

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ ile YAPI JEOFİZİĞİ
ARAŞTIRMALARI: TAŞIYICI YAPI ELEMANLARININ 3B
GÖRÜNTÜLENMESİ

Cansu ARICAN

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2023

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ ile YAPI JEOFİZİĞİ ARAŞTIRMALARI: TAŞIYICI YAPI ELEMANLARININ 3B GÖRÜNTÜLENMESİ

Cansu ARICAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Doğru Akım Özdirenc (DAÖ) yönteminde kullanılan çok elektrotlu ve çok kanallı özdirenc ölçüm sistemleri, yöntemin yapılar üzerinde de uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Küçük ölçekli DAÖ çalışmaları genel olarak laboratuvar ortamında yapılan araştırmalarda tercih edilmekle birlikte bina, köprü vb. betonarme mühendislik yapılarının taşıyıcı sistem elemanlarının incelenmesinde de kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, betonarme yapıların araştırılmasında kullanmak için, yeni bir veri toplama düzeneği geliştirilmiştir. Ayrıca bu veri toplama düzeneği ile ölçü süresi ve yapay veri çalışmalarından elde edilen ters çözüm sonuçları dikkate alınarak en uygun elektrot dizilimleri belirlenmiştir. İlk olarak, çok elektrotlu ölçü sistemi ile betonarme yapılar üzerinde veri toplamaya uygun veri düzeneğinin belirlenmesi için üç boyutlu modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modelleme çalışmalarından elde edilen verilerin üç boyutlu ters çözümü yapılarak, bir kolon yapı üzerinde tek yüzeyde, karşılıklı yüzeylerde ve komşu yüzeylerde elektrotların konumlanması durumunda elde edilen özdirenc tepkileri, farklı elektrot dizilimleri için incelenmiştir. Bu çalışmalarda, beton yapısının demir donatı, çatlak ve nemli bir bölge içermesi durumunda üç boyutlu özdirenc modellerinin gösterdiği değişim incelenmiş ve pratik ölçü almaya uygun düzenek seçimi yapılmıştır. Üç boyutlu modelleme ve ters çözüm çalışmalarının ardından geliştirilen yeni ölçü düzeneği ile kolon yapısı üzerinde DAÖ ölçüsü alınmıştır. Yapay verilerden elde edilen sonuçlar, DAÖ yönteminin yapı taşıyıcı elemanları üzerinde uygulanması ile elemanın beton örtü kalınlığının, eleman içerisindeki donatı dağılımının ve olası kırık/çatlak/nemlilik durumlarının belirlenmesinin mümkün olduğunu göstermiştir.

Şubat 2023, 77 sayfa

Anahtar Kelimeler: Doğru Akım Özdirenc, küçük-ölçekli uygulama, yapı jeofiziği, 3B ters çözüm

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

CONSTRUCTION GEOPHYSICS INVESTIGATION WITH DIRECT CURRENT RESISTIVITY METHOD: THREE DIMENSIONAL VISUALIZATION OF SUPPORT STRUCTURE ELEMENT

Cansu ARICAN

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

Supervisor: Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

The multi-electrode and multi-channel resistivity measurement systems used in the Direct Current Resistivity (DCR) method allow the method to be applied on structures as well. Although small-scale DCR studies are generally preferred in laboratory research, they are also used in the examination of structural system elements of reinforced concrete engineering structures such as buildings, bridges, etc. In this thesis, a new data collection mechanism which is suitable for investigation of the reinforced concrete structure were developed for the DCR method. In addition, using this data collection mechanism, the most suitable electrode array set was determined by taking into account the measurement time and the inversion results of synthetic data. Firstly, three-dimensional modeling studies were carried out to determine the data set suitable for data collection on reinforced concrete structures with the multi-electrode measurement system. By performing the three-dimensional inversion of the data obtained from the modeling studies, the forward responses obtained when the electrodes are positioned on a single surface, opposite surfaces and adjacent surfaces on a columnar structure were examined for different electrode arrays. In these studies, the change in the three-dimensional resistivity models in case the concrete structure contains iron reinforcement, cracks and a moist region was examined and the suitable mechanism for taking practical measurements was developed. After three-dimensional modeling and inversion studies, the DCR measurement was taken on the column structure with the developed measurement mechanism and suitable electrode arrays. The results obtained from synthetic data showed that it is possible to determine the concrete cover thickness of the element, the distribution of reinforcement within the element and possible fracture/crack/humidity conditions by applying the DCR method on the structural load-bearing elements.

February 2023, 77 pages

Key Words: Direct Current Resistivity, small-scale application, Construction Geophysics, 3D inversion

TEŞEKKÜR

Öncelikle, bu tez konusunu bana öneren, tez süreci boyunca sadece bilimsel değil her türlü zorlukta desteğini esirgemeyen, fikir ve katkılarıyla beni yönlendiren, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca deneyim ve bilgi birikimi ile bana ve çalışmama katkıda bulunan Dr. Öğr. Üyesi N. Yıldırım GÜNDOĞDU'ya (Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü) ve yardımları için Dr. Öğr. Üyesi İsmail DEMİRCİ'ye (Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü) teşekkür ederim.

Tezim için gereken inşaat mühendisliği bilgilerine katkılarından dolayı Yüksek Mühendis Alkut AYTUN'a ve tez kapsamında kullanmış olduğum R3t algoritması ile ilgili yardımları için Andrew BINLEY'e (Lancaster Üniversitesi) teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte her zaman yanımda, bana destek olan arkadaşlarım Mojtaba NAJAFİKHATOUNABAD ve Demet ÖVER'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi tez çalışmam süresince de bana koşulsuz sevgi, ilgi ve destek gösteren annem Ilgın G. ARICAN, babam Zafer S. ARICAN, abim Mertcan ARICAN, Pelin ARICAN ve varlığı benim için manevi destek olan F. Sütlaç'a teşekkür ederim.

Bu tez, 121Y281 no'lu Hasarsız Jeofizik Test Yöntemleri ile Yapı Durum İncelemeleri ve Deprem Sonrası Hasar Tespiti başlıklı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında geliştirilmiştir. Destekleri için TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Cansu Arıcan
Ankara, Şubat 2023

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ (DAÖ) YÖNTEMİ	4
2.1 Küçük Ölçekli DAÖ Çalışmalarında Kullanılan Elektrot Dizilimleri	7
2.2 Küçük Ölçekli DAÖ Çalışmalarında Kullanılan Veri Toplama Yöntemleri	9
3. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE ÜÇ BOYUTLU MODELLEME VE TERS ÇÖZÜM	12
3.1 3B Modelleme	12
3.2 3B Ters Çözüm	15
3.3 3B Modelleme ve Ters Çözüm Algoritması	18
3.4 Model Ayırıklaştırması	19
4. YAPI JEOFİZİĞİ ARAŞTIRMALARI İÇİN DAÖ YAPAY VERİ UYGULAMALARI	23
4.1 Tek Düzey Kolon Modeli	24
4.2 Basit Kolon Modeli	26
4.3 Karmaşık Modeli	29
5. YAPI ÜZERİNDE ÇOK ELEKTROTLU SİSTEM İLE VERİ TOPLAMA	51
5.1 Yapı Elemanı Üzerinde Ölçü Alımı için Geliştirilen Ölçü Düzenegi	51
5.2 Verilerin Toplanması ve Ters Çözüm	56
6. SONUÇLAR	62
KAYNAKLAR	65
EKLER	71
EK 1 Tetgen Algoritması ile Basit Kolon Modeli Tasarımı	72
EK 2 “protocol.dat” Dosyasının Hazırlanması İçin Kullanılan MATLAB Kodu	73
EK 3 Pol-Tripol Dizilimi İçin Örnek “protocol.dat” Dosyası	76
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

J	Akım Yoğunluğu
ρ	Özdirenç
Ωm	Ohm.m
E	Elektrik Alan
φ	Gerilim
I	Akım
A	Akımın Geçtiği Alan
$\Delta\varphi$	Gerilim Farkı
K	Geometrik Faktör
ρ_a	Görünür Özdirenç
σ	İletkenlik
J_s	Kaynak Civarındaki Akım Yoğunluğudur
$\rho(\tau)$	Yarıçap-Kenar oranı
R	Yarıçap
θ_{min}	En Küçük Yüz Açısı

Kısaltmalar

Doğru Akım Özdirenç (DAÖ)

Üç Boyutlu (3B)

İki Boyutlu (2B)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 AB akım ve MN gerilim elektrotları ile oluşturulan arazi ölçü sistemi ve akım-gerilim çizgilerinin yer içindeki yayılımı (Candansayar (2007), ilk kaynak Van Nostrand ve Cook 1966).....	5
Şekil 2.2 Geleneksel elektrot dizilimleri ($n=1,2,3,\dots$) (Candansayar, 2007).....	8
Şekil 2.3 Kare (Four-probe) elektrot diziliminin şematik ve cihaz ile gösterimi (Lataste vd. 2003).....	8
Şekil 2.4 (a) Tıbbi görüntüleme için yapılan bir DAÖ çalışmasında kullanılan elektrot diziliminin şematik gösterimi (Fan vd. 2016) (b) Tıbbi görüntüleme amaçlı yapılan bir çalışmada kullanılan elektrot diziliminin insan vücudu üzerindeki gösterimi (Brown 2001)	10
Şekil 2.5 Küçük Ölçekli DAÖ çalışmaları için geliştirilmiş çok elektrotlu ölçü düzeneği (Du Plooy vd 2013)	10
Şekil 2.6 (a) Test hücresi ve elektrotlar (b) Ölçüm prensibi -AB akım ve MN gerilim elektrotları- (Clement vd. 2011)	11
Şekil 3.1 (a) 1B (b) 2B (c) 3B iletkenlik modelleri (Candansayar 1997)	13
Şekil 3.2 a) 3B Yapısal ağ tasarımı b) 3B Yapısal olmayan ağ (Bieder ve Errante 2017'den değiştirilerek alınmıştır)	15
Şekil 3.3 Farklı dört yüzlü eleman şekilleri (Si, 2020)	20
Şekil 3.4 Dört yüzlülerin yarıçap-kenar oranı (R/L). Şerit şekilliler haricinde, kötü şekillendirilmiş dört yüzlülerin çoğu büyük bir yarıçap-kenar oranına sahip olacaktır (c) (Si, 2020).....	21
Şekil 3.5 a) 3B PLC'nin şematik gösterimi. Pembe renk ile taralı alan, dış bükey olmayan, içinde köşe noktaları (siyah), delik (kırmızı çizgiler ile çerçeveli alan) ve serbest halde bölüngeler (lacivert çizgiler) barındıran bir yüzeyi göstermektedir. Mavi ile taralı alan ise, iki alt bölgeyi (sub-domain) ayıran bir iç yüzeyi göstermektedir. b) Koşul (1) ve (2)'yi sağlamayan durumlara örnek şematik gösterimler (Si 2020).....	22
Şekil 4.1 (a) Aynı yüzeyde, (b) Karşılıklı yüzeylerde (Ön-Arka), (c) Komşu yüzeylerde (Sol-Ön).....	25
Şekil 4.2 Tek düze kolon modeli için farklı elektrot dağılımları ile elde edilen düz çözüm sonuçları	25
Şekil 4.3 Oluşturulan basit kolon modelinin TetGen (Si 2020) ile şematik gösterimi (Kırmızı noktalar elektrotları temsil etmektedir).....	27
Şekil 4.4 Basit kolon modeli için düz çözüm sonucu elde edilen her profile ait direnç kesitleri	28
Şekil 4.5 (a) Basit kolon modelinin (b) 3B öz direnç modelinin $z=1.8$ cm için xy kesiti	28
Şekil 4.6 (a) Basit kolon modelinin (b) 3B öz direnç modelinin $z=3$ cm için xy kesiti...	29

Şekil 4.7 Betonarme yapı taşıyıcı elemanlarının şematik gösterimi (Namita, 2022 https://civildigital.com/major-parts-reinforced-concrete-buildings-framed-structures/)	30
Şekil 4.8 Beton içerisine yerleştirilen donatıların şematik gösterimi (Topçu, 2022).....	30
Şekil 4.9 (a) Etriye ve boyuna donatıların, kolon modeli içerisindeki dağılımının şematik gösterimi (b) Elektrotların tek yüzeydeki dağılımın kolon modeli üzerinde (1,2,3,4: Profil numaraları) (c) model içerisindeki yapılar üzerinde gösterimi (elektrot aralığı 2.5 cm, profil aralığı 5 cm)	32
Şekil 4.10 Kolon modelinin $y=9.5$ cm derinlik için xz kesiti (Mavi bölge: beton (100 ohm.m) Kırmızı bölge: Boyuna donatılar ve etriye (1 ohm.m))	33
Şekil 4.11 DD ($n=1,2,...,8$) elektrot dizilimi için üretilen verilerin, her profile ait direnç kesitleri	34
Şekil 4.12 Kullanılan elektrot dizilimleri için her ters çözüm yineleme adımına ait RMS değerlerinin grafik üzerinde gösterimi	34
Şekil 4.13 $z=1$ cm derinlik için xy-özdirenç kesitleri: (a) gerçek model (b) DD dizilimi 3B ters çözüm sonucu (c) W ($n=1$ seviye) dizilimi 3B ters çözüm sonucu, (d) W ($n=1$ ve 2 seviyesi için) dizilimi 3B ters çözüm sonucu.	35
Şekil 4.14 $z=3$ cm derinlik için xy-özdirenç kesitleri: (a) gerçek model (b) DD dizilimi 3B ters çözüm sonucu (c) W ($n=1$ seviye) dizilimi 3B ters çözüm sonucu, (d) W ($n=1$ ve 2 seviyesi için) dizilimi 3B ters çözüm sonucu.	35
Şekil 4.15 Siyah çizgi ön ve sol yüzeylerin kesişim kenarı olmak üzere kenardan x yönünde 5 cm uzaklığa yerleştirilmiş ön yüzeydeki ve kenardan z yönünde 5 cm uzaklığa yerleştirilmiş yan (sol) yüzeydeki elektrotların model üzerindeki gösterimi (1,2,3,4: profil numaraları)	36
Şekil 4.16 (a) Kolon modelinden ve elektrotların kenardan (b) 3 cm (c) 5 cm (d) 9 cm (e) 15 cm (f) 20 cm uzaklıktaki durumları için elde edilen 3B özdirenç modellerinden $x = 1$ cm ve $z = 1$ cm'den alınmış kesitler.....	38
Şekil 4.17 (a) kolon modelinden ve elektrotların kenardan (b) 3 cm (c) 5 cm (d) 9 cm (e) 15 cm (f) 20 cm uzaklıktaki durumları için elde edilen 3B özdirenç modellerinden $x = 3$ cm ve $z = 3$ cm'den alınmış kesitler.....	39
Şekil 4.18 Elektrotların kenardan 5 cm uzakta olduğu durumda elde edilen 3B özdirenç modellerinden (a) Dipol- Dipol (b) PT dizilimleri için $x = 1$ cm ve $z = 1$ cm'den (c) DD (d) PT dizilimleri için $x = 3$ cm ve $z = 3$ cm'den alınmış kesitler	40
Şekil 4.19 Elektrotların kenardan 15 cm uzakta olduğu durumda elde edilen 3B özdirenç modellerinden (a) Dipol- Dipol (b) PT dizilimleri için $x = 1$ cm ve $z = 1$ cm'den (c) DD (d) PT dizilimleri için $x = 3$ cm ve $z = 3$ cm'den alınmış kesitler	41
Şekil 4.20 Elektrotların kenardan 20 cm uzakta olduğu durumda elde edilen 3B özdirenç modellerinden (a) Dipol- Dipol (b) PT dizilimleri için $x = 1$ cm ve $z = 1$ cm'den (c) DD (d) PT dizilimleri için $x = 3$ cm ve $z = 3$ cm'den alınmış kesitler	42
Şekil 4.21 (a,c) Kolon modelinden (b,d) birleşik ters çözüm sonucu elde edilen 3B özdirenç modelinden sırası ile $x = 1$ cm, $z = 1$ cm ve $x = 3$ cm, $z = 3$ cm'den alınmış kesitler	43

Şekil 4.22 Elektrotların boyuna donatılara göre konumlarının (a) ön yüzeyden (b) arka yüzeyden alınmış kesitler (c) 3B gerçek model üzerinde gösterimi (1,2,3,4: profil numaraları)	44
Şekil 4.23 (a,c,e,g) Ön yüzeyden (b,d,f,h) Arka yüzeyden olmak üzere (a,b) Gerçek modelden (c,d) DD (e,f) PT (g,h) İki diizilimin birleşimi için elde edilen 3B öz direnç modellerinden z yönünde 3.5 cm derinlikten alınan kesitler.....	45
Şekil 4.24 (a) Nemliliği (sarı) ve kırık/çatlağı (mavi) temsil eden bölgelerin model üzerindeki gösterimi (b) Nemlilik, kırık çatlak ve etriye yapılarının $z=1.1$ cm derinliği için alınan kesit ile düzensiz (unstructured) model ağı içerisindeki gösterimi (Kırmızı: Beton ($100 \Omega m$), Yeşil: Etriye ($1 \Omega m$), Sarı: Nemlilik ($10 \Omega m$), Mavi: Kırık/çatlak ($5000 \Omega m$)	46
Şekil 4.25 Kullanılan elektrot dizilimleri için her ters çözüm yineleme adımına ait RMS değerlerinin grafik üzerinde gösterimi	47
Şekil 4.26 $z=1.1$ cm derinlik için xy-öz direnç kesitleri: (a) gerçek model, (b) DD dizilimi 3B ters çözüm sonucu, (c) W ($n=1$ seviye) dizilimi 3B ters çözüm sonucu, (d) W ($n=1$ ve 2 seviyesi için) dizilimi 3B ters çözüm sonucu (Gerçek modelde, iletken ve yalıtkan yapıların temsil ettiği yapılar Şekil 4.16' da açıklanmıştır)	48
Şekil 4.27 Tek yüzeyde dağılım gösteren elektrotlar için (a) DD, (b) W ($n=1$ seviye), (c) komşu yüzeylerde dağılım gösteren elektrotlar için PT, (d) karşılıklı yüzeylerde dağılım gösteren elektrotlar için PT elektrot dizilimleri için elde edilen 3B öz direnç modellerinden $z=1.1$ cm'ye ait xy kesitleri.....	49
Şekil 5.1 Yapı taşıyıcı sistem elemanları üzerinde yapılacak küçük ölçekli DAÖ veri toplama çalışmaları için tasarlanan ölçüm düzeneği	51
Şekil 5.2 (a) 5 mm kalınlığında pleksiglas kullanılarak üretilen ölçüm düzeneği levhaları (2 adet). (b) Kablo çıkışları için delikler. (c) Grafit elektrotların yerleşeceği yuvalar	52
Şekil 5.3 Silindirik şeklinde tasarlanan grafit elektrotların (a) boyu 12 mm (b) çapı 10 mm'dir	53
Şekil 5.4 Tek pleksiglas levha kullanımı için iki örnek: (a) x-yönünde 2.5 cm aralıklı 8, y-yönünde 2.5 cm aralıklı 14 elektrot (b) x-yönünde 2.5 cm aralıklı 4, y-yönünde 5 cm aralıklı 14 elektrot, iki pleksiglas levha kullanımı için iki örnek: (c) x-yönünde 2.5 cm aralıklı 4, y-yönünde 5 cm aralıklı 28 elektrot (d) x-yönünde 2.5 cm aralıklı 2, y-yönünde 2.5 cm aralıklı 56 elektrot (kırmızı x işaretleri aktif elektrotları göstermektedir)	55
Şekil 5.5 Geliştirilen ölçüm düzeneğinin ölçüm yapı taşıyıcı sistem elemanı ile konumu. Görselde tek pleksiglas levha kullanılmış ve x-yönünde 2.5 cm aralıklı 4 elektrot, y-yönünde 5 cm aralıklı 14 elektrotlu durum görülmektedir (toplam 56 elektrot).....	56
Şekil 5.6 Ölçü alınan kolon üzerinde boyuna donatı ve etriyelerin GPR ölçümlerine göre belirlenen yerleri (1,2,3,4: DAÖ ölçüsünde profillerin konumlarının kolon üzerinde şematik gösterimi)	57

Şekil 5.7 Veri toplama sırasında kullanılan elektrot ve profil aralığının pleksiglas üzerinde şematik gösterimi.....	57
Şekil 5.8 Hazırlanan yeni ölçüm düzeneğinde üzerinde elektrot konumlarının şematik gösterimi (kırmızı ile işaretli noktalar elektrotların bulunduğu konumları temsil etmektedir).....	59
Şekil 5.9 Kolon üzerinde (a) az nemli yüzeyde (b) nemli yüzeyde yapılan iki adet ölçüm için her elektrota ait kontak direnç değerlerinin grafik üzerinde gösterimi ...	60
Şekil 5.10 (a,b,c) 6-4000 Ωm aralığında (a) özdirenç dağılımının kolon ile aynı ölçülerdeki model ağı üzerinde (b,c) ters çözüm uygulanan alan içerisinde (b) $z=1$ cm'den (c) $z=3$ cm'den alınan kesit üzerinde (d,e,f) 25-1000 Ωm aralığında (d) özdirenç dağılımının kolon ile aynı ölçülerdeki model ağı üzerinde (e,f) ters çözüm uygulanan alan içerisinde (e) $z=1$ cm'den (f) $z=3$ cm'den alınan kesit üzerinde gösterimi	61



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 DAÖ yönteminin uygulandığı bazı çalışmalar ve ek kaynaklardaki beton öz direnç değerleri	23
Çizelge 4.2 Elektrotların ön ve yan (sol) yüzeyin kesişim kenarından farklı uzaklıktaki konumları için elde edilen ters çözüm bulguları	37
Çizelge 5.1 Ölçüm düzeneğinde tek pleksiglas levha kullanılması durumunda x- ve y- yönlerinde kullanılabilecek elektrot sayısı, aralığı ve taranan alan	54
Çizelge 5.2 Ölçüm düzeneğinde iki pleksiglas levha kullanılması durumunda x- ve y- yönlerinde kullanılabilecek elektrot sayısı, aralığı ve taranan alan	54



1. GİRİŞ

Ülkemizin yüzölçümünün %66'sı birinci ve ikinci dereceden deprem bölgesi olarak tanımlanmıştır (Ergünay 2007). Ayrıca, Türkiye'de korozyon kaynaklı yapı kayıplarının gayrisafi millî hasılanın %4,36'sına denk geldiği belirtilmektedir (Çakır 1994). Bu tanımlamalar, yapıların sağlamlığının önemini göz önüne sermektedir. Bir yapının sağlamlığı belirlenirken yapı temel tipi, beton dayanımı, donatıların hasar ve korozyon durumu, yapıdaki kırık ve çatlakların tespit edilmesi önemlidir. Bu tespitler için uygulama sırasında genellikle yapıya hasar veren “karot numune alınması” veya “Schmidt çekici” gibi test teknikleri kullanılmaktadır.

Uygulamalı jeofizik yöntemler, yer için ilk birkaç metresinden onlarca kilometreye kadar olan bölümünün araştırılmasında kullanılmaktadır. Jeofizik yöntemler, yer içindeki materyalleri sismik hız, öz direnç, yoğunluk vb. fiziksel özelliklerine göre ayırt etmektedirler. Son yıllarda, uygulamalı jeofizik yöntemler, yapı incelemelerinde hasarsız tespit yöntemleri (non-destructive detection method) olarak da kullanılmaya başlanmıştır (Saenger vd. 2011, Pérez-Gracia vd. 2013, Martinho ve Dionísio 2014, Plati vd. 2020). Betonarme mühendislik yapılarının sağlamlığı, projeye uygun imal edilip edilmediği, deprem sonrası durumlarının tespiti de bu yapılara zarar vermeden jeofizik yöntemlerle araştırılabilmektedir. Bu tür araştırmalara “Yapı Jeofiziği” araştırmaları denmektedir (Candansayar, 2015).

Taşıyıcı sistem elemanlarının beton kalitesi, beton sağlamlığı, donatı tespiti, donatı korozyon durumunun belirlenmesi yapı jeofiziği çalışmaları kapsamında, tahribatsız ve yüksek çözünürlükle yapılabilmektedir. Elektrik yöntemlerden biri olan “Doğru Akım Öz direnç (DAÖ)” yöntemi, sismik yöntemlerden ultrasonik hız ölçümleri ile elektromanyetik yöntemlerden yer radarı yöntemi hasarsız inceleme yöntemi olarak betonarme yapılardaki taşıyıcı sistem elemanlarının mevcut durumlarının belirlenmesinde ve/veya deprem gibi doğal afet sonrası oluşan hasar tespitinde kullanılmaktadır.

Beton yapı üzerinde uygulanan sismik yöntem “ultrasonik hız ölçümü” olarak isimlendirilmektedir (Niederleithinger 2017, Xu ve Wei 2019, ASTM E494-10, ASTM C597-09). Bu yöntem beton korozyonu ve beton dayanımının, betondaki kırık, çatlak ve boşluk gibi süreksizliklerin yerlerinin belirlenmesi çalışmalarında kullanılmaktadır (Azari vd. 2014, Sabbağ ve Uyanık 2017). Bu sayede, betonun kalitesi değerlendirilebilmektedir. Yine deprem sonrası, yapıların hasar durumunun tespitinde de ultrasonik sismik yöntem kullanılmaktadır (Polimeno vd. 2018).

