Alam MJB, A. A. (2024). Application of Electrical Resistivity Tomography in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Aspect. *Geotechnics*, 4(2):399-414. doi:10.3390/geotechnics4020022
- Becker, H., Campana, S., Himmler, T., & Nicolisi, I. (2009). Seeing the Unseen. *Geophysics and Landscape Archaeology*.
- Binley, A., & Slater, L. (2020). *Resistivity and Induced Polarization Theory and Applications to the Near-Surface Earth*. New Jersey: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108685955
- Bosch, C. (1957). *Pamphylia tarihine dair tetkikler. Studien zur Geschichte Pamphylens*. Türk Tarih Kurumu Basımevi, 1957.
- Eva Rolia, D. S. (2018). Application of geoelectric method for groundwater exploration from surface (A literature study). *AIP Conf Proc*, 1977 (1). doi:10.1063/1.5042874
- Gabarrón M, M.-P. P.-S.-M. (2020). Electrical Resistivity Tomography as a Support Tool for Physicochemical Properties Assessment of Near-Surface Waste Materials in a Mining Tailing Pond (El Gorguel, SE Spain). *Minerals*, 10(6):559. doi:10.3390/min10060559
- Gölbatmaz, Ş., & Akca, İ. (2022). Görüntü İşleme Yöntemlerinin Jeofizik Haritalara Uygulanması: Arkeoloji Jeofiziği Alanından Örnekler. *Yerbilimleri*, 43 2 160–181.
- Gölbatmaz, Ş., & Akca, İ. (2021). Jeofizik model ve haritaların görüntü işleme yöntemleri ile iyileştirilmesi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.

- Hasan, M. S. (2019). Investigation of fractured rock aquifer in South China using electrical resistivity tomography and self-potential methods. *J. Mt. Sci*, 850–869. doi:<https://doi.org/10.1007/s11629-018-5207-8>
- IRIS Instruments. (2023). V-FullWaver: <https://www.iris-instruments.com/v-fullwaver.html> adresinden alındı
- Koc , G., & Yegin, K. (2013). Hardware Design of Seismic Sensors in Wireless Sensor Network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. doi:10.1155/2013/640692
- Liu, L., Grombacher, D., Auken, E., & Larsen, J. (2019). Apsu: A wireless multichannel receiver system for surface nuclear magnetic resonance groundwater investigations. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 8. 1-11. doi:10.5194/gi-8-1-2019
- Mansel, A. (1963). *Die Ruinen von Side, Berlin*. Berlin.
- Mansel, A. (1978). *Side: 1947-1966 yılları kazıları ve araştırmalarının sonuçları*. Türk Tarih Kurumu Basımevi.
- Martinho, E. (2023). Electrical Resistivity and Induced Polarization Methods for Environmental Investigations: an Overview. *Water Air Soil Pollut*, 234,215. doi:10.1007/s11270-023-06214-x
- Martorana, R., Capizzi, P., & Pirrera, C. (2023). Unconventional Arrays for 3D Electrical Resistivity and Induced Polarization Tomography to Detect Leachate Concentration in a Waste Landfill. *Applied Sciences*, 13(12):7203. doi:10.3390/app13127203
- Nollé, J. (1993). *Side im Altertum I. Bonn: Inschriften Griechischer Städte aus Kleinasien 43*.
- Nollé, J. (2001). *Side im Altertum II . Bonn: Inschriften Griechischer Städte aus Kleinasien 44*.
- Oppermann, F., & Günther, T. (2018). A remote-control datalogger for large-scale resistivity surveys and robust. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 7(1), 55-66. doi:10.5194/gi-7-55-2018
- Papadopoulos, N., Tsourlos, P., Tsokas, G. N., & Sarris, A. (2006). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection*, 13 (3): 163-181.

- Schmidt A, D. M. (2020). Dreaming of Perfect Data: Characterizing Noise in Archaeo-Geophysical Measurements. *Geosciences*, 10(10):82. doi:10.3390/geosciences10100382
- Smith , N., & Vozoff, K. (1984). Two-Dimensional DC Resistivity Inversion for Dipole-Dipole Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(1), 21-28. doi:10.1109/TGRS.1984.350575
- Spitzer, K. (1995). 3-D finite-difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. *Geophysical Journal International*. doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb06897.x
- Spitzer, K. (1998). The three-dimensional DC sensitivity for surface and subsurface sources. *Geophysical Journal International*, 134. 736-746. doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00592.x.
- Szalai S. vd. (2015, Şubat). Increasing the effectiveness of electrical resistivity tomography using γ 11n configurations. *Geophysical Prospecting*, 63(2), s. 508 - 524. doi:10.1111/1365-2478.12215