Günümüzde yer radarı verileri ile beton içindeki örgü kablolarının (post-tension cables) yeri ve derinlikleri, hasara uğramış demir örgülerin yerleri belirlenebilmektedir (Anderson vd. 2010, Lai vd. 2018, Tasker vd. 2018). Yer radarı ölçüleri ile beton içindeki metalik olmayan boşluklar ile metal olan bölgelerin ayrımı da yapılabilmektedir (Rhee et al. 2019; Hugenschmidt et al. 2010; Dinh et al. 2018 Asadi et al.2020). Bu yöntem, beton içindeki demir donatı durumlarının ortaya konulması için de kullanılabilmektedir (Zadhoush vd. 2021, Zatar vd. 2021).

DAÖ yöntemi ise, betonarme yapıların korozyon durumunu incelemek için kullanılmaktadır (Morris vd. 2002, Hornbostel vd. 2013, Rodrigues vd. 2021). Korozyon çalışmalarında, beton tuzluluğu/nemliliği/iletkenlik ilişkisi DAÖ yöntemi ile araştırılmaktadır (Lataste vd. 2003). DAÖ yöntemi beton içindeki çatlakların araştırılmasında da kullanılabilmektedir (Wiwattanachang ve Giao 2011).

Yapı jeofiziğinde, betonun tuzluluk, nemlilik durumları ile ilgili bilgi edinilmesi, yapı korozyon durumu ve beton içindeki çatlakların araştırılması DAÖ yönteminin küçük-ölçekli uygulamaları arasında yer almaktadır. Laboratuvarı, küçük ölçekli betonarme yapıları içindeki süreksizlikler için yapılan DAÖ çalışmaları bulunmaktadır (Seppänen vd. 2009, Plooy, 2013). Beton üzerinde yapılan DAÖ çalışmaları, genellikle laboratuvar koşullarında ve silindirik geometride dağılım gösteren elektrotlar ile ölçüler alınarak yapılmaktadır (Karhunen vd. 2010; Hallaji vd. 2015; Zhong et al. 2021). Ayrıca yapılan bu çalışmalarda genellikle Wenner (W) veya halka etrafında gradyent elektrot dizilimi kullanılmaktadır (Seppänen vd. 2009; Wiwattanachang and Giao, 2011; Zhong et al. 2021). Ochs ve Klitzsch (2020), küçük ölçekli DAÖ ölçüleri için yüzey boyunca W,

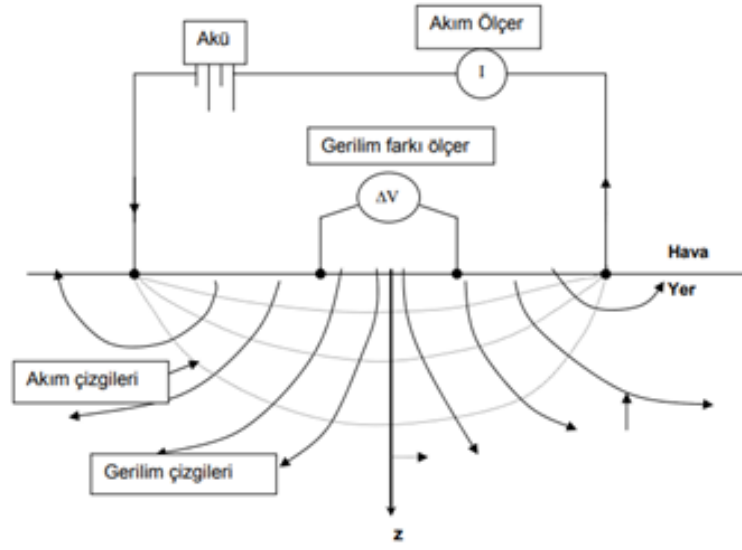
Schlumberger ve dipol-dipol (DD) dizilimleri ölçülerinin 2 Boyutlu (2B) ters çözüm ile karşılaştırmıştır. Yine yapı üzerinde bir hat boyunca çok elektrotlu ölçü düzeneği Plooy vd. (2013) tarafından kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda yapı üzerinde doğrudan 3B ters çözüme uygun geliştirilen bir ölçü düzeneği bulunmamaktadır.

Bu tez çalışmasında, doğrudan betonarme yapı üzerinde 3B ters çözüme uygun çok-elektrotlu ve çok kanallı ölçüm cihazı ile ölçü almaya uygun bir düzenek geliştirilmiştir. Bu düzenek için çalışmanın amacına en uygun elektrot dizilimleri, elektrot ve profil aralıkları yapılan incelemeler ile belirlenmiştir. Ölçü düzeneği, küçük ölçekli DAÖ çalışmaları ile yapı taşıyıcı sistem elemanlarının aplikasyon planlarına uygun inşa edilip edilmediğinin görüntülenmesi, elemanların içerisindeki kırık-çatlak veya nemli bölgelerin ve binalarda deprem sonrası hasar tespitinin incelenmesi hedeflenerek tasarlanmıştır. Tez çalışması kapsamında yapılan modelleme çalışmalarında, örnek yapı taşıyıcı sistem elemanı olarak kolon seçilmiştir. Çalışmalar, kolonun tek bir yüzeyinde, karşılıklı yüzeylerinde ve komşu yüzeylerinde olmak üzere üç farklı elektrot dağılımı için yapılmıştır. Modelleme çalışmaları sonucu elde edilen yapay verilere gürültü eklenerek 3B ters çözüm yapılmıştır. Elde edilen 3B öz direnç dağılımları yorumlanarak, geliştirilen ölçüm düzeneği ile bir yapı elemanı üzerinde ölçü almak için kullanılacak en uygun elektrot veri seti (elektrot aralığı, profil aralığı, elektrot dizilimi vb.) belirlenmiştir. Modelleme çalışması sonucu demir donatılar ve kırık zonların 3B öz direnç tomografisi ile tespit edilebildiği gösterilmiştir. Gerçek verilerin toplanması için, bina içerisinde yer alan bir kolon yapısı üzerinde ölçümler yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapı incelemesinde çok elektrotlu ölçü sistemi ile 3B öz direnç tomografisinin sistematik olarak uygulanmasına yönelik bir plan hazırlanmıştır.

2. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ (DAÖ) YÖNTEMİ

1900'lü yılların başından beri kullanılmakta olan DAÖ yöntemi, elektrik yöntemler arasında en yaygın yöntemdir. Yöntem, özellikle çevresel gürültülerden az etkilenmesinden, veri toplama ve veri işlem aşamalarının kolay ve ekonomik olmasından dolayı farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Özellikle, 1990'lardan itibaren geliştirilen çok elektrotlu ve çok kanallı ölçü sistemleri sayesinde, 1000'den fazla ölçü bir saat gibi kısa bir sürede toplanabilmektedir (Candansayar 2008). Bu nedenle günümüzde DAÖ verileri, genellikle “iki boyutlu (2B)” ve “üç boyutlu (3B)” ters çözüme uygun şekilde toplanmaktadır. Bir hat boyunca ölçülen sondaj profil verileri 2B (Sasaki 1989; Candansayar, 2008; Demirci vd. 2012) ve paralel hatlar boyunca ölçülen veriler ise 3B (Sasaki 1994; Loke and Barker 1996; Gündoğdu ve Candansayar 2018) ters çözüm algoritmaları ile değerlendirilmektedir.

DAÖ yönteminin temel ilkesi, yere iki noktadan uygulanan doğru akımın oluşturduğu gerilim farkının, diğer iki noktadan gerilim elektrotları yardımıyla ölçülmesidir (Şekil 2.1). Yöntemin amacı, araştırılan bölgenin yapısını, elektrik öz direnç parametresine göre haritalamaktır (Candansayar 2007). Doğadaki materyallerin öz direnç değeri, incelenen yapı dokusunun seyrekliği/sıklığı, doygunluk oranı, tane büyüklüğü ve gözenekliliği, akışkan içeriği, sıcaklık gibi etkenlere bağlı olarak değişim göstermektedir.



Şekil 2.1 AB akım ve MN gerilim elektrotları ile oluşturulan arazi ölçü sistemi ve akım-gerilim çizgilerinin yer içindeki yayılımı (Candansayar (2007), ilk kaynak Van Nostrand ve Cook 1966)

Yere uygulanan akım ile ölçülen gerilim farkı arasındaki ilişki ‘Ohm Kanunu’ olarak bilinir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$J = \sigma \cdot E \quad (2.1.a)$$

Burada J akım yoğunluğu (Amper/m²), σ (S/m) ise öz direncin ($\rho(\Omega m)$) tersine eşit olan iletkenliktir. E, elektrik alan (V/m) ise aşağıda verilen gerilimin (φ, V) uzaklığa (r) göre türevinin negatif işaretlisine eşittir.

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (2.1.b)$$

Akım yoğunluğu (J), akımın geçtiği alana oranına eşittir ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.1.c)$$

Burada I akım (Amper), A ise akımın geçtiği kesit alanıdır (m²). Yeryüzündeki iki akım elektrotu ile oluşturulan akım öz dirence göre tek düze (homojen) ve tek tip (izotrop)

ortamda yarım küre hacimli bir alanı takip eder. Bu durumda “A” alanı yarım küre hacmi olan $(2\pi r^2)$ ye eşittir. Yukarıda (2.1b) ve (2.1c) ifadeleri (2.1a) da yerine konursa

$$\frac{I}{2\pi r^2} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (2.1d)$$

İki akım elektrotu kullanarak (A ve B) yere akım uygulandığında, bu akımdan dolayı diğer iki noktaya yerleştirilen gerilim elektrotu (M ve N) arasında oluşan gerilim farkı $(\Delta\phi)$ yukarıdaki (2.1d) denkleminde r yerine akım ve gerilim elektrotları arasındaki mesafe konularak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta\phi = \phi_M - \phi_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)’ den ρ çekilirse,

$$\rho = k \cdot \left(\frac{\Delta\phi}{I} \right) \quad (2.3)$$

elde edilir. Burada k elektrotların konumuna bağlı “geometrik faktör” olarak isimlendirilir ve yüzey ölçüleri için denklem 2.4’teki gibi hesaplanır

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (2.4)$$

Kuyu içi DAÖ ölçülerinde ise akım yer altında tam küre hacimli bir alanı takip etmektedir. Bu nedenle, bağıntının pay kısmı, 4π olarak yazılmalıdır. Kuyu içi DAÖ ölçümlerinde ise k aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Denklem 2.5).

$$k = \frac{4\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r'_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r'_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r'_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} + \frac{1}{r'_{BN}} \right)} \quad (2.5)$$

Burada r, iki elektrot arasındaki dik uzaklığı r' , akım elektrotlarının iz düşümü ile hesaplanan uzaklıkları temsil eder.

Denklem (2.3), özdirence göre tek düze ve tek tip bir ortam için geçerlidir. Fakat gerçekte yeraltı özdirence göre tek düze değildir. Bu nedenle, arazide ölçülen gerilim farkı kullanılarak (2.3) denkleminden hesaplanan özdirenç, Görünür Özdirenç ($G\ddot{O}/\rho_a$) olarak isimlendirilir. Ortamın özdirence göre tekdüze ve tek tip olması durumunda ise ρ_a , ortamın özdirence eşit olacaktır.

$$R = \Delta\varphi / I \quad (2.6)$$

Bu tez çalışmasında incelenen bölge sonlu bir ortama sahip olan yapı elemanlarıdır ve görünür özdirenç değerinin hesabında kullanılan denklem 2.3 bu çalışma için kullanılabilir değildir. Bu nedenle yapı elemanları gibi sonlu ortamlarda, ters çözüm sırasında denklem 2.6’da verilen direnç (R - resistance) değerleri kullanılmaktadır.

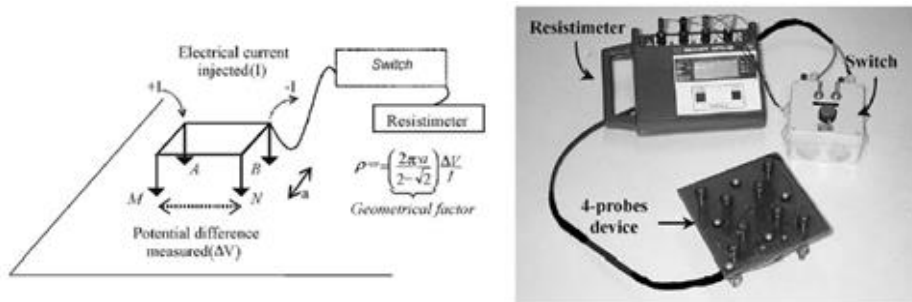
2.1 Küçük Ölçekli DAÖ Çalışmalarında Kullanılan Elektrot Dizilimleri

Yapılan çalışmalarda gerilim farklarının ölçülmesi için, birçok farklı elektrot dizilimi geliştirilmiştir. DAÖ yönteminde, araştırılan hedefin yüksek çözünürlüklü görüntüleri için yüksek bir veri yoğunluğu ve hedefi içeren bölgenin düzgün bir şekilde kapsanması amaçlanmaktadır. Aynı bölgede farklı elektrot dizilimleri ile ölçülen gerilim farkları dolayısı ile elde edilen direnç değerleri birbirinden farklı olmaktadır.

Arama jeofiziğinde sıklıkla kullanılan dört elektrotlu ölçüm yaklaşımı, uygulamalı jeofizik çalışmalarında da çoğunlukla kullanılmaktadır. DAÖ yönteminde kullanılan geleneksel elektrot dizilimleri (Schlumberger (S), W, DD, sağ yönlü pol-dipol (PD-R) ve sol yönlü pol-dipol (PD-L)) Şekil 2.2’de verilmiştir. Bu dizilim türlerinde elektrotlar bir simetri merkezine göre düz bir hat boyunca konumlandırılmaktadırlar (Candansayar 2008). Geleneksel olmayan dizilimlere örnek olarak ise kare elektrot dizilimi Şekil 2.3’te gösterilmiştir.

Elektrod Dizilimi	Geometrisi	K	Ölçülen
(a) Schlumberger		Genel olarak $K = \frac{\pi}{4} \frac{AB^2}{MN^2} - 1$ dir. Eğer, $MN=a$ ve $AM=NB=na$ alınırsa $\pi n(n+1)a$	$\rho_s(AMNB)$
(b) Wenner		$2na$	$\rho_s(AMNB)$
(c) Dipol-dipol		$\pi n(n+1)(n+2)a$	$\rho_s(AIBM)$
(d) "Pole-dipol" sol (AMN)		$2\pi n(n+1)a$	$\rho_s(AMN)$
(e) "Pole-dipol" sağ (MNB)		$2\pi n(n+1)a$	$\rho_s(MNB)$
(f) İki-Yönlü Üç-Elektrod (İYÜE) dizilimi		$2\pi n(n+1)a$	$\rho_s(AMN)$ ve $\rho_s(MNB)$

Şekil 2.2 Geleneksel elektrot dizimleri ($n=1,2,3,\dots$) (Candansayar, 2007)



Şekil 2.3 Kare (Four-probe) elektrot diziliminin şematik ve cihaz ile gösterimi (Lataste vd. 2003)

Küçük ölçekli DAÖ çalışmalarında da geleneksel ve geleneksel olmayan birçok farklı elektrot dizilimi kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı çalışma türlerinde sıklıkla kullanılan dizilimler göze çarpmaktadır. Yapı jeofiziğinde çoğunlukla W dizilimi (Morris vd. 1996, Kaufhold vd. 2014, Reichling vd. 2015, Alhajj vd. 2019, Balestra vd. 2019) kullanılsa da, Schlumberger (Ochs ve Klitzsch 2020), DD (Clement ve Moreau 2016, Ochs ve Klitzsch 2020) ve kare dizilimin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Lataste vd. 2003). Tıbbi görüntüleme çalışmalarında DD elektrot dizilimi yaygın olarak kullanılmaktadır (Bodenstein vd 2009, Adler vd. 2021). Laboratuvar çalışmalarında ise W (Hojat vd. 2021), pol-dipol (PD) (Bang vd. 2013) ve DD (Chen vd. 2016, Bang vd. 2013) dizilimleri sıkça kullanılmaktadır.

Her dizilimin birbirine göre üstün ve zayıf olduğu yönler bulunmaktadır. Elektrot dizilimi seçimi ise yapılan çalışmanın amacı ile dizilimlerin üstünlük ve zayıflıkları göz önünde tutularak yapılmaktadır. Tüm dizilimlerin avantajlarını kullanmak için birden fazla dizilim için veri toplanarak bunların birleşik ters çözümü yapılabilir (Candansayar 2008).

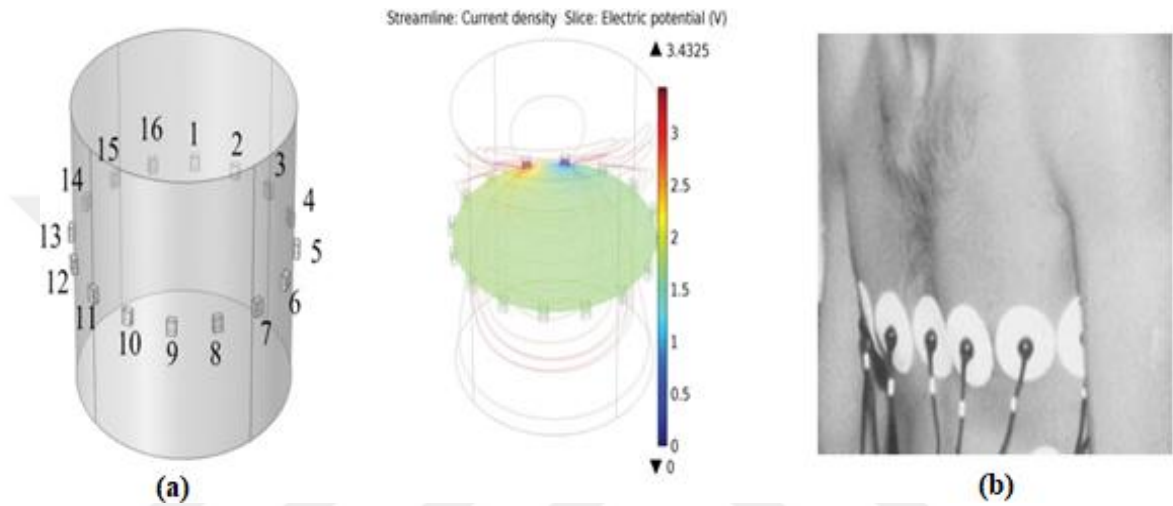
2.2 Küçük Ölçekli DAÖ Çalışmalarında Kullanılan Veri Toplama Yöntemleri

Kullanılan elektrot diziliminin olduğu kadar, bu dizilimler ile nasıl veri toplandığı da çalışmanın amacı ve toplanan veri açısından önem taşımaktadır. DAÖ yönteminde, genellikle sondaj profil ölçüleri alınarak yanal ve düşey yönde öz direnç dağılımı elde edilmektedir.

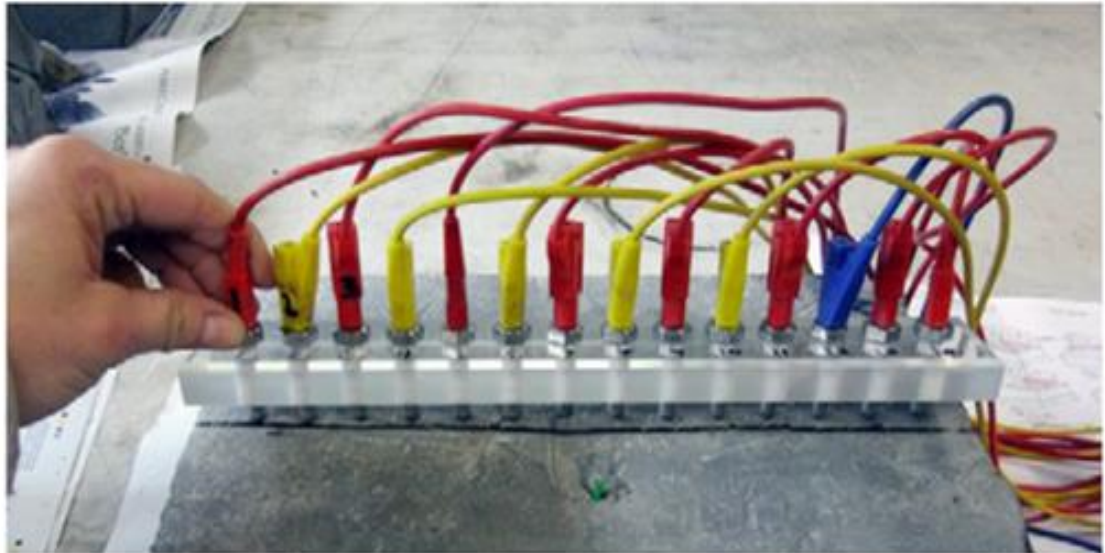
Geleneksel üç boyutlu DAÖ çalışmalarında, DD dizilimi kullanılarak elektrotların x ve y yönünde eşit aralıklı dağılımıyla kare veya dikdörtgen bir ızgarada veri toplanması sıkça uygulanan bir yöntemdir (Loke ve Barker 1996). Tercihen, veriler önce x yönünde, ardından y yönünde toplanmalıdır. Ölçümlerin hem x hem de y yönde yapılması ile yön bağımlılığın önüne geçilebilmektedir (Martinho ve Dionísio 2014; Papadopoulos vd. 2006).

Küçük ölçekli DAÖ çalışmalarında ise bu veri toplama yöntemine ek olarak farklı şekillerde de uygulamalar yapılmaktadır. Tıbbi görüntüleme alanında, çoğunlukla

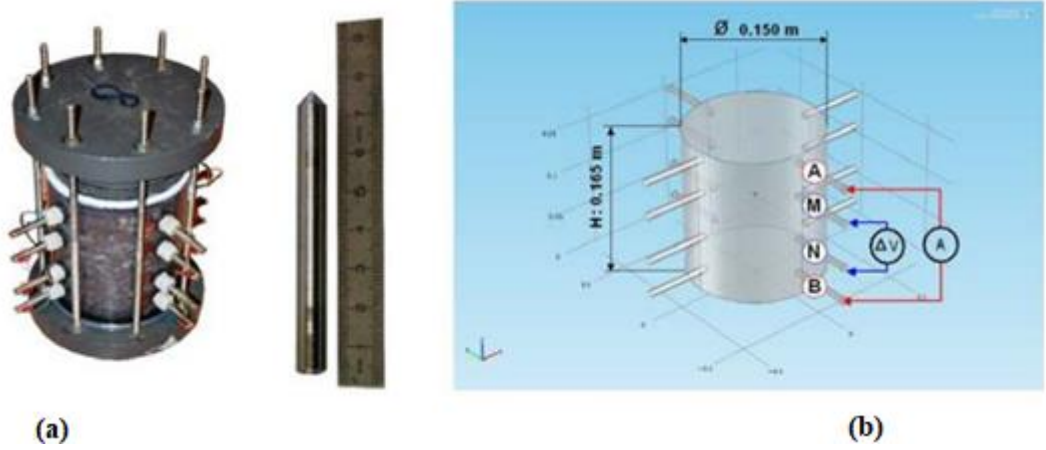
incelenmek istenen alan insan vücudunun göğüs, kafatası gibi farklı bölgeleridir (Holder 1992, Erlandsson vd. 2006). Bu nedenle, düz bir doğrultuda yerleştirilmiş elektrotlar yerine silindirik bir alan etrafına veya insan vücudu üzerine yerleştirilmiş elektrotlardan oluşan bir düzeneğin kullanımı daha yaygındır (Şekil 2.4). Yapı jeofiziğinde ve laboratuvar çalışmalarında ise ihtiyaca göre hem bir doğrultu boyunca (Şekil 2.5) hem de silindirik bir hacim etrafında (Şekil 2.6) alınan ölçüler ile çalışmalar yapılmaktadır.



Şekil 2.4 (a) Tıbbi görüntüleme için yapılan bir DAÖ çalışmasında kullanılan elektrot diziliminin şematik gösterimi (Fan vd. 2016) (b) Tıbbi görüntüleme amaçlı yapılan bir çalışmada kullanılan elektrot diziliminin insan vücudu üzerindeki gösterimi (Brown 2001)



Şekil 2.5 Küçük Ölçekli DAÖ çalışmaları için geliştirilmiş çok elektrotlu ölçü düzeneği (Du Plooy vd 2013)



Şekil 2.6 (a) Test hücresi ve elektrotlar (b) Ölçüm prensibi -AB akım ve MN gerilim elektrotları- (Clement vd. 2011)

Bu tez çalışmasında, 3B ters çözüme uygun veri toplama teknikleri uygulanmış ve kullanılan elektrot dizilimleri, elektrot dağılımları ve diğer geometrik değişkenler (profil aralığı, elektrot aralığı vb.) Bölüm 3'te yer alan modelleme ve ters çözüm çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

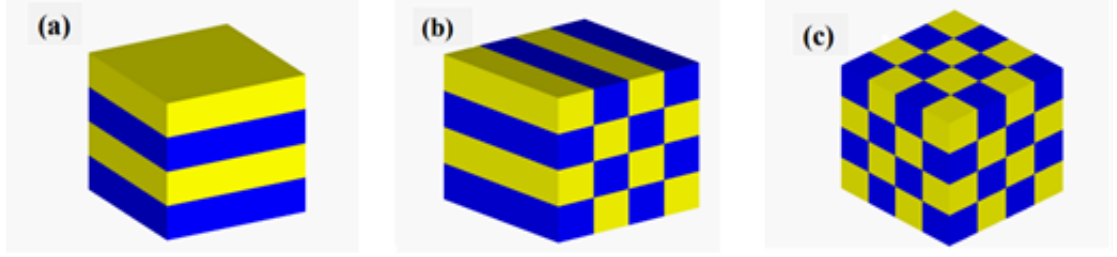
3. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE ÜÇ BOYUTLU MODELLEME VE TERS ÇÖZÜM

Jeofizik biliminin amacı, araştırılan bölgeye ait fiziksel özelliğin o alan içindeki dağılımını hesaplamaktır. İlgilenilen fiziksel özellik, çalışmanın amacına ve buna uygun seçilen jeofizik yönteme göre değişkenlik göstermektedir. DAÖ yönteminde ise bu dağılım yöntemin duyarlı olduğu parametre olan öz direnç için hesaplanmaktadır ancak ölçüm sırasında elde edilen veri öz direnç değil gerilim farkıdır. Genellikle, bu gerilim farklarından hesaplanan görünür öz direnç değerleri giriş olarak kullanılır ve ters çözüm sonucu öz direnç modeli elde edilir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi bu tez kapsamında araştırılan bölge sonlu bir ortam olduğu için görünür öz direnç değerleri girdi olarak kullanılamamaktadır. Bunun yerine ters çözümde direnç değerleri kullanılarak öz direnç dağılımı elde edilmektedir.

Modelleme ise, düz çözüm olarak da adlandırdığımız ve ters çözüm algoritmalarının da bir parçası olarak karşılaştığımız, belirli bir model için kuramsal verinin hesaplanmasıdır. Modelleme kavramının jeofizikte karşımıza çıktığı bir diğer durum ise veri toplama aşamasından önce, görüntülenmek istenen alanın, kullanılmak istenen elektrot dizilimi, elektrot aralığı vb. için olası model yanıtının belirlenmesidir. Model yanıtı kavramı, belirli bir model parametre kümesi için modeli tanımlayan matematiksel bağıntılarla hesaplanan kuramsal verilerdir. Modelleme çalışması ters çözüm içinde kuramsal veri ve kısmi türevler düzeyini hesaplamak için kullanılır. Ayrıca modelleme ile çalışmanın amacına uygun veri kümesini minimum çabayla elde edebilecek ölçü parametreleri (elektrot aralığı, profil aralığı vb.) elde edilmektir.

3.1 3B Modelleme

DAÖ verilerinin 1B modellemesinde, incelenen bölgenin tek düze ve tek tip öz direnç dağılımına sahip katmanlardan oluştuğu varsayılmaktadır. 2B modellemede incelenen bölgenin öz direnç dağılımı x ve z yönünde değişen, y yönünde sabit kalan bloklardan oluştuğu, 3B modellemede ise kendi içinde tek düze ve tek tip öz direnç dağılımı gösteren küplerden oluştuğu varsayılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 (a) 1B (b) 2B (c) 3B iletkenlik modelleri (Candansayar 1997)

DAÖ yönteminde, 1B modellemede belirti analitik olarak hesaplanabilir; fakat 2B ve 3B çalışmalarda, modeller daha karmaşık olacağından analitik hesap zordur ve hesaplamalar sayısal olarak yapılmaktadır (Candansayar 1997). İntegral denklemi, Sonlu Farklar ve Sonlu Eleman yöntemi, DAÖ verilerinin modellemesinde kullanılan başlıca sayısal hesaplama yöntemleridir (Candansayar 1997). DAÖ yönteminde ilk 3B modelleme çalışmaları 1970'li yıllarda sonlu farklar, (Dey ve Morisson, 1979) sonlu elemanlar (Coggon, 1971) ve integral denklemi (Barnet 1972) yöntemleri kullanarak farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir.

Günümüzde daha çok sonlu farklar ve sonlu elemanlar kullanarak 3B düz çözüm yapılmaktadır. Sonlu farklar ve sonlu eleman yöntemleri, incelenen bölgenin farklı öz direnç değerlerine sahip binlerce hücreye bölünebilmesine olanak sağladığından diğer yöntemlere göre DAÖ çalışmaları için daha uygundur.

Modelleme yapabilmek için modeli tanımlayan bir matematiksel bağıntı (düz çözüm bağıntısı) gereklidir. DAÖ yönteminde kullanılan düz çözüm bağıntısı Poisson denklemi olarak adlandırılmaktadır (Denklem 3.1).

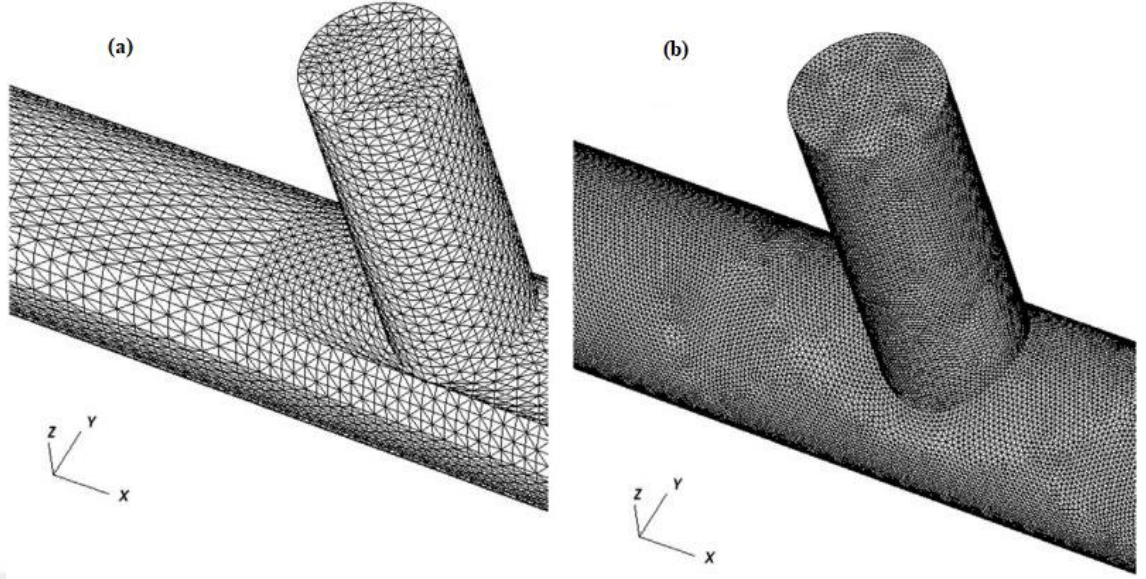
$$-\nabla \cdot (\sigma(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)) = \nabla \cdot J_s \quad (3.1)$$

Burada σ , iletkenlik, φ , gerilim ve J_s , kaynak civarındaki akım yoğunluğudur. 3B uzayda herhangi bir (x_s, y_s, z_s) noktasından uygulanan nokta akım kaynağı için aşağıdaki gibi tanımlanabilir

$$\nabla \cdot J_s = I \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s). \quad (3.2)$$

Poisson denklemi eliptik tip ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemdir. Bu denklem sınır koşulları kullanılarak çözülür. Poisson denkleminin elde edilmesinin ve kullanılan sınır koşullarının ayrıntıları için Candansayar (1997)'ye bakılabilir. Yukarıdaki denklemin sonlu elemanlar ile çözümünde işlem adımları için Candansayar (1997), Erdoğan (2009) ve Rücker (2011)'e bakılabilir.

Sayısal çözüm yöntemlerinin ilk adımı, çözüm bölgesinin ayrıklaştırılmasıdır. Ayrıklaştırma, modellenen alanın sonlu sayıda elemana bölünmesini içermektedir. Elemanların kenarlarını oluşturan doğruların kesişme noktaları, düğüm noktası olarak adlandırılır ve denklem 3.1'deki bilinmeyen gerilim (ϕ) değerleri bu noktalarda hesaplanır. Birbirlerine düğüm noktalarından bağlı bu elemanların oluşturduğu yapıya sonlu elemanlar ağı veya hesaplama ağı adı verilir. Bu ağlar yapısal ve yapısal olmayan ağlar olarak ikiye ayrılır (Şekil 3.2). Yapısal ağlarda, düğüm noktaları belli bir düzen içerisinde dağılım göstermektedir. Temel olarak altı yüzlü veya dört yüzlü elemanlar kullanan, blok yönelimli ağlardır. Ancak blok yönelimli olması nedeniyle karmaşık yapıların temsili konusunda yetersiz kalmakta ve sayısal çözümde hatalara sebep olmaktadır. Yapısal ağlarda (geleneksel düzenli ağlar), karmaşık geometrili modelleri tanımlayabilmek için çok sayıda eleman ve düğüm noktasına ihtiyaç vardır. Yapısal olmayan ağlar ise karmaşık geometrideki alanları modellemek için daha uygundur ve esneklik, sayısal performans, doğruluk gibi açılardan yapısal ağlardan daha üstündür. Yapısal olmayan ağlar, daha az sayıda eleman ve düğüm noktası ile karmaşık modellerin tanımlanmasına olanak sağlaması ile de daha avantajlıdır.



Şekil 3.2 a) 3B Yapısal ağ tasarımı b) 3B Yapısal olmayan ağ (Bieder ve Errante 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Bu tez çalışmasında, modelleme/düz çözüm çalışmaları için kullanılan R3t (Binley 2013) algoritmasında, 3B Poisson denklemi sonlu elemanlarla çözülmektedir. Algoritmada, düzgün dört yüzlü (tetrahedron) elemanlardan oluşan düzensiz ağ kullanılmaktadır ancak algoritma bir ayrıklaştırma bölümü içermemektedir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında, ayrıklaştırma için dört yüzlü elemanlar ile yapısal olmayan ağ tasarım algoritması olan TetGen (Si 2020) kullanılmıştır. TetGen ve bu algoritmayla yapılan işlemler ile ilgili detaylı bilgi izleyen alt bölümlerde verilmiştir.

3.2 3B Ters Çözüm

DAÖ yönteminde, 3B ters çözüm yapılabilmesi için iki farklı şekilde veri toplanabilir. Bunlardan ilkinde paralel doğrultular boyunca sondaj-profil verileri ölçülmekte ve tüm yapma-kesit veri kümeleri birlikte kullanılarak üç boyutlu ters çözüm yapılmaktadır. 3B ters çözüme uygun veri toplamak için kullanılan ikinci yol, bir xy-alanı eşit aralıklı karelaj yapılarak tüm köşe noktalarına elektrot çakılması ve tüm olası akım ve gerilim elektrot çifti için veri toplanmasıdır. Ancak bu şekilde veri toplamak için (örneğin x ve y yönünde 20'şer adet grid noktası için 400 elektrodun bağlanabildiği) çok elektrotlu bir ölçü sistemi olması gerekmektedir. Bu tip bir ölçü sistemi ile veri toplamak hem zaman açısından hem

de maddi açıdan oldukça maliyetlidir. Bu tez çalışmasında, pratikte en fazla kullanılan birinci yol kullanılmıştır.

DAÖ yönteminde ters çözüm problemi kötü durumlu (ill-posed) bir problemdir. Yani, problem durağan değildir (unstable), doğrusal değildir (nonlinear) ve çözümü tek değildir (non-unique). Problem, doğrusal olmaması nedeniyle genellikle yinelemeli bir şekilde çözülür. Yinelemeli çözümün en basit anlatımı, her yineleme adımında değişen bir başlangıç modeli için elde edilen model yanıtı (kuramsal veri) ile ölçülen veri değerleri arasındaki farkın azalmasıdır. Yinelemeli çözümün her adımında, elde edilen parametre düzeltme vektörü bir önceki yinelemedeki parametre vektörüne eklenerek yeni parametre değerleri elde edilir. Bu yinelemeli işlem belirlenen durdurma ölçütü sağlanana kadar devam eder.

DAÖ verilerinin 3B ters çözümünde genellikle Tikhonov düzgünleştiricisi yöntemi kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan R3t (Binley 2013) algoritması, yuvarlatıcılı durağanlaştırıcı kullanan düzgünleştiricili ters çözüm algoritmasını kullanmaktadır. İlgili algoritmada yinelemeli olarak çözülen denklem ve parametre düzeltme vektörünün hesaplanması sırası ile denklem (3.5) ve (3.6)'da verilmiştir.

$$(J^T W_d^T W_d J + \alpha R) \Delta \mathbf{m} = J^T W_d^T (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}_j)) - \alpha R \mathbf{m}_j \quad (3.5)$$

$$\mathbf{m}_{j+1} = \mathbf{m}_j + \Delta \mathbf{m} \quad (3.6)$$

N toplam veri sayısı, M toplam parametre sayısı ve j yineleme sayısı olmak üzere; $\mathbf{J}$, kuramsal verilerin parametrelere göre kısmi türevlerinden oluşan (NxM) boyutlu dizey (Jacobian dizeyi), $\mathbf{m}$ parametreleri içeren (Mx1) boyutlu vektör, α düzgünleştirici parametresidir (regularisation parameter). $\mathbf{W}_d$, her veri için ölçülen standart sapmaların tersinden oluşan (NxN) boyutlu veri ağırlık dizeyi, $\mathbf{R}$ (MxM) boyutlu yuvarlatıcı (roughness) dizeyi, $\Delta \mathbf{m}$, her yinelemede (3.5) in çözümünden elde edilen (Mx1) boyutlu parametre düzeltme vektörü, $\mathbf{f}(\mathbf{m})$ ise j numaralı yinelemede parametre vektörü ($\mathbf{m}_j$) için hesaplanan (Nx1) boyutlu kuramsal veri vektörüdür. Algoritma, her yineleme sonunda aşağıda verilen ortalama karekök hata (root-mean-square error) değerini hesaplamaktadır

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{d_i - f_j}{\sigma_i} \right)^2} \quad (3.7)$$

Yukarıda verilen denklem (3.5) ve (3.6) ile yürütülen yinelemeli çözümde iki farklı durdurma ölçütü kullanılmaktadır. Birincisi, ardışık yinelemeler sonunda RMS değerinin azalmaması veya 1 değerine ulaşmasıdır. İkinci ölçüt ise kullanıcı tarafından belirlenen en fazla yineleme sayısına ulaşılmasıdır. Ancak belirlenen yineleme sayısına ulaşılması durumunda RMS hata değeri hala büyük ise, son yinelemedeki model başlangıç modeli olarak kullanılıp ters çözüme devam edilebilmektedir.

Denklem (3.5), veri farkı (data misfit) ve model farkının (model misfit) doğrusal bileşiminden oluşan bir amaç fonksiyonuna dayanmaktadır. Ölçülen ve kuramsal veri arasındaki farkı tanımlayan veri farkı (Ψ_d), model farkı (Ψ_m) ve Occam ters çözümünde en küçüklenmeye çalışılan amaç fonksiyonu (Ψ_{total}) sırasıyla aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\Psi_d = (d - f(m))^T W_d^T W_d (d - f(m)) \quad (3.8)$$

$$\Psi_m = m^T R m \quad (3.9)$$

$$\Psi_{total} = \Psi_d + \alpha \Psi_m \quad (3.10)$$

Kullanılan ters çözüm yönteminde, olabilecek en büyük α değeri için gözlemlenen verilerle tutarlı olan en yumuşak geçişli (smooth) öz direnç dağılımının elde edilmesi amaçlanmaktadır. R3t algoritması bunu, denklem (3.5)'in çözüldüğü ve denklem (3.6)'nın uygulandığı, yinelemeli bir süreçle başarmaktadır (Binley 2013). Algoritma, her yinelemede α 'yı, mümkün olduğu kadar büyük tutarak değiştirmekte ve (yineleme başına en fazla 10 adet α değeri kullanarak) α değeri için bir satır araması (line-search) yapmaktadır.

R3t, denklem (3.5)'in sol tarafında parantezin içindeki terimlerin eşit dengesini değerlendirerek sürecin başında makul bir α başlangıç değeri hesaplamaktadır. Bu durum genellikle birkaç yineleme sonucunda tatmin edici bir yakınsamaya ulaşılması ile sonuçlanmaktadır. Ancak, ters çözüm işlemi çok hızlı bir şekilde çözüme ulaşmaya

çalıştığından, elde edilen modelin daha düzgün olması için süreci yavaşlatmak daha faydalı olmaktadır. R3t, algoritmasında bu yavaşlatma, ters çözüm girdi dosyaları içerisinde seçilen parametrelerden biri olan, hedeflenen azalma (target_decrease) parametresi ile belirlenmektedir. Hedeflenen azalma, her yinelemede olabilecek en büyük RMS değişiminin, kullanıcı tarafından belirlenmesine imkân vermektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda bu değer 0.1 olarak seçilmiştir, yani her yinelemede RMS en fazla %10 azalım göstermektedir.

3.3 3B Modelleme ve Ters Çözüm Algoritması

Tez kapsamında 3B düz çözüm ve ters çözüm programı olarak “R3t” algoritması kullanılmıştır (Binley, 2013). DAÖ yönteminde genelde yeryüzü, kuyu-kuyu veya kuyu-yüzey ölçüleri alınmaktadır. Ayrıca, küçük ölçekli DAÖ ölçüleri, laboratuvar ortamında x, y ve z-yönünde sonlu uzunluktaki beton örnekler üzerinde veya yapılar üzerinde de alınmaktadır. Düz çözüm algoritmalarında sonlu ortamlar için yarı-sonsuz ortam için olandan daha farklı sınır koşulları gerekmektedir. R3t algoritması, ters çözüm için girdi olarak direnç değerlerini kullanması ve sonlu ortamla için gerekli olan sınır koşullarını direkt uygulaması nedeniyle bu tip ortamları modellemek için veya bu tip ortamlarda ölçülen verilerin ters çözümü için de kullanılmaktadır (Kremer vd. 2012, Bosch vd. 2016 ve Kremer vd. 2018).

R3t algoritması için gereken girdi dosyalarından ilki “mesh3d.dat” dosyasıdır. Bu dosya içerisinde, hem düz çözüm hem de ters çözüm sırasında kullanılan ağı oluşturan düğüm noktaları ve elemanlarla ilgili bilgiler yer almaktadır. R3t algoritmasında, belirli bir öz direnç dağılımının ve akımın uygulandığı/gerilim farkının ölçüldüğü noktaların potansiyel alanının hesaplanması için en az bir Dirichlet düğüm noktası gerekmektedir. Bu noktanın konumu mesh3d.dat dosyasında tanımlanmaktadır. Dirichlet düğüm noktası, topraklama noktası gibi potansiyelin sabitlendiği bir noktadır. Bu düğüm noktasının konumunun, elektrotlardan birine çok yakın olması durumunda elektrotların yakınındaki yüksek gradyanlar nedeniyle hesaplamada bazı sayısal hatalar oluşmaktadır (Binley, 2023). Dirichlet düğüm noktası konumunun çözüme etkisi incelenmiş ve elektrot aralığının 3 katından büyük konumlarda RMS değerinde herhangi bir değişim

gözlemlenmemiştir. Bunun nedeni ise tez çalışmasında kullanılan modelin sonlu bir yapıyı temsil etmesi ve düğüm noktasının yerleştirilebileceği uzaklığın kısıtlı olmasıdır.

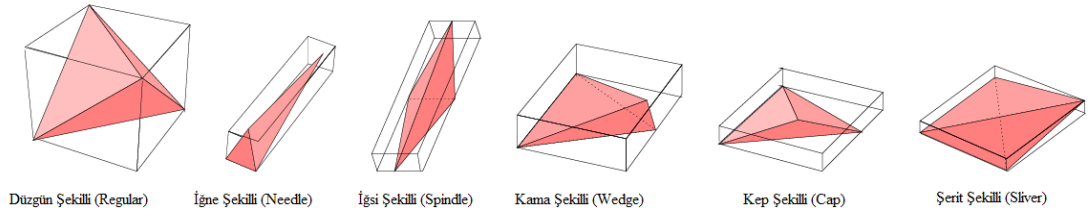
Algoritma için gereken ikinci girdi dosyası ise “protocol.dat” dosyasıdır. Bu dosya, her ölçü için kullanılan akım ve gerilim elektrotlarının numaralarını içermektedir. Dosya eğer ters çözüm için kullanılacaksa, ek olarak ölçülen büyüklükler de dosya içerisinde yer almalıdır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan elektrot dizilimlerine ait protocol.dat girdi dosyalarının hazırlanması için yazılmış olan MATLAB kodu Ek-2’de verilmiştir.

Algoritma için gereken son girdi dosyası ise “R3t.in” dosyasıdır. Bu dosya, elektrot geometrilerine ait bilgileri içerir. Düz çözümde her bir elemana ait öz direnç değerleri, ters çözümde ise başlangıç modeline ait öz direnç değerleri bu dosyada atanır. Ters çözüm işlemi için durdurma ölçütleri de (en fazla yineleme sayısı, hedeflenen RMS değeri vb.) bu dosya içerisinde belirlenmektedir. Yine bu dosya içerisinde, kullanılacak durağanlaştırıcı fonksiyonu, veri ağırlık dizeyi, ters çözüm algoritma tekniği seçimini tanımlayan bilgiler yer almaktadır.

3.4 Model Ayırıklaştırması

Modelleme uygulamaları ve ters çözüm için kullanılan R3t algoritması bir ayırıklaştırma bölümü içermemektedir. Bu nedenle tasarlanan modeller, sonlu elemanlar ağ tasarımı yapan TetGen (Si, 2013) algoritması ile oluşturulmuştur.

TetGen, bir dört yüzlü ağ oluşturma programıdır. Bir dört yüzlü ağ, hem topolojisi hem de geometrisi bakımından 3B sürekli bir alanın ayırık bir temsili olan ağ yapısıdır. TetGen’in temel kullanım amaçlarından biri, fiziksel olguları sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemlerle modellemektir. Modellemelerin, yüksek doğruluk ile elde edilebilmesi ise oluşturulan ağın kalitesine bağlıdır. Ağın kalitesini belirleyen faktörlerden biri de ağ oluşturan elemanların boyut ve şekilleri ile ilgili özelliklerdir. Genel olarak, sayısal yöntemlerin doğruluğunu ve performansını düşürdüğü için ağ tasarımında çok küçük ve büyük açılı elemanlardan kaçınılmaktadır (Şekil 3.3).

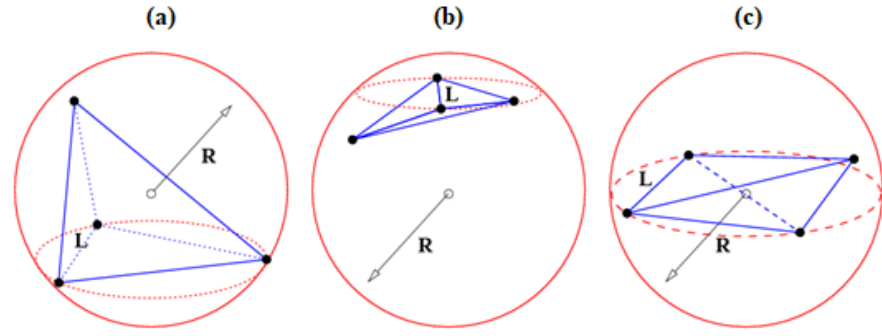


Şekil 3.3 Farklı dört yüzlü eleman şekilleri (Si, 2020)

Şerit (sliver) şeklindeki elemanlar zayıf yaklaşım özellikleri verdiğinden, ağ üretici algoritmalar bir kalite kontrol ölçütü olarak elemanların kenar uzunlukları oranı ve kendilerini çevreleyen kürenin yarıçapını kullanmaktadır. Bir eleman için kullanılan en yaygın şekil ölçütü, en boy oranıdır. En boy oranı, bir elemanın en uzun kenar uzunluğu ile en kısa yüksekliği arasındaki orandır. Bu oran, bir dört yüzlünün "yuvarlaklığı" $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ ile $+\infty$ arasında bir değer cinsinden ölçer ve en boy oranı ne kadar küçükse eleman o kadar iyi şekle sahip demektir. TetGen'de kullanılan şekil ölçütleri ise elemanın bir yüzünün iki kenarı arasındaki (yüz açısı-face angle) ve elemanın iki yüzü arasındaki (dihedral angle) açılarıdır. Bu değerlerin birlikte kullanımı en-boy oranıyla aynı ölçütü sağlamaktadır ve bir yüzün kenarları arasındaki açıyı sınırlamak, yarıçap-kenar oranını sınırlamaya eşdeğerdir. Bir dörtyüzlünün (τ) yarıçap-kenar oranı ($\rho(\tau)$), kendini çevreleyen kürenin yarıçapı (R) ile en kısa kenarının uzunluğu (L) arasındaki orandır. θ_{min} , en küçük yüz açısı olmak üzere $\rho(\tau)$ denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$\rho(\tau) = \frac{R}{L} \geq \frac{1}{2 \sin \theta_{min}} \quad (4.1)$$

Düzgün bir dört yüzlünün yarıçap-kenar oranı en az yaklaşık 0.612 değerinde olmalıdır. Oldukça düz bir yapıdaki şerit şekilli dört yüzlüler hariç, yarıçap-kenar oranı büyüdükçe (>2.0) şekil kötüleşmektedir (Şekil 3.4). Şerit şekilli dört yüzlülerde ise küçük kenarlar olmayabilir, ancak hacimleri neredeyse sıfırdır ve bu da elemanın kötü şekilli olduğuna dair bir ölçüttür.



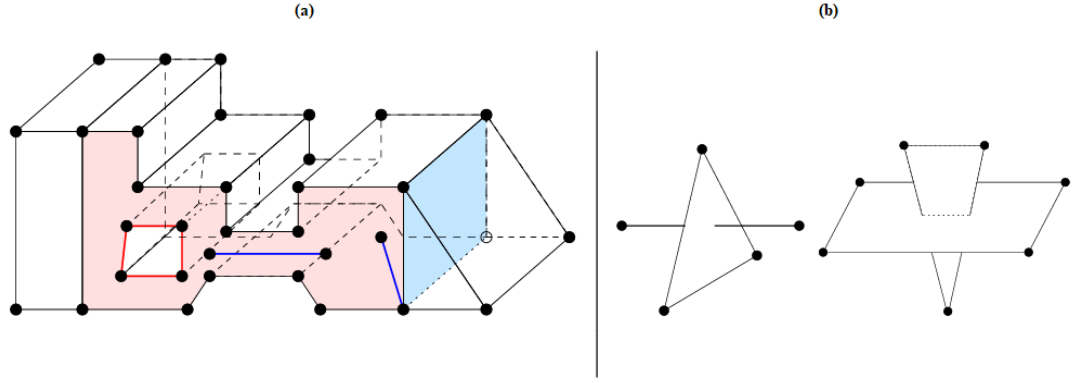
Şekil 3.4 Dört yüzlülerin yarıçap-kenar oranı (R/L). Şerit şekilliler haricinde, kötü şekillendirilmiş dört yüzlülerin çoğu büyük bir yarıçap-kenar oranına sahip olacaktır (c) (Si, 2020)

TetGen (Si, 2004) algoritması, ağ kalitesini kontrol etmek için kullanılabilecek en büyük yarıçap-kenar oranının ve elemanın iki yüzü arasındaki minimum açının kullanıcı tarafından belirlenmesine olanak sağlar. Algoritmada, bu değişkenlerin varsayılan değerleri sırasıyla 2,0 ve 0° 'dir. Bu tez çalışmasında da, yapılan araştırmalar sonucunda R3t algoritmasıyla uygulanan çalışmalarda da yeterince doğru sonuçlar sağlayan 1,2'lik bir yarıçap-kenar oranı seçilmiştir.

TetGen algortimasında ağ tasarlariken ilk olarak 3B bir alanı temsil edecek bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. X olarak tanımlanan bir alan için yapısal ağı oluştururken, “3B parçalı doğrusal kendiyle kesişen bir şekil (Piecewise Linear Complex-PLC)” kullanılır. Bu X alanı içinde, aşağıdaki koşulları sağlayan bir hücre kümesi yapısal ağı oluşturur (Şekil 3.5):

- (1) X'teki her bir hücrenin sınırı, X'teki hücrelerin birleşimidir.
- (2) İki farklı $f, g \in X$ hücresi kesişirse, bunların kesişimi X'teki hücrelerin bir birleşimidir.

3B PLC' nin sınırı, iki veya daha küçük boyutlu hücre kümesidir. Sıfır boyutlu hücre köşe noktası (vertex), iki düğüm noktasından oluşan bir boyutlu eleman “bölünge (segment)” olarak isimlendirilir. En az 3 noktadan oluşan iki boyutlu eleman ise “yüzey (facet)” olarak adlandırılmaktadır. Üç boyutlu bir PLC ise her yüzeyi; sıfır boyutlu köşe noktaları, bir boyutlu bölüngeler ve delikler (hole) içerebilen 2B PLC'lerden oluşur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 a) 3B PLC'nin şematik gösterimi. Pembe renk ile taralı alan, dış bükey olmayan, içinde köşe noktaları (siyah), delik (kırmızı çizgiler ile çerçeveli alan) ve serbest halde bölümler (lacivert çizgiler) barındıran bir yüzeyi göstermektedir. Mavi ile taralı alan ise, iki alt bölgeyi (sub-domain) ayıran bir iç yüzeyi göstermektedir. b) Koşul (1) ve (2)'yi sağlamayan durumlara örnek şematik gösterimler (Si 2020)

TetGen'de, bir 3B PLC, PLC'nin sınır ayrıklaştırılmasıyla tanımlanır. Kenarlar ve yüzeyler hakkında topografik bilgiler (yönelim vb.) gerekmediğinden tanımlanması daha basittir. Sınır tanımı, PLC'nin köşe noktası ve yüzey kümelerini içerir. Yüzeyler, içerdiği çokgen ve delik listeleri ile tanımlanır. Bir yüzeyin her çokgeni, saat yönünde veya tersinde, sıralı köşe noktaları ile tanımlanır. Algoritma ile ilgili daha detaylı bilgi için TetGen kullanıcı el kitabına bakılabilir. Tez kapsamında, TetGen algoritması ile model tasarımı için yazılmış olan MATLAB kodu Ek-1'de yer almaktadır.

4. YAPI JEOFİZİĞİ ARAŞTIRMALARI İÇİN DAÖ YAPAY VERİ UYGULAMALARI

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan TetGen ve R3t algoritmalarının, tezin amacına uygun bir çalışmada kullanılabilirliğinin test edilmesi ve kullanılacak ölçü parametrelerinin (elektrot aralığı, elektrot dizilimi, profil aralığı vb.) belirlenmesi için yapay veri ile yapılan uygulamalara yer verilmiştir. Hem laboratuvar testleri hem de depremlerden sonra sahada yapılan gözlemler, betonarme binalardaki yıkıcı hasarların özellikle kolonlarda ve kiriş-kolon birleşim yerlerinde yoğunlaştığını göstermektedir (Ye ve Qu 2009, Moaveni vd. 2010). Bu nedenle, tez çalışması kapsamındaki yapay veri ve gerçek veri uygulamalarında kullanılacak örnek yapı taşıyıcı sistem elemanı olarak kolon seçilmiştir. Yapay veri uygulamaları için ana hatları gerçek bir kolon yapısı örnek alınarak tasarlanmış üç adet model üretilmiştir. Yapay veri çalışmaları, elektrotların kolonun tek bir yüzeyinde (aynı yüzeyde), komşu yüzeylerinde ve karşılıklı yüzeylerinde yer aldığı elektrot dağılımları için yapılmıştır. İzleyen altbölümlerde yapılan çalışmalar ile ilgili detaylı bilgi, elde edilen modeller ve sonuçlar verilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, aksi belirtilmediği sürece beton öz direnci 100 Ωm , donatı öz direnci 1 Ωm , kırık-çatlak öz direnci 2000 Ωm ve nemli bölge öz direnci 10 Ωm olarak alınmıştır. Daha önce yapılan bazı çalışmalarda yer alan beton, kırık-çatlak yapısı ya da korozyona uğramış (nemlilik içeren) beton öz direnci değerleri aşağıda yer almaktadır (Çizelge 4.1).

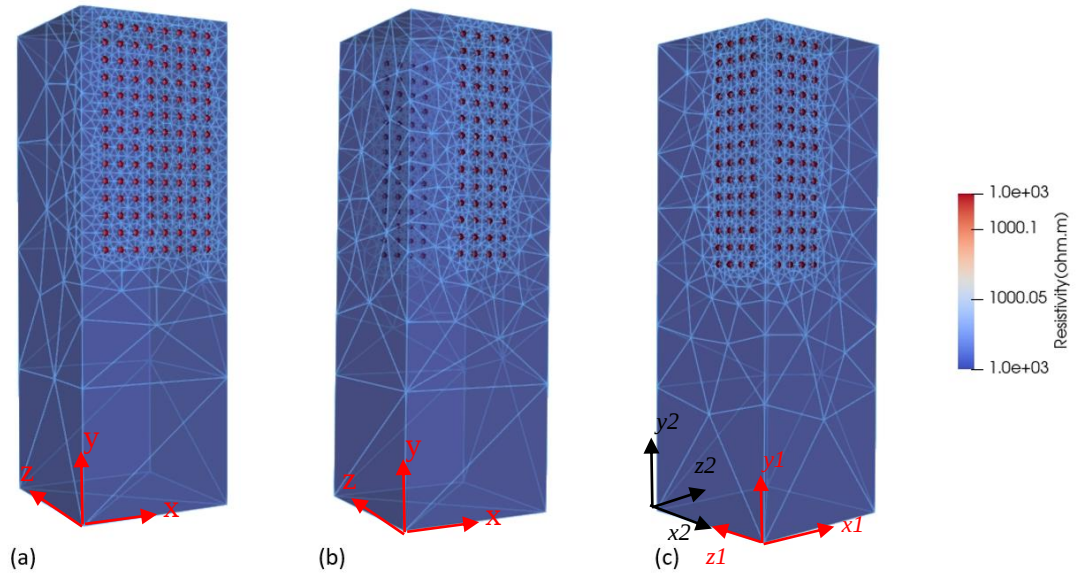
Çizelge 4.1 DAÖ yönteminin uygulandığı bazı çalışmalar ve ek kaynaklardaki beton öz direnç değerleri

	Sağlam Beton (Ωm)	Kırık-çatlak (Ωm)	Korozyon (Ωm)
Broomfield (2011)	-	-	20-5 Ωm
Wiwattanachang and Giao (2011)	65 Ωm	1200-4000 Ωm	-
Reichling vd. 2015	100 Ωm	-	-
Fares vd. (2018)	70 Ωm	-	40-15 Ωm
Alhajj vd. (2019)	100 Ωm	-	-

4.1 Tek Düze Kolon Modeli

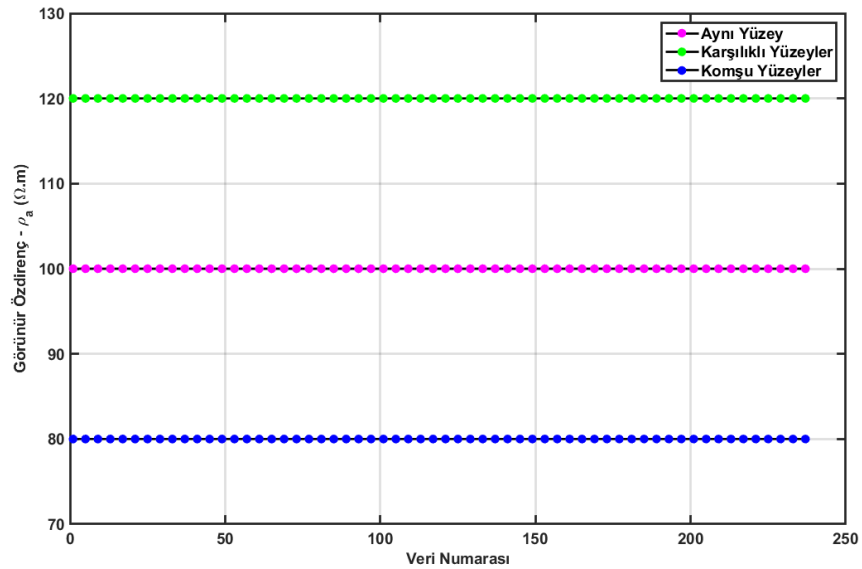
Modelleme çalışmalarında tasarlanan ilk model, tek düze kolon modelidir. Bu model çalışmasının amacı, TetGen’de oluşturulan ağın ve R3t’nin düz çözüm algoritmasının bu tez çalışmasının kapmasına uygunluğunun test edilmesidir. Bu modelleme çalışmasında, “(x*y*z)=(50cm*150cm*50cm)” boyutlarındaki tek düze kolon modeli ile model ağının doğruluğu test edilmiştir. Bölüm 2’de de bahsedildiği gibi, ortamın tekdüze ve yön bağımsız bir özdirenç dağılımını göstermesi durumunda görünür özdirenç (ρ_a) ile ortamın özdirencinin birbirine eşit olması beklenmektedir. Bu bilgi doğrultusunda, üç adet farklı özdirenç değerine sahip tek düze kolon modeli tasarlanmıştır. Bu model kullanılarak DD elektrot dizilimi için R3t algoritması ile düz çözüm yapılmıştır. Elektrotların kolon üzerindeki dağılımları ParaView (Kitware, Inc., 2000) yazılımı (v. 5.11.0) kullanılarak çizdirilmiştir. Bu izimler şekil (4.4)’te, düz çözüm sonuçları ise şekil (4.5)’te gösterilmiştir. Sonuçların kolay izlenebilmesi için her elektrot dağılımı için farklı ortam özdirenci seçilmiştir (Aynı Yüzey: 100 Ω m, Karşılıklı Yüzeyler: 120 Ω m, Komşu Yüzeyler: 80 Ω m).

Bu tez çalışmasına tüm modellerde kolonlarda x, y ve z eksenleri şekil 4.2’ de gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Burada, x-yönü yüzeyde kısa kenarı ve y-yönü bina boyunca uzun kenarı göstermekte ve elektrotların yerleştirildiği yüzey düzlemindeki yönleri temsil etmektedir. z-yönü ise her zaman beton yapının içine doğru olan yönü göstermektedir. Örneğin şekil 4.1.a’ da elektrotların yerleştirildiği yüzey boyunca x ve y yönleri ve derinlik yönü gösterilmiştir. şekil 4.4b’ de karşılıklı yüzeyler için x ve y yönleri her yüzey için ayrı gösterilebilir. Bunlar şekil 4.1.c’ de ise komşu iki yüzeğe elektrot dizilmesi durumunda, bir yüzey için x1 yönü olan diğer yüzey için z2 derinlik olabilir. Bu elektrot yerleşimleri karşılıklı yüzey-yüzey (veya kuyu-kuyu) (şekil 4.1.b) veya komşu yüzey (şekil 4.1.c)  l  düzeneği şeklinde de isimlendirilebilir.



Şekil 4.1 (a) Aynı yüzeyde, (b) Karşılıklı yüzeylerde (Ön-Arka), (c) Komşu yüzeylerde (Sol-Ön).

Düz çözüm sonucunda elde edilen ρ_a değerlerinin, kolonlara atanmış olan ρ değerleriyle aynı olması, kullanılan algoritmaların bu tez çalışması için uygunluğunu ve model ağının doğruluğunu kanıtlamıştır (Şekil 4.2).



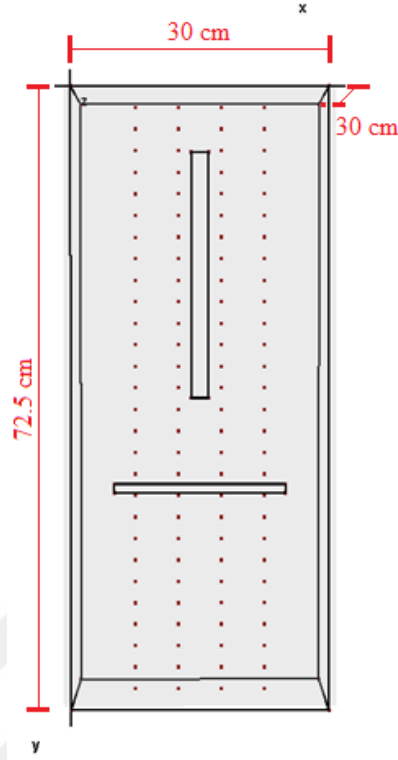
Şekil 4.2 Tek düze kolon modeli için farklı elektrot dağılımları ile elde edilen düz çözüm sonuçları

4.2 Basit Kolon Modeli

Bu alt bölümde, R3t algoritmasının ters çözümde kullandığı bazı değişkenlerin sonuçları nasıl etkilediğini incelemek için kullanılan basit kolon modeli ve R3t girdi dosyaları anlatılmıştır. Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve belirlenen ters çözüm değişkenleri hem gerçeğe yakın bir kolon modelinin yapay veri uygulamasında hem de bir yapı elemanı üzerinde yapılacak veri toplama çalışmalarında kullanılmıştır.

Basit kolon modeli, gerçek veri ile yapılan çalışmalarda kullanılan elektrot aralığı, profil aralığı gibi saha parametrelerine uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Kolon modelinin boyutları x, y ve z yönünde sırasıyla 30 cm, 72,5 cm ve 30 cm olarak seçilmiştir (Şekil 4.3). Modelin içerisine, boyuna ve enine donatıları temsilen iki adet yapı yerleştirilmiştir. Düşey yöndeki yapı, x yönünde 14-16 cm, y yönünde 7.5-36.25 cm aralığında ve z yönünde 2.2-4.2 cm aralığında yer almaktadır (2 x 29.25 x 2 cm). Yatay yöndeki yapı ise x yönünde 2.5-5 cm, y yönünde 46.25-47.25 cm ve z yönünde 1-2 cm aralığında yer almaktadır (2.5 x 1 x 1 cm).

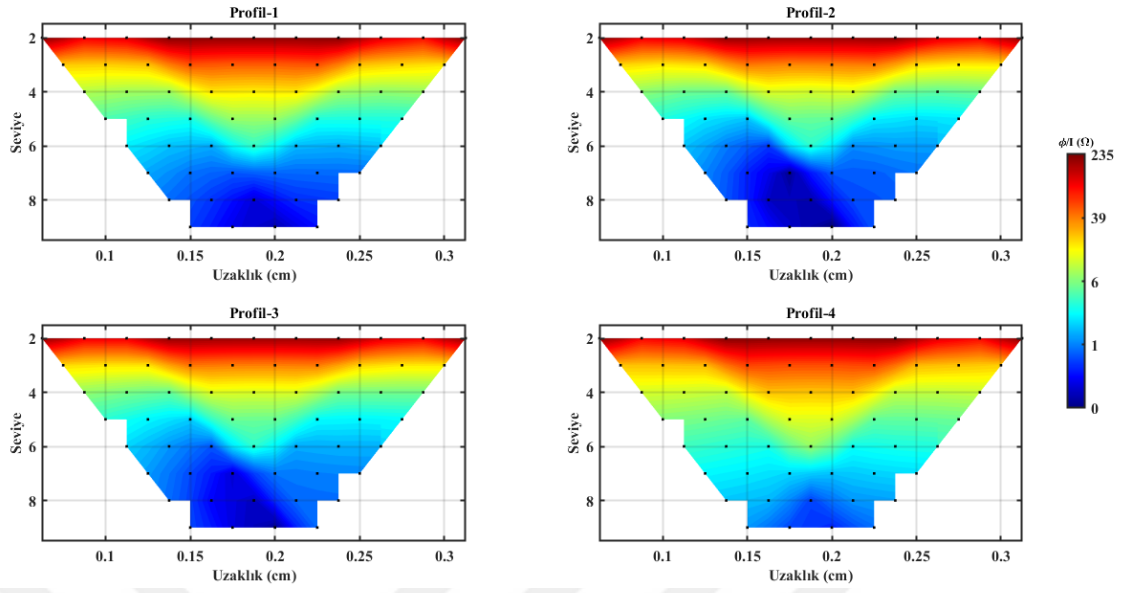
Kolon modelinin öz direnci 100 ohm.m olarak seçilmiştir. Kolon içerisindeki donatı yapılarının öz direnci ise 1 ohm.m'dir. Demir donatıyı temsil eden bu iki iletken yapıyı içeren kolona ait model Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Oluşturulan basit kolon modelinin TetGen (Si 2020) ile şematik gösterimi (Kırmızı noktalar elektrotları temsil etmektedir)

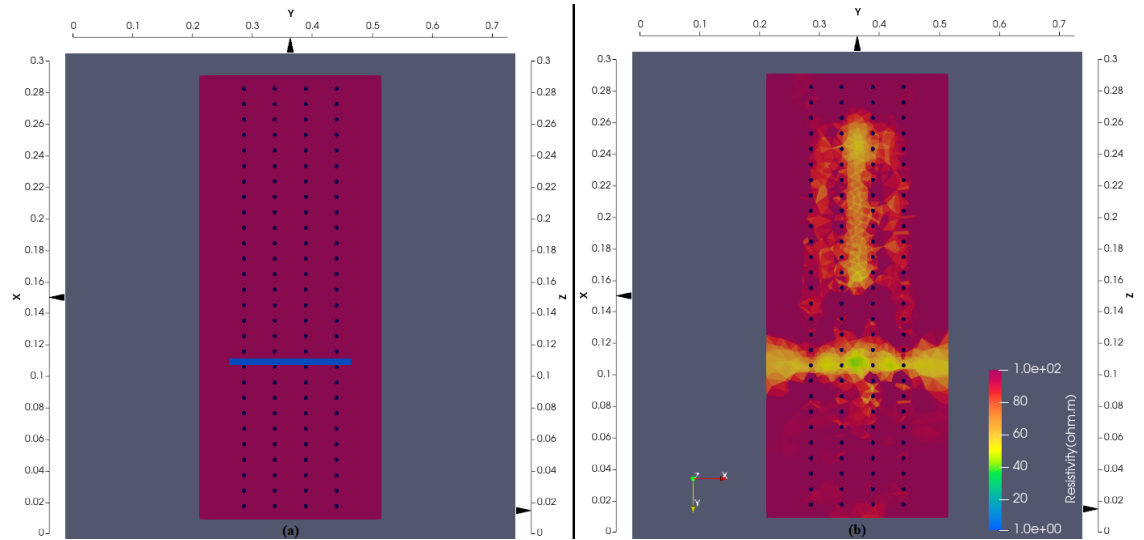
R3t düz çözüm algoritması üç adet girdi dosyasına ihtiyaç duymaktadır. Bu dosyalar, içeriğindeki birkaç değişiklik ile ters çözüm algoritması için de aynı isimler ile kullanılmaktadır.

Oluşturulan model ağı için gerekli girdi dosyaları hazırlanmış ve R3t düz çözüm algoritması ile yapay veri olarak kullanılacak görünür öz direnç değerleri hesaplanmıştır. Yapay veri, tek yüzeyde bulunan 4 doğrultu için 28'er adet (toplam 112 adet) elektrot için DD elektrot dizilimi kullanılarak elde edilmiştir. 2.5 cm elektrot aralığı ve 5 cm profil aralığı için 8 seviyede ($n=1,2,3,\dots,8$) veri üretilmiştir. Elde edilen direnç değerlerine ait yapma kesitler şekil 4.4'te verilmiştir.

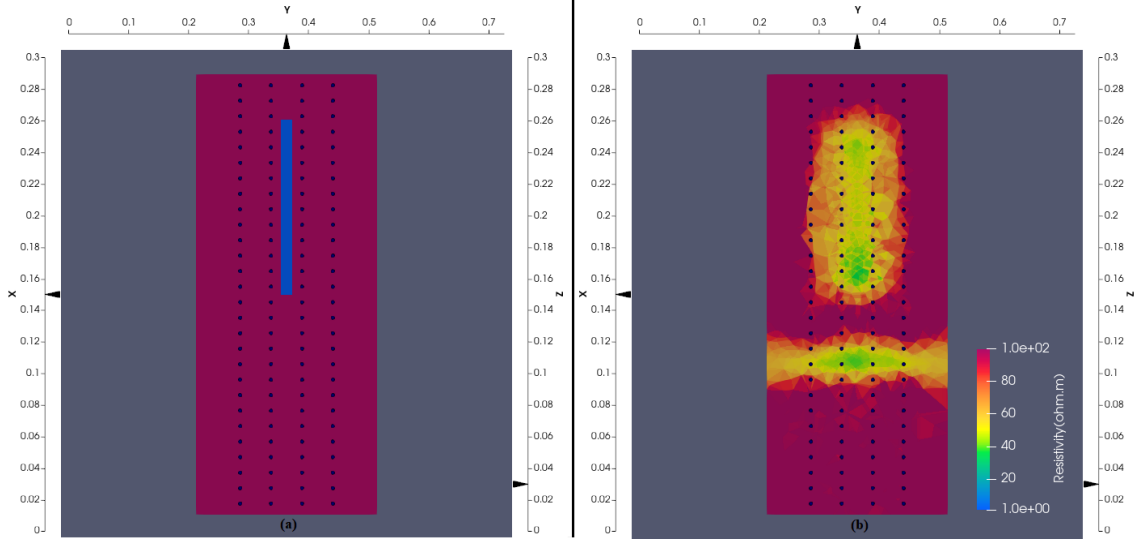


Şekil 4.4 Basit kolon modeli için düz çözüm sonucu elde edilen her profile ait direnç kesitleri

Ters çözüm öncesinde, elde edilen direnç değerlerine %3 oranında normal dağılımlı rastgele gürültü eklenmiştir. Bu verinin ters çözüm sonucu elde edilen 3B öz direnç modelinin farklı derinliklerinden alınmış kesitler şekil 4.5 ve şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5 (a) Basit kolon modelinin (b) 3B öz direnç modelinin $z=1.8$ cm için xy kesiti

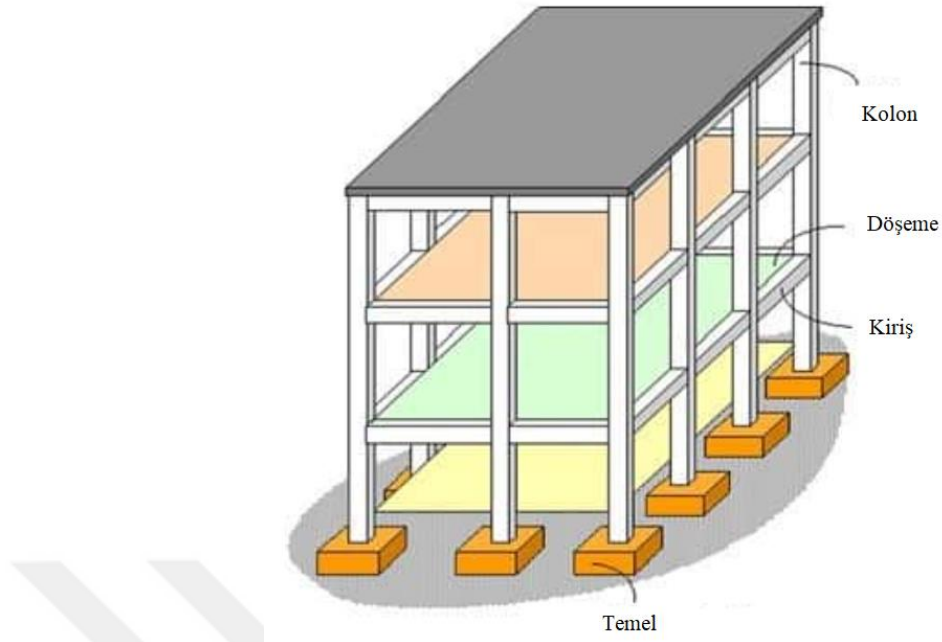


Şekil 4.6 (a) Basit kolon modelinin (b) 3B özdirenç modelinin $z=3$ cm için xy kesiti

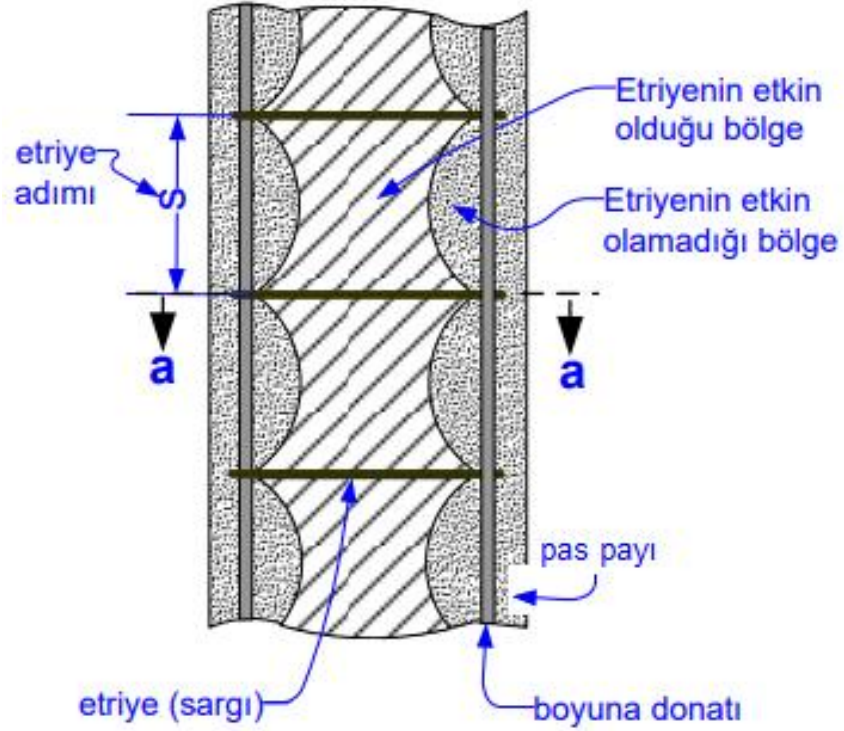
4.3 Karmaşık Modeli

Bu alt bölümde, sırasıyla model tasarımı, tasarlanan model ile yapılan modelleme çalışmaları ve incelenmek istenen elektrot dizilimleri ve dağılımlarına ait yapay veri ile ters çözüm uygulamaları anlatılmaktadır. Model tasarımı ile ilgili aktarılabilecek bilgilerin daha net anlaşılması adına, kullanılacak inşaat mühendisliği terimleri de yine bu bölümde yer almaktadır.

Betonarme yapı, beton ve çeliğin birlikte kullanımı ile ortak bir direnç elde ederek güçlendirilmiş yapı türüdür. Betonarme taşıyıcı yapı elemanları, temel, kolon, kiriş ve döşemelerdir (Şekil 4.7). Beton, basınç gerilmelerine karşı dayanıklıdır ancak çekme kuvvetlerine karşı dayanıklı değildir. Bu nedenle, betonun içerisine, çekme kuvvetlerini karşılamak için boyuna donatılar, kesme kuvvetlerini karşılamak içinse enine donatılar (etriye) yerleştirilir (Topçu 2022) (Şekil 4.8). Çelik, paslanmadan korunması amacıyla betonun içine gömülür ve betonun dış yüzü ile çeliğin arasındaki mesafeye de pas payı denir (Şekil 4.8).



Şekil 4.7 Betonarme yapı taşıyıcı elemanlarının şematik gösterimi (Namita, 2022 <https://civildigital.com/major-parts-reinforced-concrete-buildings-framed-structures/>)



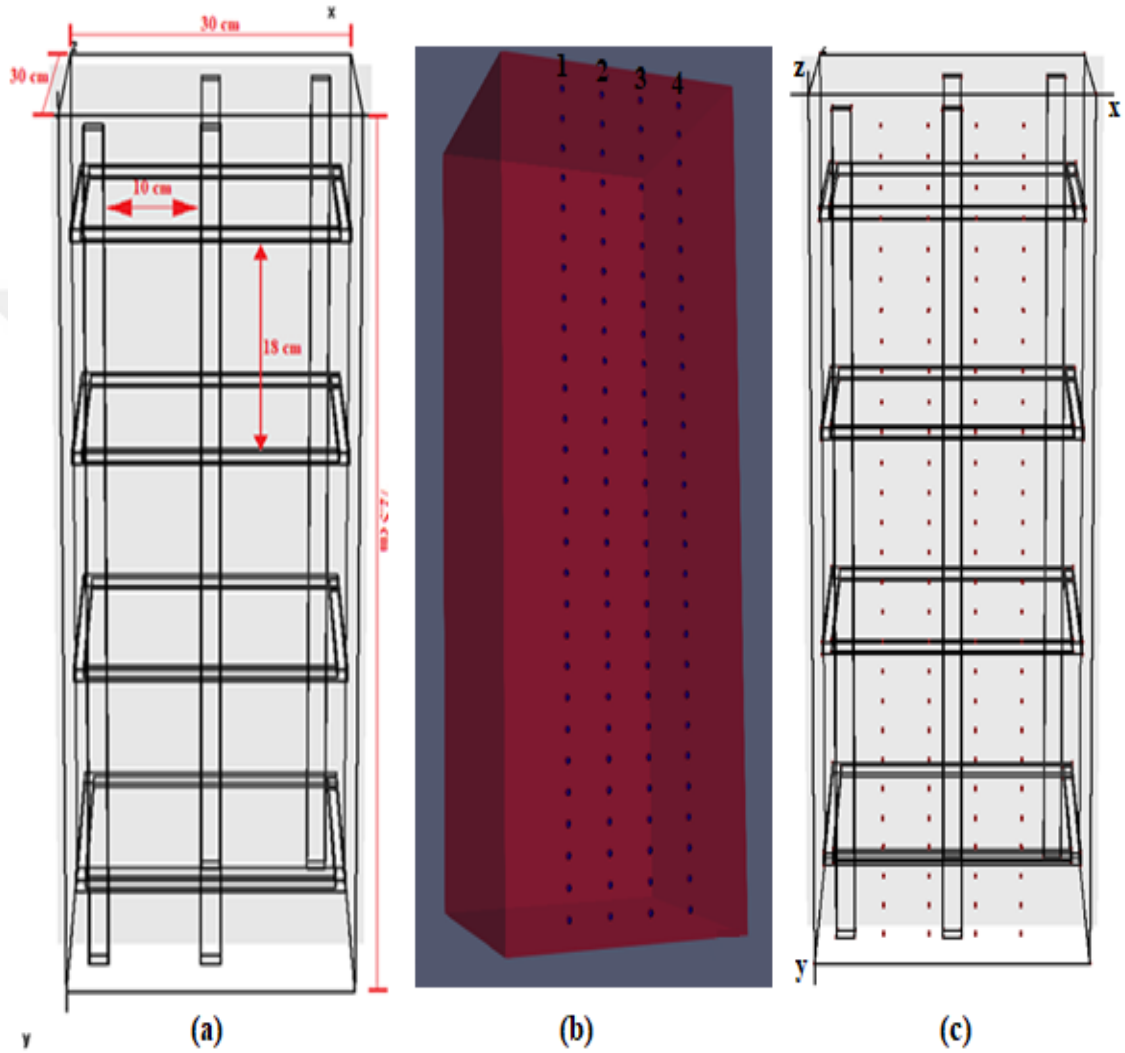
Şekil 4.8 Beton içerisine yerleştirilen donatıların şematik gösterimi (Topçu, 2022)

Yapay veri uygulamaları için kullanılan ikinci model; gerçek kolon modeline daha yakın olması açısından içerisine boyuna donatı ve etriyeleri temsil eden yapılar yerleştirilerek tasarlanmıştır. Oluşturulan model, betonarme yapı elemanları ve yapıların, kullanım amaç ve süresine uygun güvenlikte tasarlanması, hesaplanması, boyutlandırılması ve yapımı ile ilgili kural ve koşulları kapsayan TS 500'e (2000) dikkat edilerek tasarlanmıştır. Buna ek olarak, yeni yapılacak binaların deprem etkisi altında tasarımı ile mevcut binaların değerlendirilmesi ve güçlendirme tasarımı için uygulanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) de model tasarımı öncesinde incelenmiştir. TS 500 (2000) ve TBDY'ne (2018) göre, kolon tasarımında dikkat edilmesi gereken koşullar aşağıdaki gibidir.

- Kolonlarda boyuna donatı, enine donatı ile sarılarak rijit bir sistem meydana getirilmelidir (TS 500 2000).
- Dikdörtgen kesitli kolonlarda kesit genişliği TS500'e (2000) göre 250 mm'den az, TBDY'ne (2018) göre ise 300 mm'den az olamaz. Dairesel kolonların çapı 350 mm'den küçük olamaz (TBDY 2018).
- Kolonlarda net beton örtüsü (pas payı), dıştaki elemanlarda 25 mm den, içteki elemanlarda 20 mm den az olamaz (TS 500 2000).
- Etriye kolonlarda her dış köşede en az bir boyuna donatı bulundurulmalıdır ve 14 mm'den daha ince donatı kullanılmamalıdır. Kolonlarda boyuna donatı alanı, brüt kesitin %1'inden az, %4'ünden daha büyük olmayacaktır (TBDY 2018, TS 500 2000).
- Kolon boyuna donatısı, kolon yüksekliği boyunca enine donatı ile sarılır. Enine donatı çapı, en büyük boyuna donatı çapının üçte birinden az olamaz. Uygulamalarda 32 mm'ye kadar olan boyuna donatı çapına karşılık, minimum etriye çapı 100 mm olarak alınmaktadır (TS 500 2000).
- Etriye adımı, en küçük boyuna çubuk çapının 12 katından ve 200 mm den fazla olamaz. Dikdörtgen kesitli kolonlarda, etriye veya aynı aralıkta çirozla tutulmuş olan boyuna donatı çubukları arasındaki uzaklık 300 mm den fazla olamaz (TS 500 2000).

Bu bilgiler doğrultusunda, boyutları yine x, y ve z yönünde sırasıyla 30 cm, 72.5 cm ve 30 cm olan bir kolon modeli tasarlanmıştır (Şekil 4.9). Kolon modelinin (100 ohm.m)

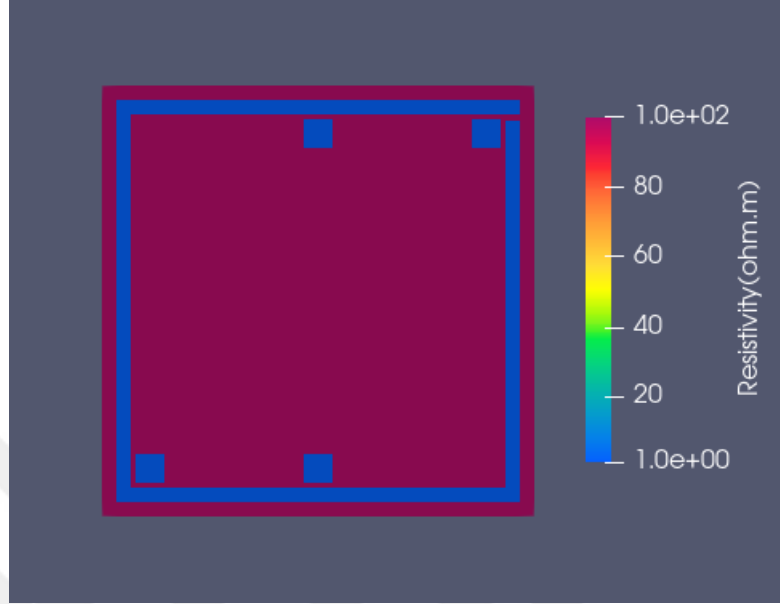
içerisine, dört adet boyuna donatı (1 ohm.m) ve dört adet etriye (1 ohm.m) yapısı yerleştirilmiştir Etriye, hem x hem de z yönünde yüzeyden 1 cm derinde, boyuna donatılar ise yine aynı yönlerde yüzeyden 2 cm derinde yer almaktadır. Etriyelerin y yönündeki derinliği 9.25 cm, boyuna donatıların y yönündeki derinliği ise 1.5 cm'dir.



Şekil 4.9 (a) Etriye ve boyuna donatıların, kolon modeli içerisindeki dağılımının şematik gösterimi (b) Elektrotların tek yüzeydeki dağılımın kolon modeli üzerinde (1,2,3,4: Profil numaraları) (c) model içerisindeki yapılar üzerinde gösterimi (elektrot aralığı 2.5 cm, profil aralığı 5 cm)

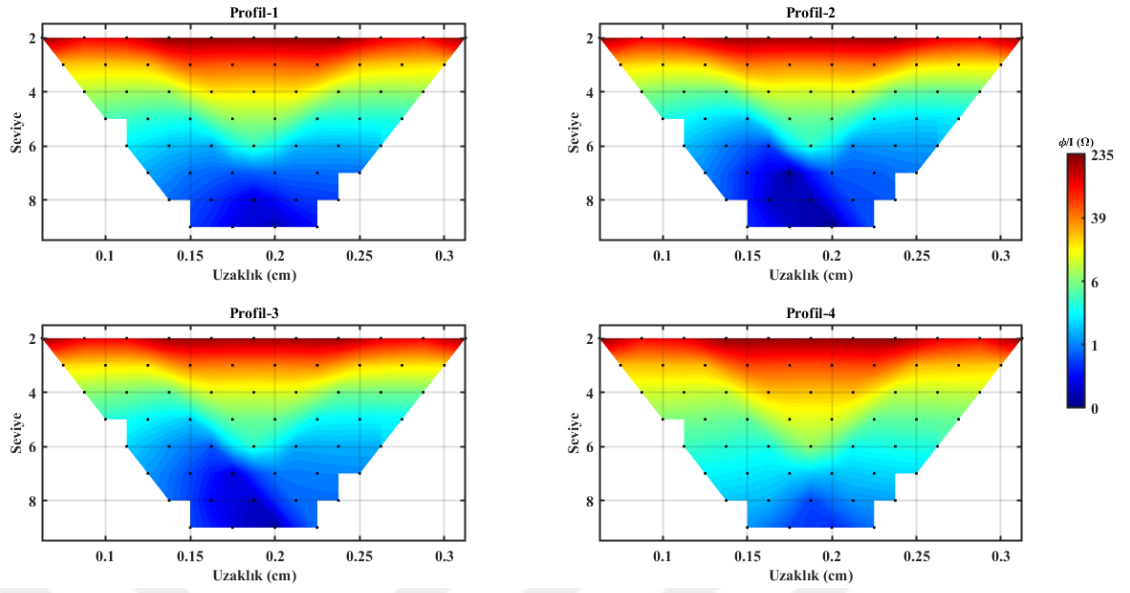
Normal şartlarda, boyuna donatıların kolonun her köşesinde bulunması gerekirken bu modelde sağ ön ve sol arka köşeler incelenmek istenen farklı durumlar için bilerek boş

bırakılmıştır. Enine ve boyuna donatıların kolon modeli içerisindeki dağılımının düşey yönde alınmış bir kesiti şekil 4.10’da yer almaktadır.



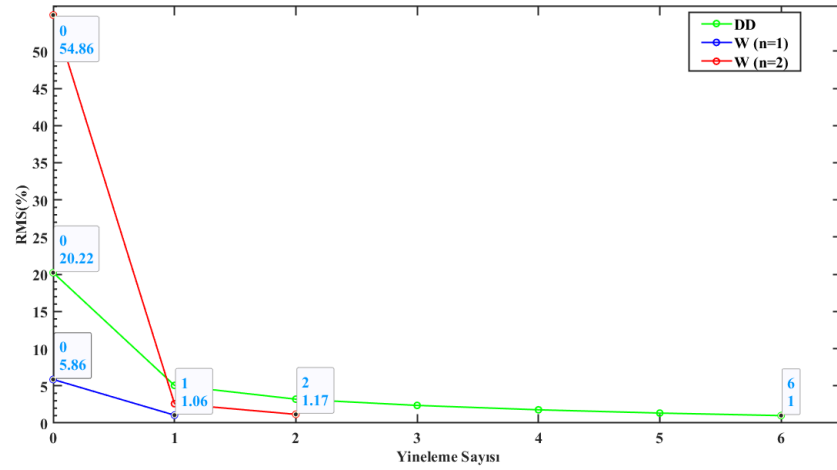
Şekil 4.10 Kolon modelinin y=9.5 cm derinlik için xz kesiti (Mavi bölge: beton (100 ohm.m)
Kırmızı bölge: Boyuna donatılar ve etriye (1 ohm.m))

Hazırlanan bu model ile tek yüzeyde konumlandırılmış elektrotların DD ve W elektrot dizilimleri için ortaya çıkardığı sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elektrotların model üzerindeki dağılımı şekil 4.9 (c)’de gösterilmiştir. Elektrotların şekildeki konumlar için, y yönünde DD elektrot dizilimi ile n=8 seviye, W elektrot dizilimi ile ise n=1 ve 2 seviye için veri üretilmiştir. DD elektrot dizilimi için üretilen gürültüsüz verilere ait direnç kesitleri şekil 4.11’de verilmiştir.



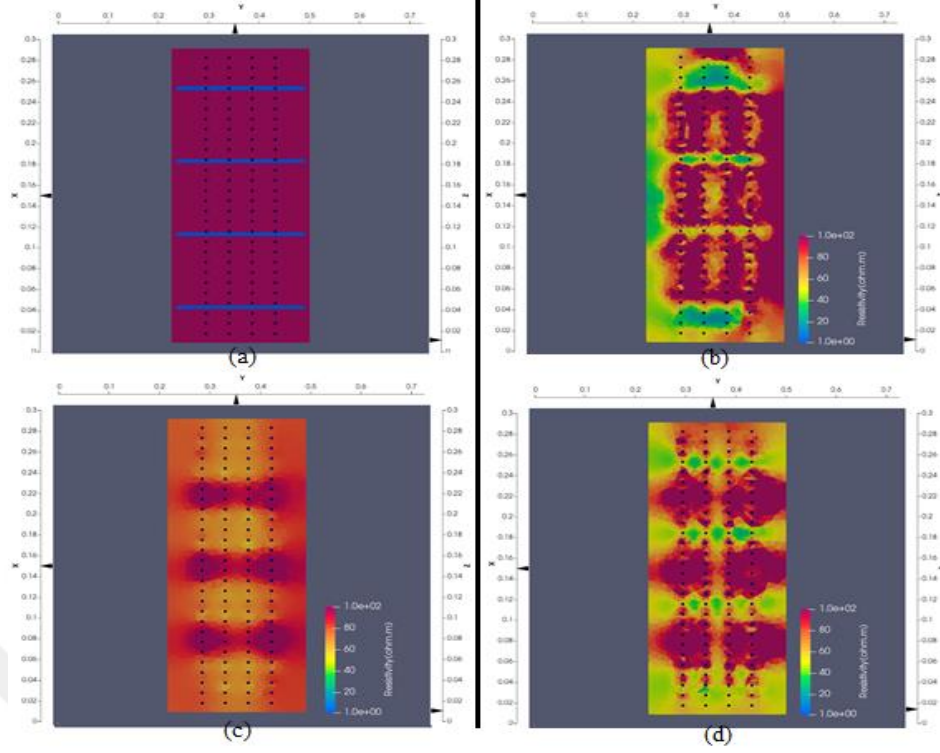
Şekil 4.11 DD (n=1,2,...,8) elektrot dizilimi için üretilen verilerin, her profile ait direnç kesitleri

Ters çözüm öncesi, verilere %3 oranında normal dağılımlı gürültü eklenmiştir. Bütün dizilimler için her yinelemeye ait son RMS değeri şekil 4.12’de verilmiştir.

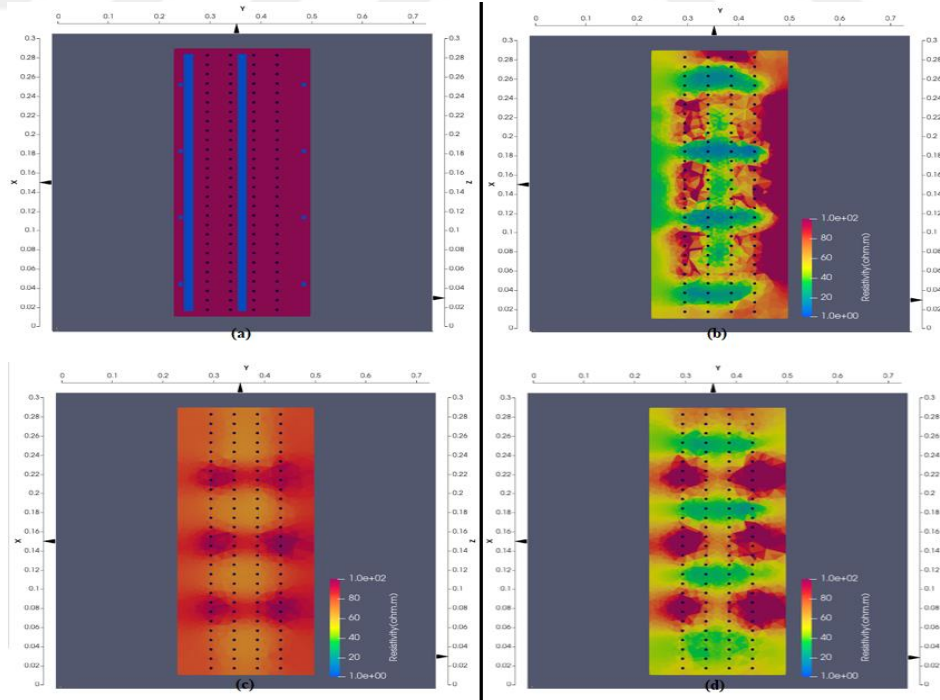


Şekil 4.12 Kullanılan elektrot dizilimleri için her ters çözüm yineleme adımına ait RMS değerlerinin grafik üzerinde gösterimi

DD, W (n=1) ve W (n=1,2) için elde edilen 3B öz direnç modellerinden farklı derinliklerden alınmış xy kesitleri sırasıyla şekil 4.13 ve 4.14’te yer almaktadır.

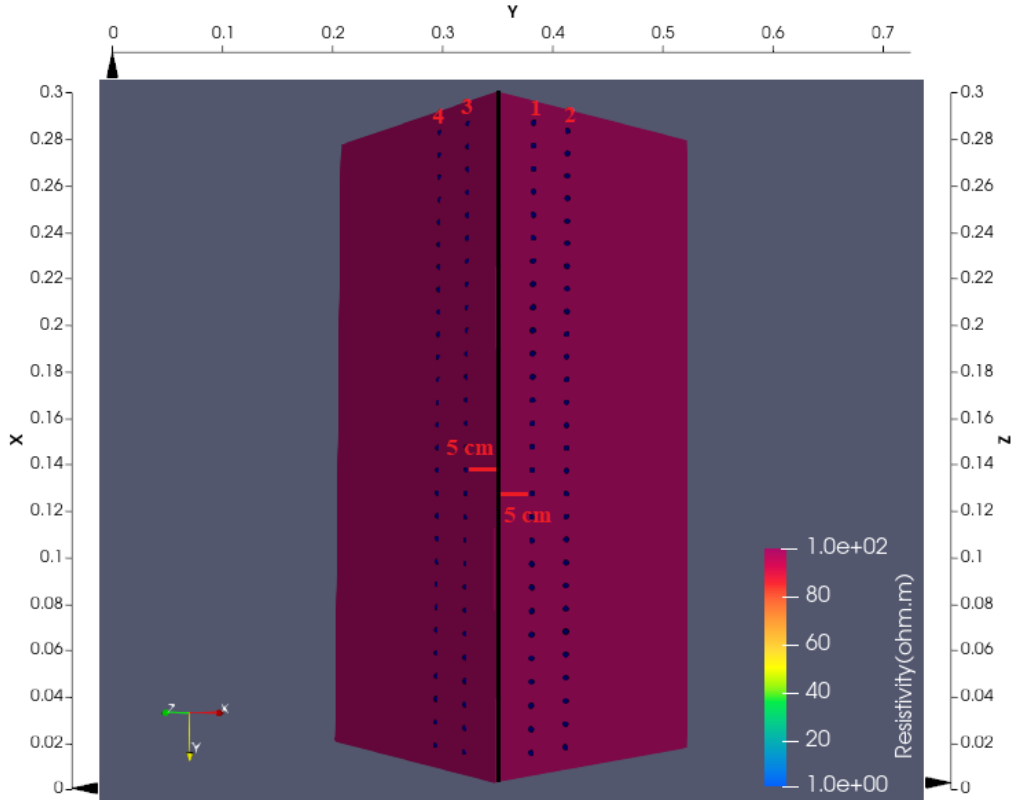


Şekil 4.13 $z=1$ cm derinlik için xy-özdirenç kesitleri: (a) gerçek model (b) DD dizilimi 3B ters çözüm sonucu (c) W ($n=1$ seviye) dizilimi 3B ters çözüm sonucu, (d) W ($n=1$ ve 2 seviyesi için) dizilimi 3B ters çözüm sonucu



Şekil 4.14 $z=3$ cm derinlik için xy-özdirenç kesitleri: (a) gerçek model (b) DD dizilimi 3B ters çözüm sonucu (c) W ($n=1$ seviye) dizilimi 3B ters çözüm sonucu, (d) W ($n=1$ ve 2 seviyesi için) dizilimi 3B ters çözüm sonucu

Şekil 4.13 (b) ve şekil 4.14 (b)'ye bakıldığında, model içerisinde yer alan enine ve boyuna donatı konumlarının x ve y yönünde gerçek model ile uyumlu olduğu görülmektedir. Dördüncü profilin sağında kalan tarafta yüksek, birinci profilin solunda kalan tarafta ise düşük öz direnç dağılımının olması, her ne kadar elektrotların bulunduğu konumların dışında da kalsa sol ön köşede yer alan donatının ölçüleri etkilediğini açıkça göstermektedir. Şekil 4.13 (c,d) ve 4.14 (c,d)'ye bakıldığında ise $n=1$ seviye için donatıların etkisi çok gözlemlenemezken, $n=2$ seviyesinde boyuna donatının varlığı daha net gözlemlenebilmektedir. Bu durum, W elektrot diziliminin düşey ayrırlılığının yüksekliğini kanıtlar niteliktedir (Candansayar, 2016).



Şekil 4.15 Siyah çizgi ön ve sol yüzeylerin kesişim kenarı olmak üzere kenardan x yönünde 5 cm uzaklığa yerleştirilmiş ön yüzeydeki ve kenardan z yönünde 5 cm uzaklığa yerleştirilmiş yan (sol) yüzeydeki elektrotların model üzerindeki gösterimi (1,2,3,4: profil numaraları)

Elektrotların, kolon modelinin tek yüzeyinde yer aldığı çalışmalara ek olarak komşu (ön ve sol) ve karşılıklı (ön ve arka) yüzeylerinde yer aldığı durumlar için de modelleme ve

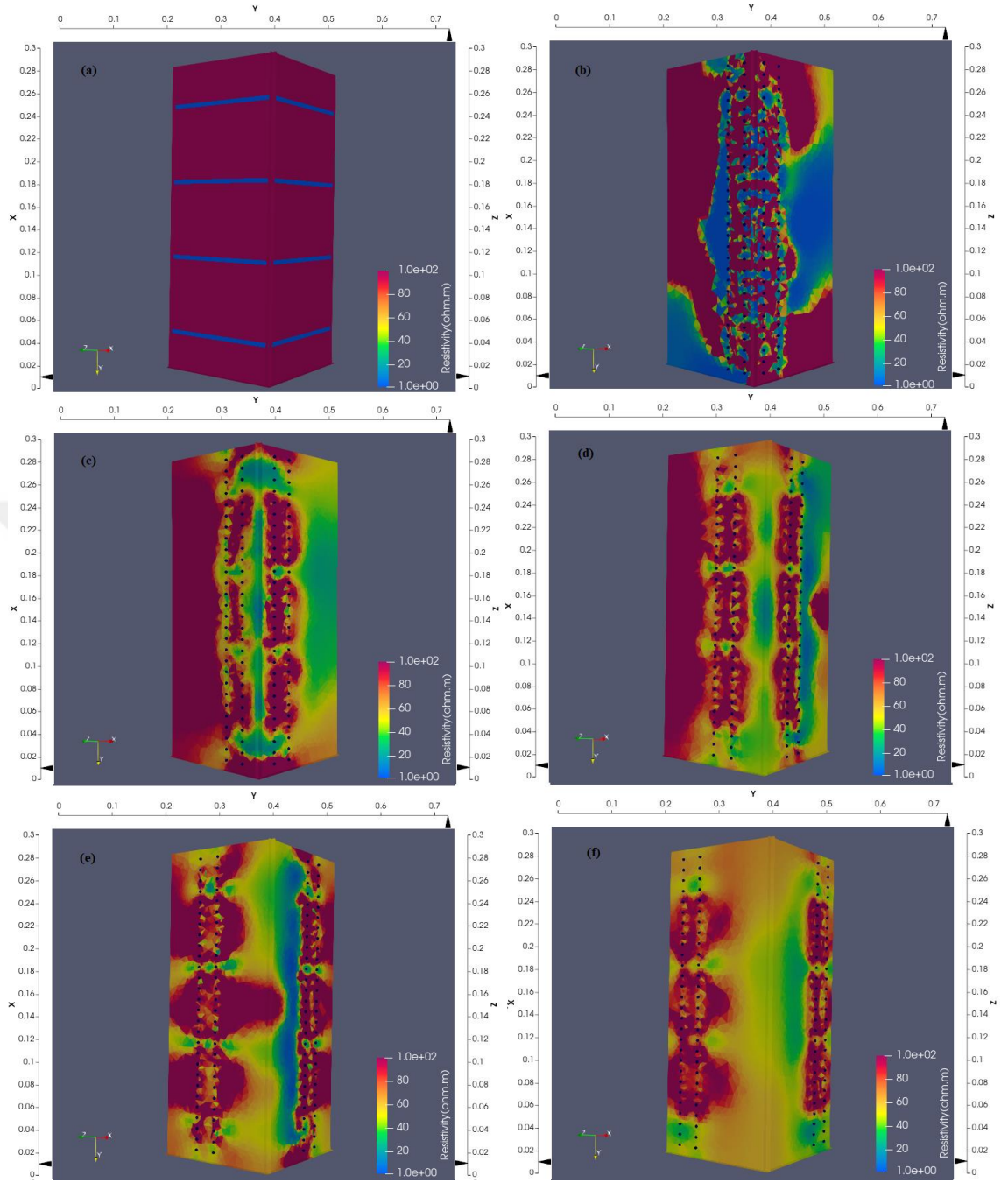
ters çözüm çalışmaları yapılmıştır. İlk olarak komşu yüzeylerde bulunan elektrotların farklı konumlandırmaları için DD dizilimi ile 8 seviye veri üretilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elektrotların, kolon modeli üzerindeki örnek bir dağılımı şekil 4.15’te verilmiştir.

Komşu yüzeyde, DD elektrot dizilimi ile yapılan çalışmalarda elektrotların ön ve sol yan yüzeyin kesişim kenarından 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15 ve 20 cm uzaklığa yerleştirildiği durumlar incelenmiştir. Tüm incelemeler için elde edilen bulgular, Çizelge 4.2’de verilmiştir.

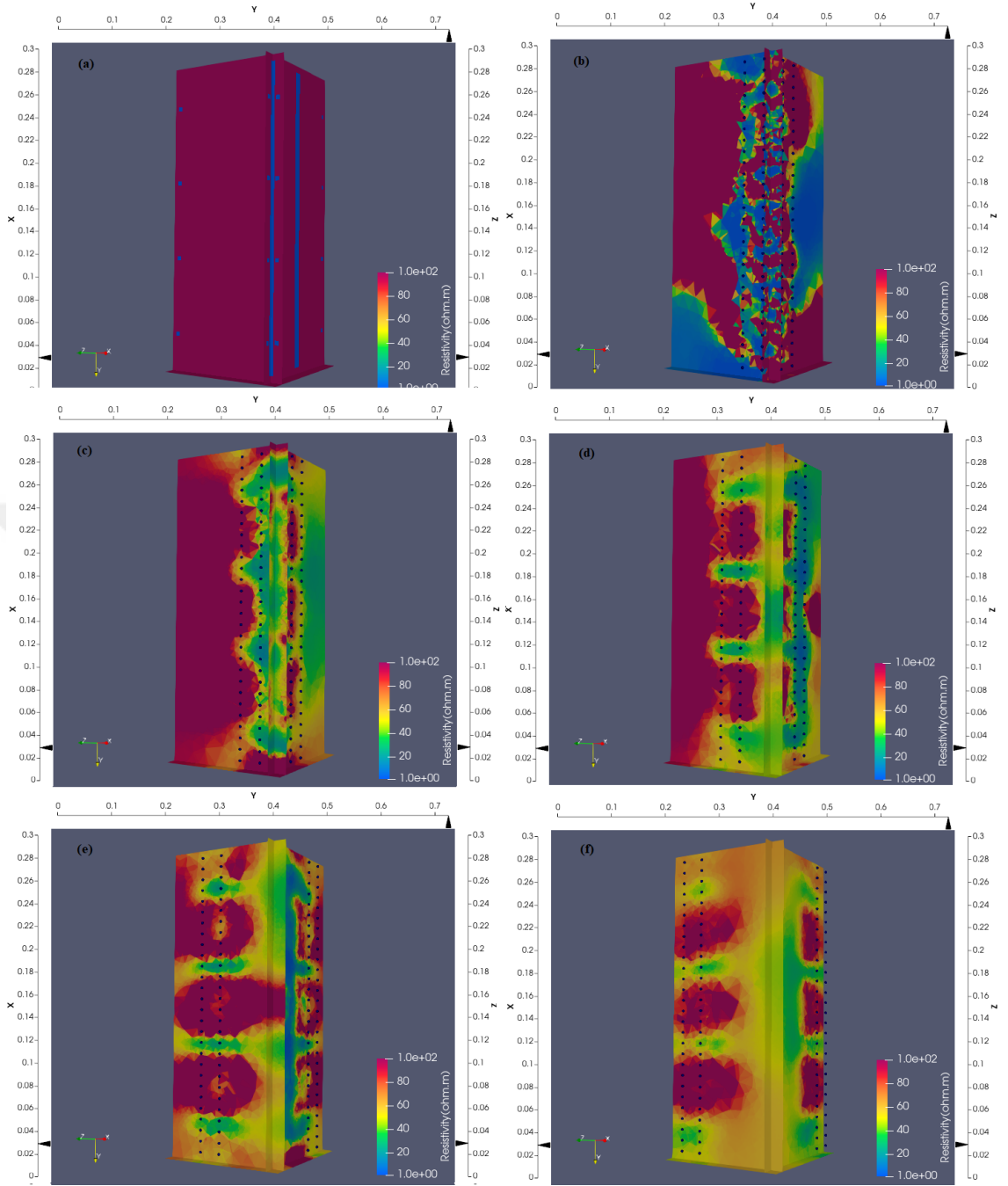
Çizelge 4.2 Elektrotların ön ve yan (sol) yüzeyin kesişim kenarından farklı uzaklıktaki konumları için elde edilen ters çözüm bulguları

Elektrotların kenardan uzaklığı	Yineleme Sayısı	Son RMS değeri
3	6	5.4
4	5	2.23
5	9	1.2
7	3	1.23
9	5	0.95
11	5	1
13	5	1.12
15	5	1.17
20	6	1.12

Elektrotların, 3, 5, 9, 15 ve 20 cm uzaklıkta konumlandırıldığı senaryolar için elde edilen 3B öz direnç modelinin x ve z yönünde farklı derinliklerden alınmış kesitleri gerçek model ile karşılaştırmalı olarak şekil 4.16 ve 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.16 (a) Kolon modelinden ve elektrotların kenardan (b) 3 cm (c) 5 cm (d) 9 cm (e) 15 cm (f) 20 cm uzaklıktaki durumları için elde edilen 3B öz direnç modellerinden $x=1$ cm ve $z=1$ cm'den alınmış kesitler

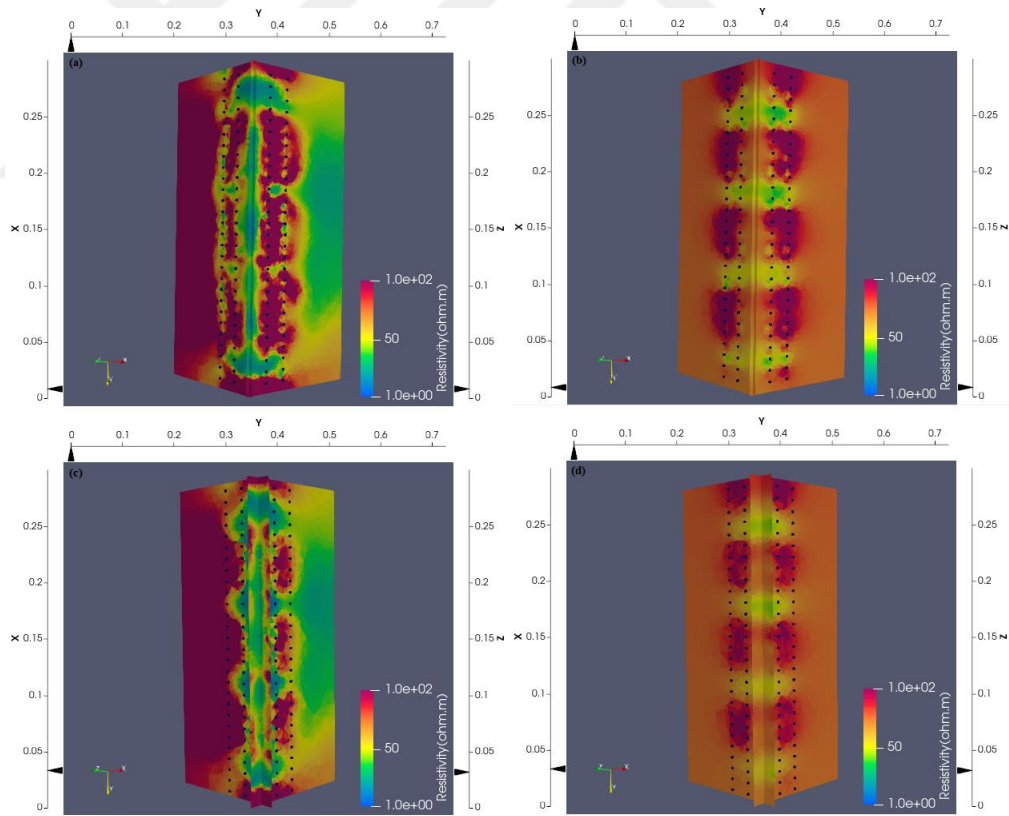


Şekil 4.17 (a) kolon modelinden ve elektrotların kenardan (b) 3 cm (c) 5 cm (d) 9 cm (e) 15 cm (f) 20 cm uzaklıktaki durumları için elde edilen 3B özdirenç modellerinden $x=3$ cm ve $z=3$ cm'den alınmış kesitler

Ters çözüm sonuçlarından da görüldüğü üzere profillerin ön ve yan (sol) yüzeyin kesişimine olan uzaklığının 5 cm'den az olması durumunda yakınsama sağlanamamış ve elde edilen 3B özdirenç modelleri ile gerçek model arasında bir benzerlik gözlemlenememiştir. 5 cm ve daha fazla olan uzaklıklar için yakınsama sağlanmış ve

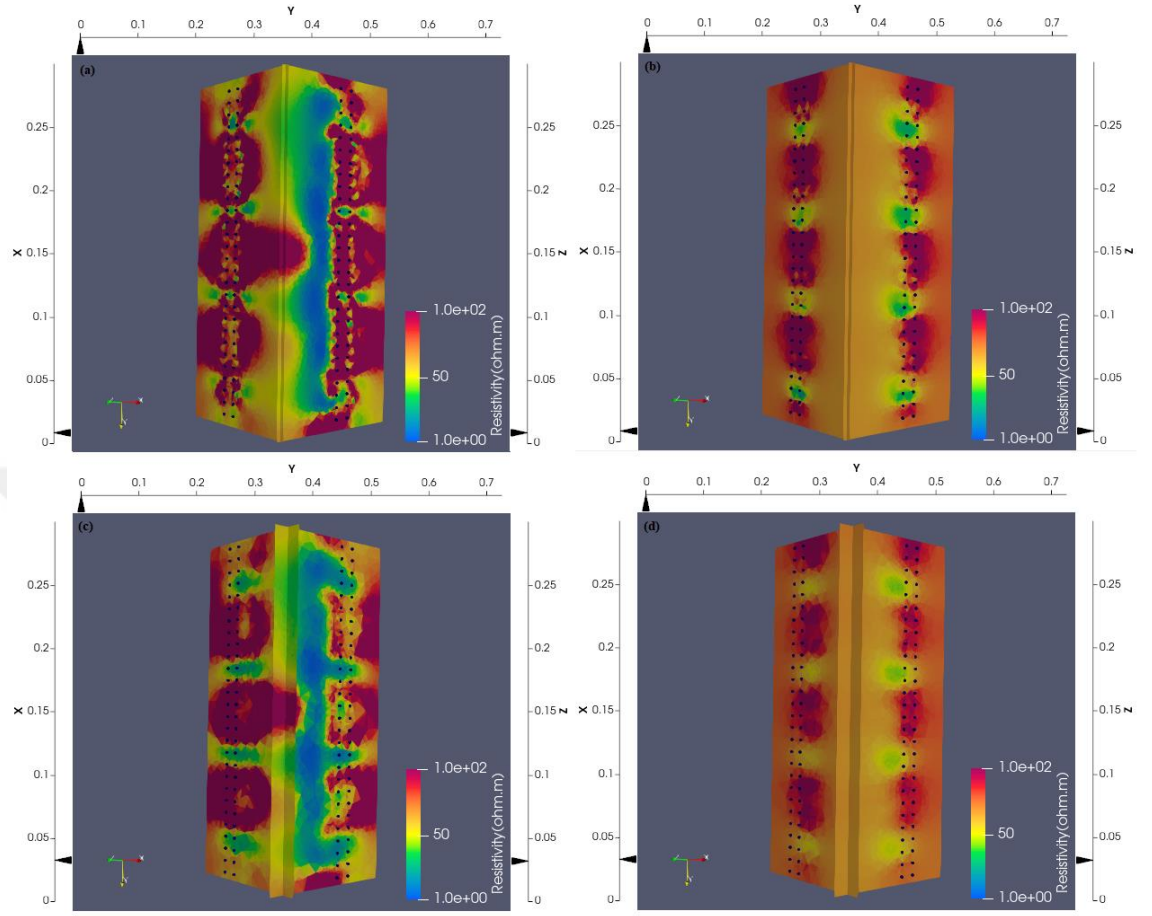
RMS değerleri de hedeflenen aralığın içerisinde kalmıştır. Bu uzaklıklar için elde edilen 3B zdiren modelleri gerçek model ile benzerlik göstermekte ve farklı konumlardaki yapıların dağılımını modelle uyumlu bir şekilde ortaya koymaktadır.

Bu çalışmaların yanı sıra, kuyu içi DA lmnden esinlenilerek farklı iki yüzeyde yer alan profillerin birer kuyu gibi düşünüldüğü durumlar için de incelemeler yapılmıştır. Yapılan incelemelerde Demirel ve Candansayar'ın (2017) nerdiği pol-tripol (PT, A-BMN) elektrot dizilimi kullanılmış ve bu dizilim için üretilen örnek 'protocol.dat' dosyasının bir kısmı **EK3**'te verilmiştir. PT dizilimi ile elektrotların hem komşu hem de karşılıklı yüzeylerde dağılım gösterdiği durumlar incelenmiştir. Komşu yüzeylerde dağılım gösteren elektrotlar için yapılan çalışmalarda profillerin n ve yan (sol) yüzeylerin keşişim kenarından uzaklığı DD elektrot dizilimi için elde edilen sonuçlarla da karşılaştırılabilir olması için 5, 15 ve 20 cm olarak seçilmiştir.

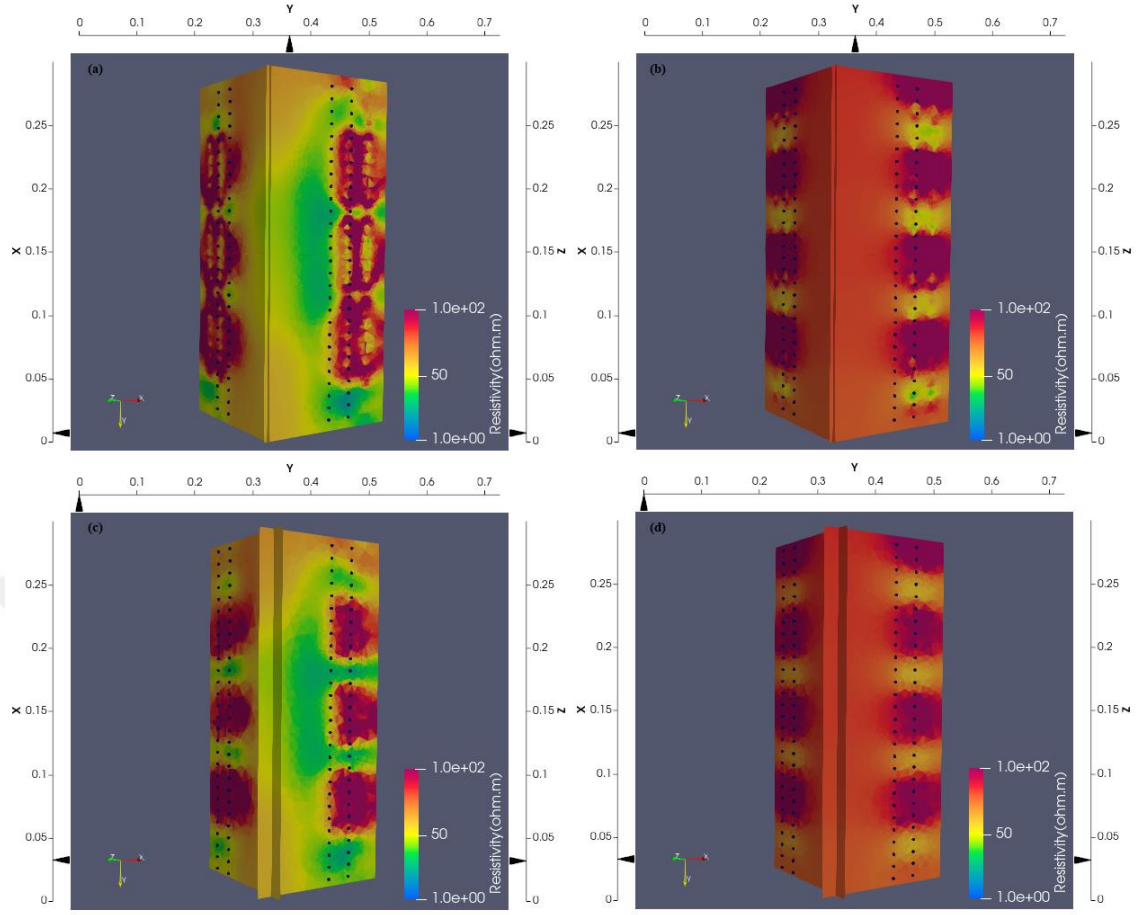


şekil 4.18 Elektrotların kenardan 5 cm uzakta olduğu durumda elde edilen 3B zdiren modellerinden (a) Dipol- Dipol (b) PT dizilimleri için $x = 1$ cm ve $z = 1$ cm'den (c) DD (d) PT dizilimleri için $x = 3$ cm ve $z = 3$ cm'den alınmış kesitler

Elde edilen 3B öz direnç modelleri, DD dizilimi için elde edilenlerle karşılaştırmalı olarak şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de verilmiştir.

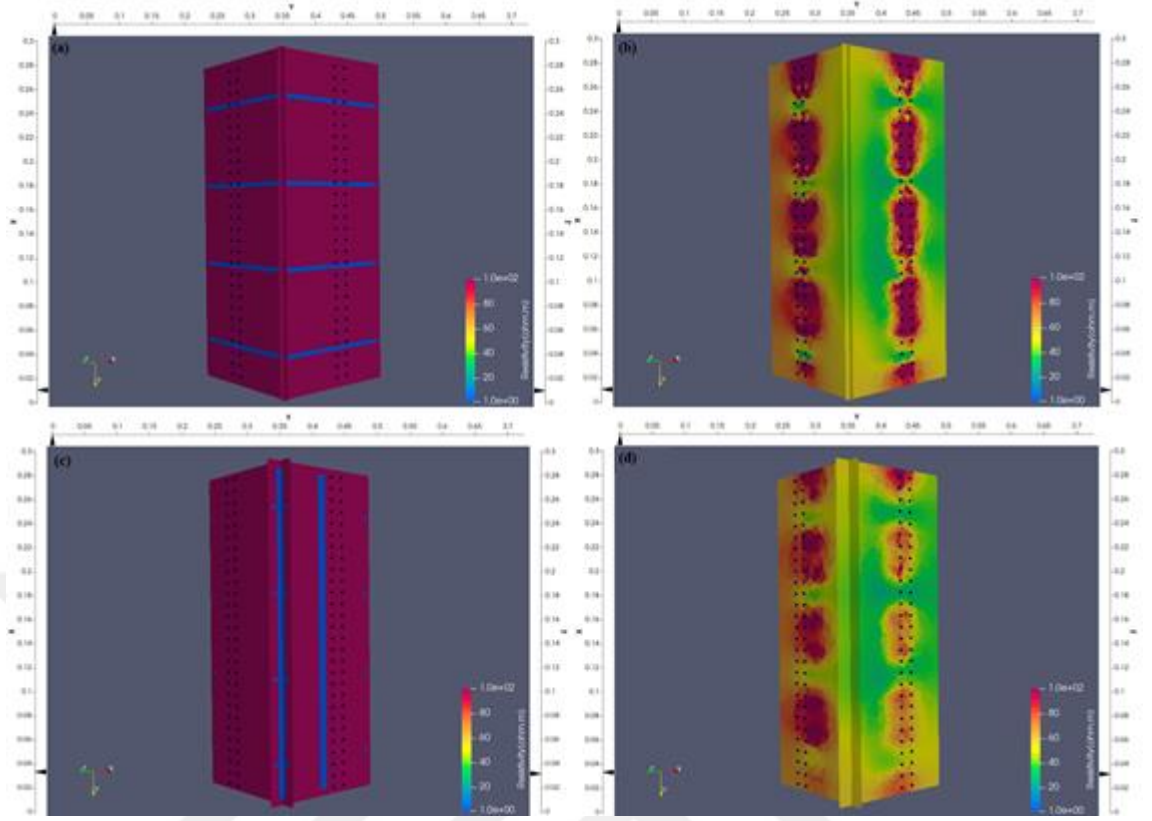


Şekil 4.19 Elektrotların kenardan 15 cm uzakta olduğu durumda elde edilen 3B öz direnç modellerinden (a) Dipol- Dipol (b) PT dizilimleri için $x = 1$ cm ve $z = 1$ cm’den (c) DD (d) PT dizilimleri için $x = 3$ cm ve $z = 3$ cm’den alınmış kesitler



Şekil 4.20 Elektrotların kenardan 20 cm uzakta olduğu durumda elde edilen 3B özdirenç modellerinden (a) Dipol- Dipol (b) PT dizilimleri için $x = 1$ cm ve $z = 1$ cm'den (c) DD (d) PT dizilimleri için $x = 3$ cm ve $z = 3$ cm'den alınmış kesitler

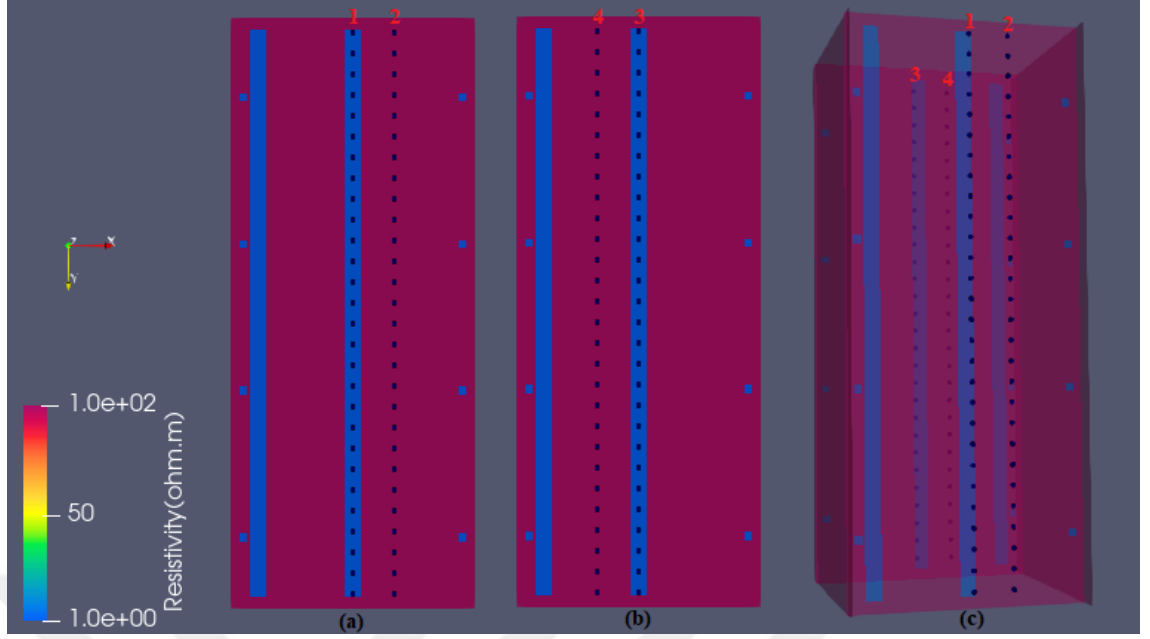
PT dizilimine ait 3B özdirenç modellerinde yapay etkiler ile elektrotların bulunmadığı bölgelerdeki etkilerin azaldığı ve bu bölgelerde gerçek modelinkine daha yakın bir özdirenç dağılımı elde edildiği görülmektedir. Enine donatıların konumları PT diziliminde daha belirginken, DD dizilimi ise etriyeler için gerçeğe daha yakın bir özdirenç değerine ulaşılmasını sağlamıştır. Her iki dizilimin de olumlu ve olumsuz taraflarının birlikte incelenmesi adına yapılan birleşik ters çözüm sonuçları. Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 (a,c) Kolon modelinden (b,d) birleşik ters çözüm sonucu elde edilen 3B öz direnç modelinden sırası ile $x = 1 \text{ cm}$, $z = 1 \text{ cm}$ ve $x = 3 \text{ cm}$, $z = 3 \text{ cm}$ 'den alınmış kesitler

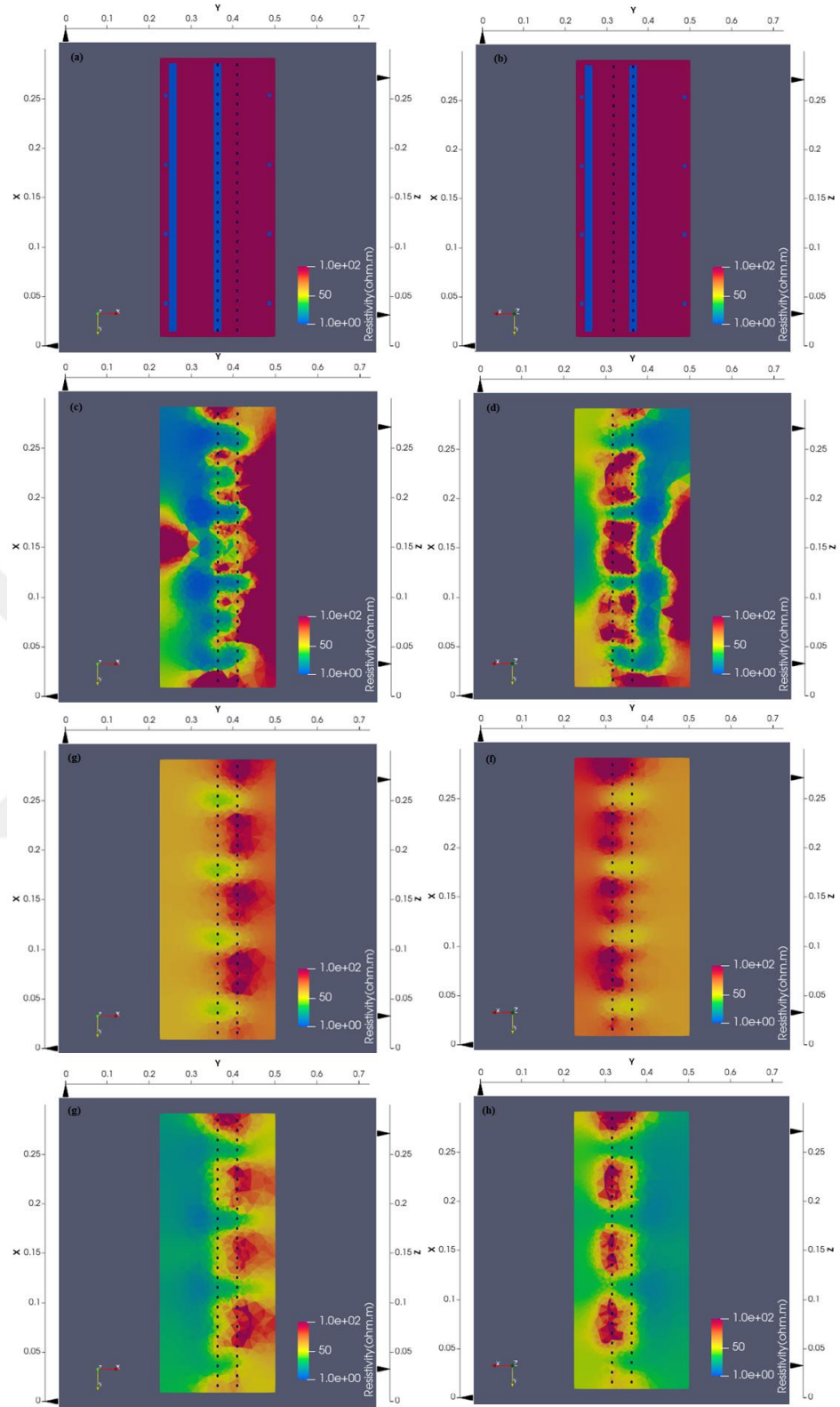
Birleşik ters çözüm sonucunda elde edilen 3B öz direnç modeline ait kesitlere bakıldığında, etriyelerin konum ve öz direnç değerleri gerçeğe daha yakın olarak elde edilmiştir. Boyuna donatının etkisi ise, hem bulunduğu konumda hem de bulunduğu yüzeyin tamamında görülmektedir. Elde edilen sonuçlarda, DD diziliminin etkisinin daha fazla olduğu ve PT diziliminin beton öz direncini bulmadaki doğruluğunu indirgediği de görülmektedir.

Elektrotların, karşılıklı yüzeylerde bulunduğu durum için yapılan çalışmalarda ise profil konumları birinci ve üçüncü profil karşılıklı boyuna donatıları ortalayacak, ikinci ve dördüncü profil ise donatılara denk gelmeyecek şekilde seçilmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Elektrotların boyuna donatılara göre konumlarının (a) ön yüzeyden (b) arka yüzeyden alınmış kesitler (c) 3B gerçek model üzerinde gösterimi (1,2,3,4: profil numaraları)

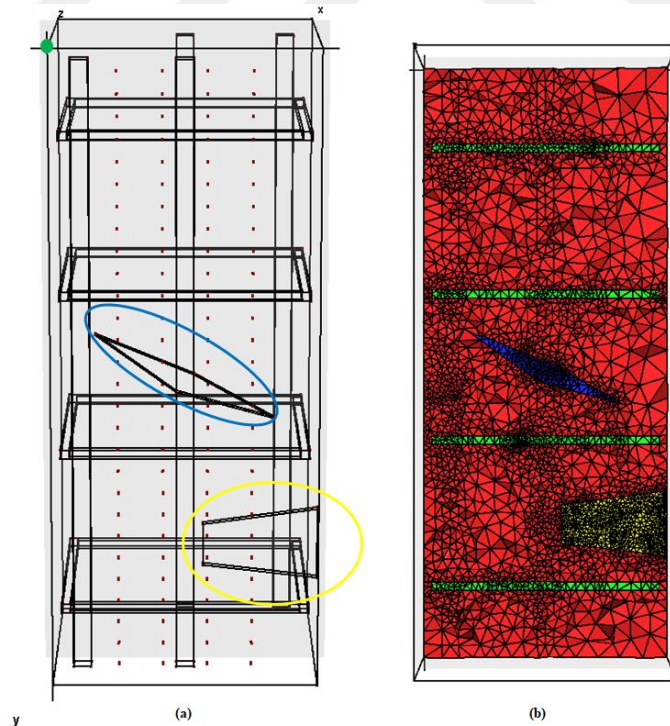
Bu çalışmalarda DD, PT ve iki dizilimin birleşimi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu üç veri seti için ters çözüm sonucunda elde edilen 3B öz direnç modellerinin ve gerçek modelin farklı derinliklerinden alınan kesitler şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23 (a,c,e,g) Ön yüzeyden (b,d,f,h) Arka yüzeyden olmak üzere (a,b) Gerçek modelden (c,d) DD (e,f) PT (g,h) İki diizilimin birleşimi için elde edilen 3B öz direnç modellerinden z yönünde 3.5 cm derinlikten alınan kesitler

Elde edilen 3B özdirenç modellerinden alınan kesitlere bakıldığında, DD dizilimi ile elde edilen modeldeki yapay etkiler ve yapıların sınırlarının belirsizlikleri dikkat çekmektedir. PT dizilimi ise, profillerin bulunduğu alanlarda kolonun gerçek özdirenç değerinin, diğer bölgelerde ise gerçeğe yakın özdirenç değerinin elde edilmesini sağlamıştır. Buna ek olarak boyun donatı olan profilide diğer profile göre daha düşük değerli bir özdirenç dağılımının elde edilmesi dizilimin bu konudaki üstünlüğünü de göstermiştir. Birleşik ters çözüm sonucunda ise yine komşu yüzeylerde yapılan çalışmaya benzer şekilde DD diziliminin etkisinin ağır bastığı ve özdirenç dağılımının DD dizilimine kıyasla daha iyi olduğu görülmektedir.

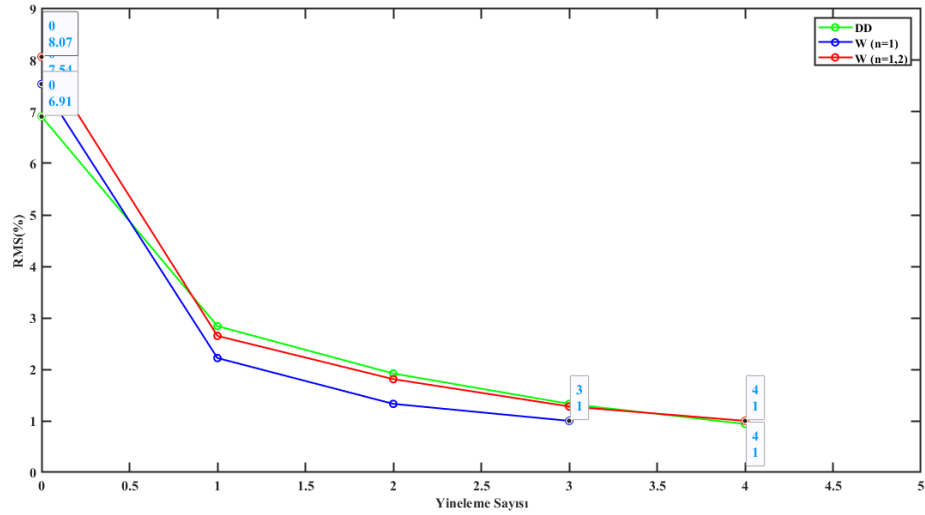
Donatıların yapı içerisindeki varlığının ve konumlarının tespiti ile ilgili çalışmaya ek olarak yapı içerisinde nemliliği (10 ohm.m) ve henüz mostra vermemiş bir çatlak (2000 ohm.m) temsil eden birer bölgenin olduğu durum için de inceleme yapılmıştır. Bu çalışma için kullanılan modelin şematik gösterimi ve elektrotların model üzerindeki konumları şekil. 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24 (a) Nemliliği (sarı) ve kırık/çatlak (mavi) temsil eden bölgelerin model üzerindeki gösterimi (b) Nemlilik, kırık çatlak ve etriye yapılarının $z=1.1$ cm derinliği için alınan kesit ile düzensiz (unstructured) model ağı içerisindeki gösterimi (Kırmızı: Beton (100 Ω m), Yeşil: Etriye (1 Ω m), Sarı: Nemlilik (10 Ω m), Mavi: Kırık/çatlak (5000 Ω m))

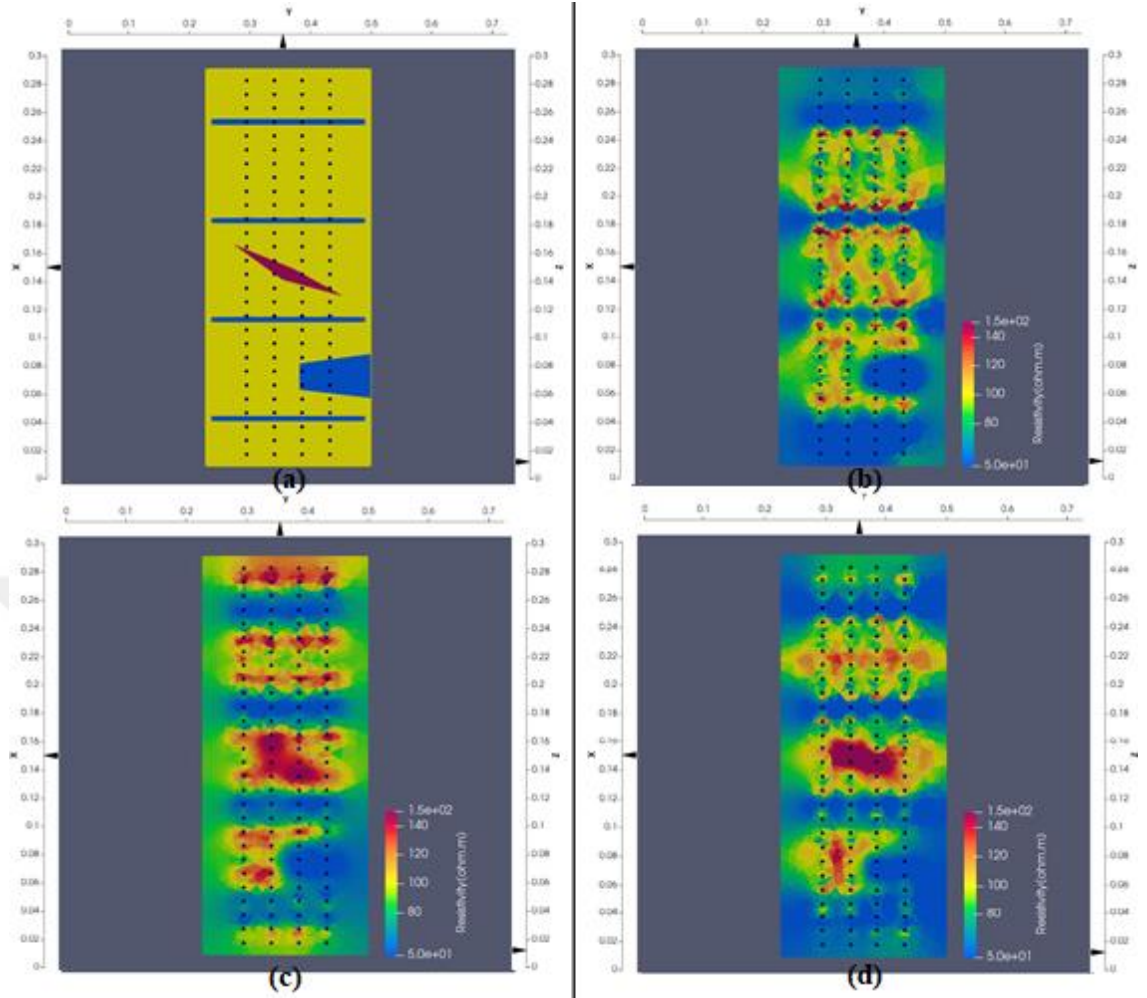
Nemliliği temsil eden z yönünde 0.65 cm, kırık/çatlağı temsil eden yapı ise z yönünde 0.6 cm derinliğe konumlandırılmışlardır. Yapıların orta noktalarının koordinatları, şekil 4.24'te yeşil ile işaretlenen nokta $x=y=z=0$ noktası olmak üzere sırası ile 23.5-57-1.15 (cm) ve 15-37-0.8'tir (cm). Nem yapısı en geniş olduğu noktada, x yönünde 13 cm, y yönünde 8 cm, z yönünde 1 cm, kırık çatlak yapısı ise, x yönünde 20 cm, y yönünde 9.5 cm ve z yönünde 1 cm'dir. Yapıların model ağı içerisindeki görünümü de yine şekil 4.24'te verilmiştir.

%3 oranında normal dağılımlı gürültü eklenmiş verilerin ters çözümü sırasında her yinelemeye ait son RMS değerleri şekil 4.25'te yer almaktadır.



Şekil 4.25 Kullanılan elektrot dizilimleri için her ters çözüm yineleme adımına ait RMS değerlerinin grafik üzerinde gösterimi

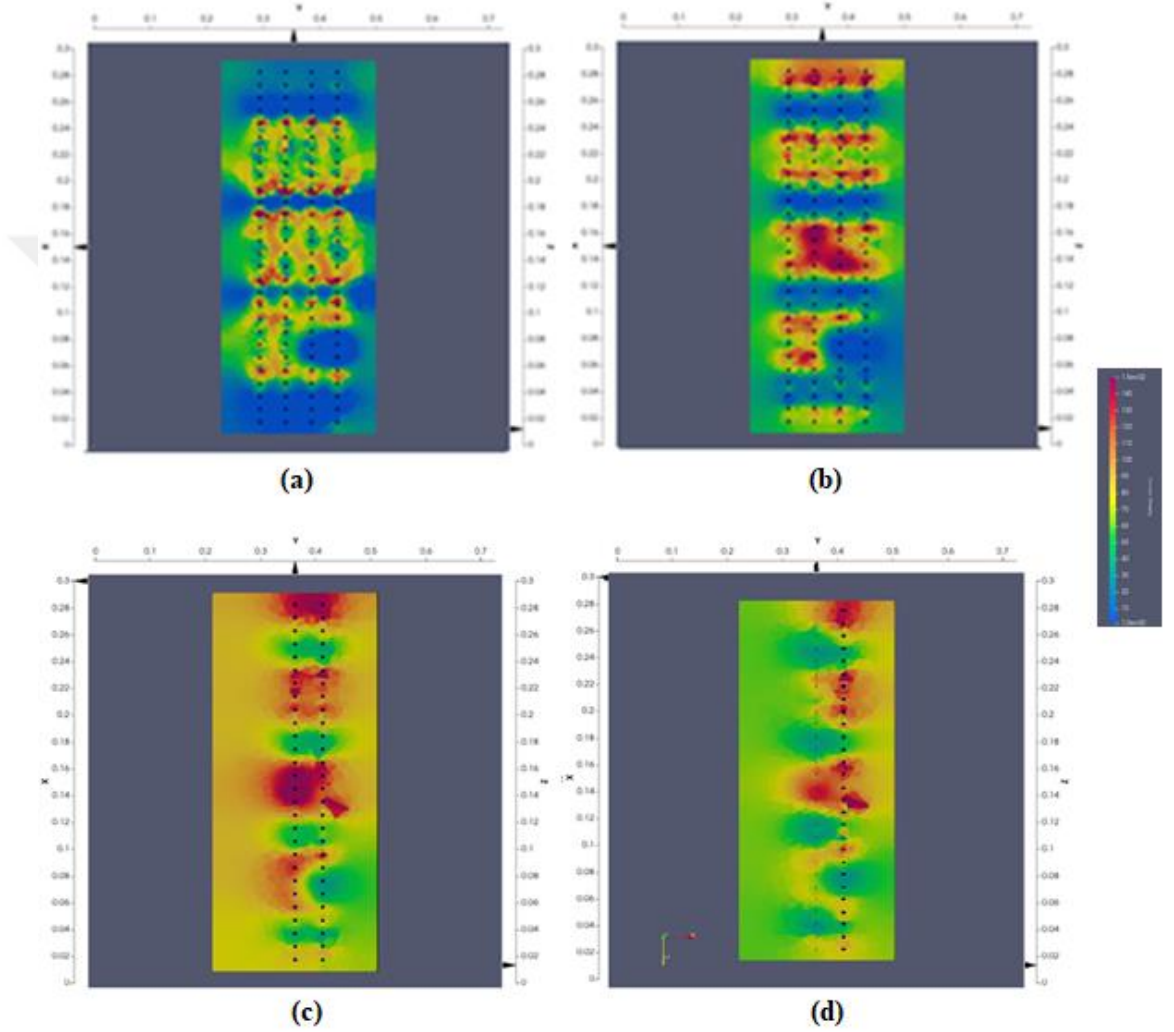
DD, W (n=1) ve W (n=1,2) için elde edilen 3B öz direnç modellerinden $z=1$ cm derinliğinden alınmış xy kesitleri sırasıyla şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26 $z=1.1$ cm derinlik için xy-öz direnç kesitleri: (a) gerçek model, (b) DD dizilimi 3B ters çözüm sonucu, (c) W ($n=1$ seviye) dizilimi 3B ters çözüm sonucu, (d) W ($n=1$ ve 2 seviyesi için) dizilimi 3B ters çözüm sonucu (Gerçek modelde, iletken ve yalıtkan yapıların temsil ettiği yapılar Şekil 4.16' da açıklanmıştır)

Şekil 4.26'daki sonuçlara bakıldığında, üçünde de nemli bölge ve kırık/çatlak yapısından kaynaklanan anomaliler görülmektedir. Dipol- Dipol dizilimi için elde edilen sonuçta, iletken bölgelerin yalıtkan (resistive) bölgelere göre daha iyi çözüldüğü anca kırık çatlak yapısının da tespit edildiği görülmektedir. W diziliminde ise yapılara ait anomaliler daha yumuşak (smooth) ve olduğundan daha büyük alana yayılmış durumdadır. Her üç sonuç da farklı seviyelerde toplanmış verilere ait sonuçlar olduğundan bire bir karşılaştırma yapmak doğru değildir. Bu sonuçlar doğrultusunda, yapı elemanı üzerinde alınacak tek yüzey ölçülerinde $n=8$ seviye için DD elektrot dizilimi kullanılmıştır.

Tek yüzeyde dağılım gösteren elektrotlar ile yapılan çalışmalara ek olarak karşılıklı ve komşu yüzeylerde dağılım gösteren elektrotlar için de sonuçlar incelenmiştir. Tek yüzeyde DD ve W ($n=1$), komşu ve karşılıklı yüzeylerde PT dizilimi için elde edilen 3B özdirenç modellerinden $z=1$ cm derinliğinden alınmış xy kesitleri sırasıyla şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27 Tekyüzeyde dağılım gösteren elektrotlar için (a) DD, (b) W ($n=1$ seviye), (c) komşu yüzeylerde dağılım gösteren elektrotlar için PT, (d) karşılıklı yüzeylerde dağılım gösteren elektrotlar için PT elektrot dizilimleri için elde edilen 3B özdirenç modellerinden $z=1.1$ cm’ye ait xy kesitleri

Şekil 4.27’ye bakıldığında komşu ve karşı yüzeylerde dağılım gösteren elektrotlar ile PT dizilimi için elde edilen sonuçlarda kırık/çatlak ve nemliliği temsil eden yapılara ait

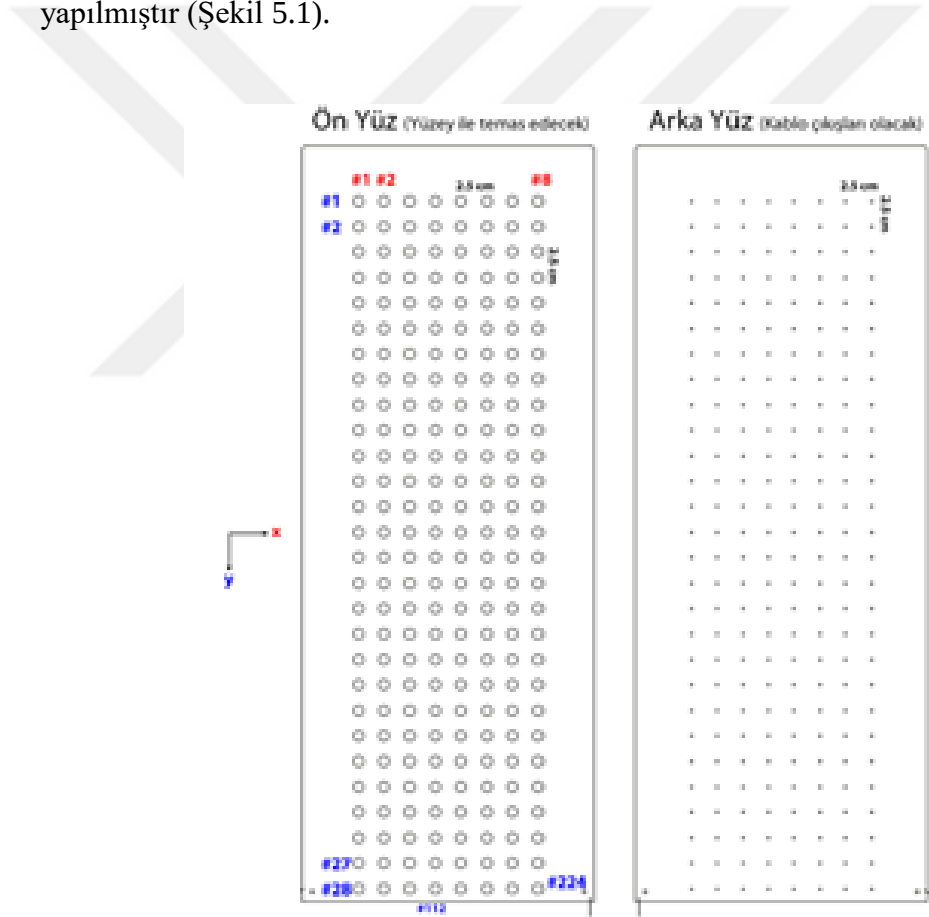
belirtiler gör÷lmektedir. Buna ek olarak kolonun özdirenç değeri, tek yüzey DD ve W elektrot dizilimleri için elde edilen sonuçlara oranla gerçeğe daha yakın ve daha düzgün dağılımlı olarak elde edilmiştir.



5. YAPI ÜZERİNDE ÇOK ELEKTROTLU SİSTEM İLE VERİ TOPLAMA

5.1 Yapı Elemanı Üzerinde Ölçü Alımı için Geliştirilen Ölçü Düzeneği

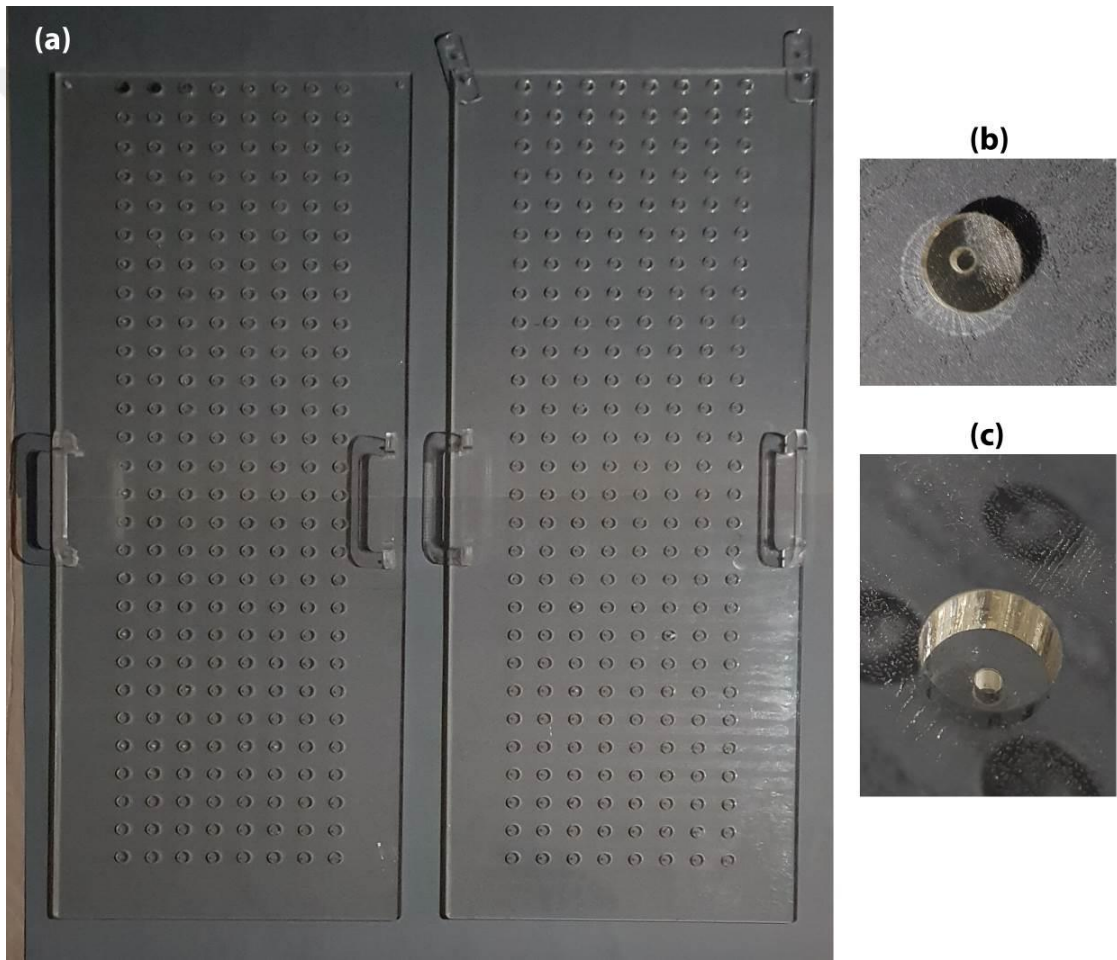
Ölçüm düzeneği yapı taşıyıcı sistem elemanları üzerinde kolay bir şekilde ölçü alınmasına ve çok elektrotlu öz direnç ölçüm cihazlarının ölçüm prensiplerine uygun olarak tasarlanmıştır. Elektrot aralıkları hedeflenen araştırma derinliği, yapı taşıyıcı sistem elemanları içerisinde bulunan yapıların boyutları ve ölçü alınırken taranacak alan göz önünde bulundurularak x- ve y-yönlerinde en az 2.5 cm olacak şekilde seçilmiştir. x-yönünde 8, y-yönünde 28 elektrot olacak şekilde toplamda 224 elektrotlu bir tasarım yapılmıştır (Şekil 5.1).



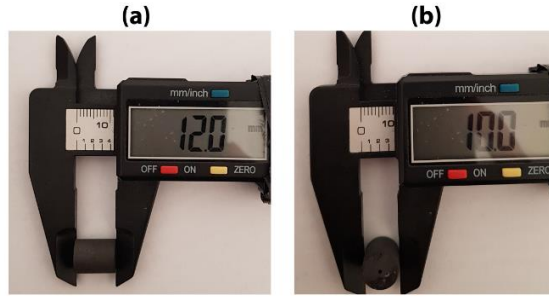
Şekil 5.1 Yapı taşıyıcı sistem elemanları üzerinde yapılacak küçük ölçekli DAÖ veri toplama çalışmaları için tasarlanan ölçüm düzeneği

Bu tasarımdan birbirine eklenebilir veya ayrı ayrı kullanılabilir olarak iki adet üretilmiştir. Bu sayede yapı taşıyıcı sistem elemanları üzerinde aynı yüzeyde daha geniş bir alan

taranabilir veya aynı anda farklı yüzeylerde veri toplanabilecektir. Malzeme olarak 5 mm kalınlığında pleksiglas levhalar kullanılmış ve levhaların ön yüzeyinde elektrotların yerleştirileceği yuvalar, arka yüzeyinde kablo çıkışları için küçük delikler açılmıştır (şekil 5.2). Elektrot olarak iletkenliği yüksek (direnci düşük) grafit elektrotlar kullanılmıştır. Grafitlerin boyu 12 mm, çapı 10 mm'dir (şekil 5.3). Tasarlanan grafit elektrotların direnci ölçölmüş ve yaklaşık 1 mΩ/cm bulunmuştur (1A akım altında cm'de 1mV gerilim oluşmaktadır). Tüm grafitlerin taban yüzeyinin tam ortasına kablo bağlantısının sağlanması için 1 mm genişliğinde 7 mm derinliğinde delikler açılmıştır.



şekil 5.2 (a) 5 mm kalınlığında pleksiglas kullanılarak üretilen ölçüm düzeneği levhaları (2 adet). (b) Kablo çıkışları için delikler. (c) Grafit elektrotların yerleşeceği yuvalar



Şekil 5.3 Silindir şeklinde tasarlanan grafit elektrotların (a) boyu 12 mm (b) çapı 10 mm'dir

Kablo olarak 23 AWG çapında (yaklaşık olarak 0.5733 mm) ve iletken direnci en fazla 85 m Ω /m olan elektrolitik bakır tel kullanılmıştır. Bu kablonun grafit elektrot yuvasına teması direnci yaklaşık 0.7 Ω olan sıkılaştırılmış çelik vidalar ile yapılmıştır.

Geliştirilen ölçüm düzeneğinin tek veya iki pleksiglas levha olarak kullanılması durumunda x- ve y-yönlerinde kullanılabilecek elektrot sayıları, elektrot aralıkları ve taranan alanın büyüklüğü sırasıyla çizelge 5.1-5.2'de verilmiştir. Tablolar veri toplama çalışmasında kullanılacak olan ve Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde bulunan AGI-SuperSting R8 çok kanallı-112 elektrotlu öz direnç ölçüm cihazında her iki yönde kullanılabilecek en fazla elektrot sayısı için hazırlanmıştır. Tablolar elektrot aralıklarının x- ve y- yönlerinde birbirine eşit ve iki katı olması durumlarını içermektedir.

Çizelge 5.1 Ölçüm düzeneğinde tek pleksiglas levha kullanılması durumunda x- ve y-yönlerinde kullanılabilecek elektrot sayısı, aralığı ve taranan alan

Elektrot sayısı x / y yönü	Elektrot aralığı x / y yönü	Toplam Elektrot Sayısı	Taranan Alan (cm ²)
4 / 14	2.5 / 2.5	56	243,75
4 / 14	5 / 2.5	56	487,5
4 / 14	2.5 / 5	56	487,5
4 / 14	5 / 5	56	975
8 / 14	2.5 / 2.5	112	568,75
8 / 14	2.5 / 5	112	1137,5
2 / 28	2.5 / 2.5	56	168,75
2 / 28	5 / 2.5	56	337,5
4 / 28	2.5 / 2.5	112	506,25
4 / 28	5 / 2.5	112	1012,5

Çizelge 5.2 Ölçüm düzeneğinde iki pleksiglas levha kullanılması durumunda x- ve y-yönlerinde kullanılabilecek elektrot sayısı, aralığı ve taranan alan

Elektrot sayısı x / y yönü	Elektrot aralığı x / y yönü	Toplam Elektrot Sayısı	Taranan Alan (cm ²)
2 / 28	2.5 / 5	56	337,5
2 / 28	5 / 5	56	675
4 / 28	2.5 / 5	112	1012,5
4 / 28	5 / 5	112	2025
2 / 56	2.5 / 2.5	112	343,75
2 / 56	5 / 2.5	112	687,5

Ölçü düzeneği ile yukarıda belirtilen elektrot sayıları ve aralıkları göz önünde bulundurularak farklı olasılıklar da türetilebilir ve ölçü alınabilir. Örneğin; x-yönünde 7.5 cm aralıklı 2 elektrot, y-yönünde 2.5 cm aralıklı 28 elektrot veya x-yönünde 5 cm aralıklı 4 elektrot, y-yönünde 7.5 cm aralıklı 10 elektrot vb. çizelge 5.1-5.2’de verilen kullanımlara birer örnek sırasıyla şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.4 Tek pleksiglas levha kullanımı için iki örnek: (a) x-yönünde 2.5 cm aralıklı 8, y-yönünde 2.5 cm aralıklı 14 elektrot (b) x-yönünde 2.5 cm aralıklı 4, y-yönünde 5 cm aralıklı 14 elektrot, iki pleksiglas levha kullanımı için iki örnek: (c) x-yönünde 2.5 cm aralıklı 4, y-yönünde 5 cm aralıklı 28 elektrot (d) x-yönünde 2.5 cm aralıklı 2, y-yönünde 2.5 cm aralıklı 56 elektrot (kırmızı x işaretleri aktif elektrotları göstermektedir)

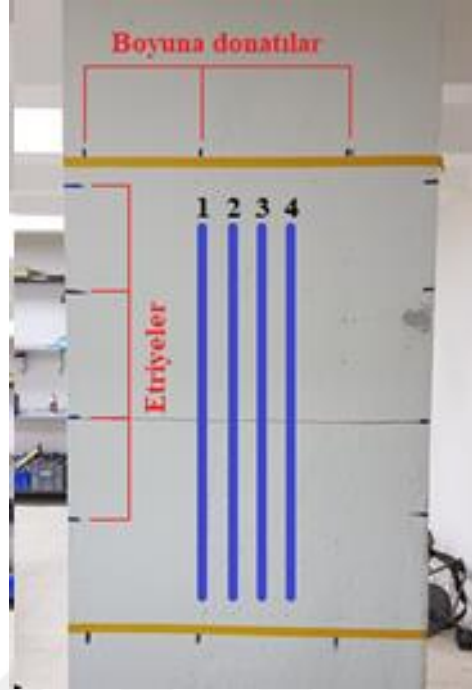
Şekil 5.5'te ölçüm düzeneğinin ölçü alım anında yapı taşıyıcı sistem elemanı ile olan örnek durumu gösterilmiştir.



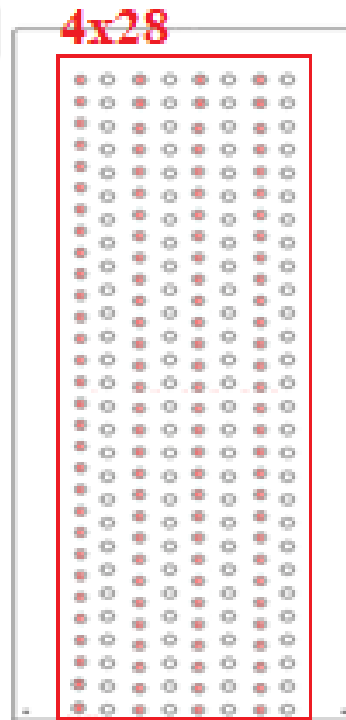
Şekil 5.5 Geliştirilen ölçüm düzeneğinin ölçüm yapı taşıyıcı sistem elemanı ile konumu. Görselde tek pleksiglas levha kullanılmış ve x-yönünde 2.5 cm aralıklı 4 elektrot, y-yönünde 5 cm aralıklı 14 elektrotlu durum görülmektedir (toplam 56 elektrot)

5.2 Verilerin Toplanması ve Ters Çözüm

Bu tez çalışması kapsamında, veriler bina içerisinde yer alan bir kolon üzerinde toplanmıştır. DAÖ ölçüsü öncesinde, kolon içerisindeki donatıların yerlerinin belirlenmesi için bu kolon üzerinde radar ölçüleri alınmıştır (Şekil 5.6). Yapı taşıyıcı sistem elemanları üzerinde yapılacak küçük ölçekli DAÖ veri toplama çalışmaları için tasarlanan ölçüm düzeneği x yönünde 5 cm aralıklı 4 elektrot, y yönünde 2.5 cm aralıklı 28 elektrot olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.6 Ölçü alınan kolon üzerinde boyuna donatı ve etriyelerin GPR ölçümlerine göre belirlenen yerleri (1,2,3,4: DAÖ ölçüsünde profillerin konumlarının kolon üzerinde şematik gösterimi)

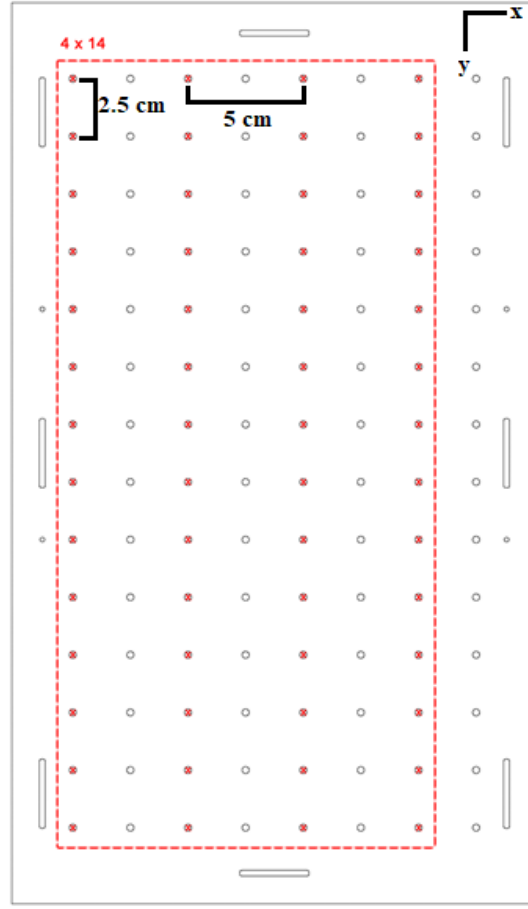


Şekil 5.7 Veri toplama sırasında kullanılan elektrot ve profil aralığının pleksiglas üzerinde şematik gösterimi

Hazırlanan düzenek ile yapılan ölçümlerde ilk olarak kontak (temas) dirençleri ölçülmüştür. Kolon üzerinde yapılan ölçümlerde aşağıdaki sorunlar ile karşılaşmıştır.

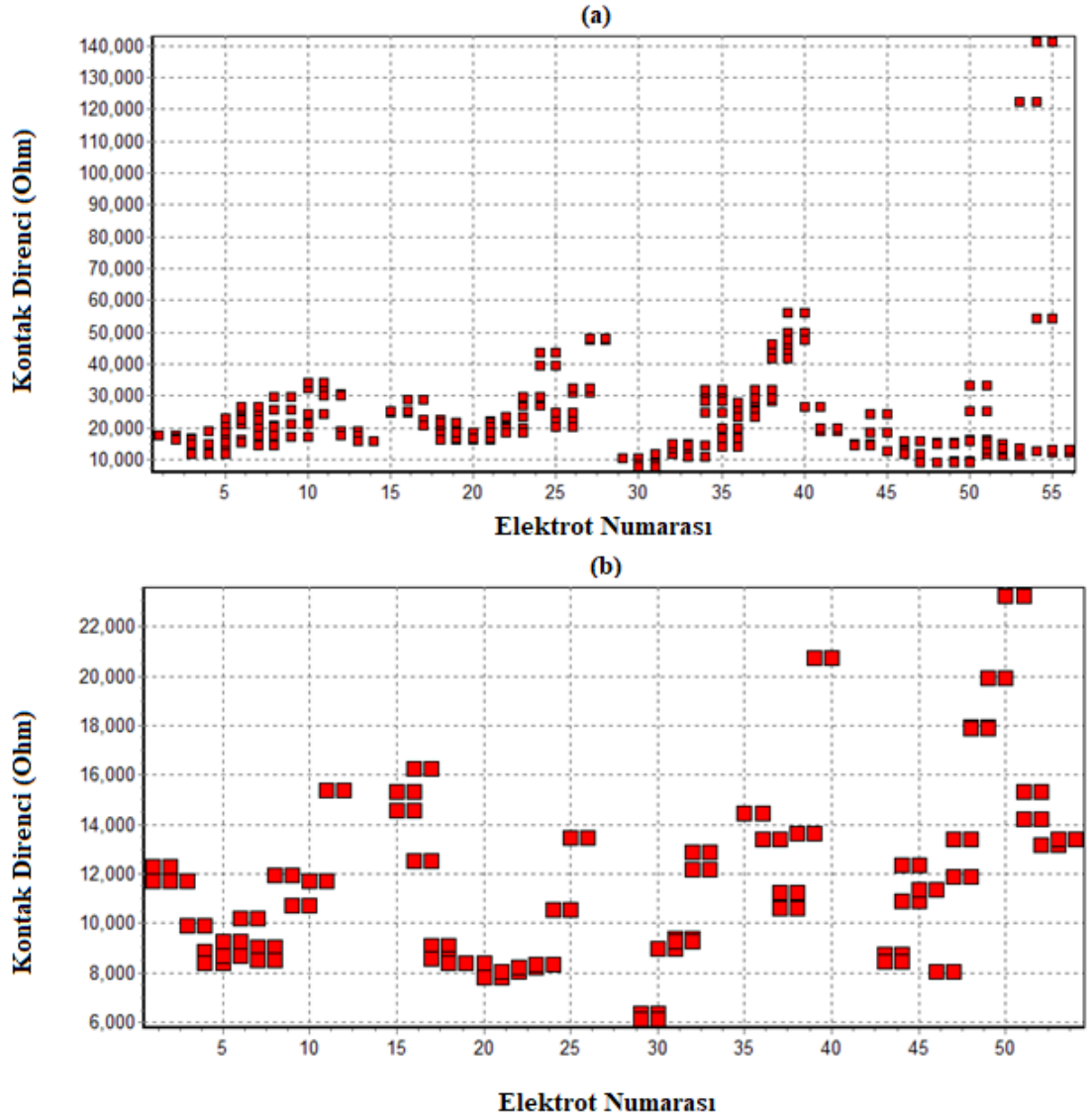
- Kontak direnç değerlerinin çok büyük olması
- Kontak direnç değerlerinin geniş bir aralıkta dağılım göstermesi
- Yapı elemanı üzerindeki plastik boya katmanının ve alçı tabakasının akımın iletilmesine engel olması
- Yapı elemanı üzerinde bulunan boya ve alçıdan kaynaklı pürüzlerden ve kolon yüzeyinin eğimli şeklinden dolayı bazı noktalarda elektrotların kolon yüzeyi ile tam temasının sağlanamaması.

Karşılaşılan bu sorunları çözebilmek için ölçü düzeneğinin tasarımında değişikliklere gidilmiş ve kontak direncini düşürmek için müdahalelerde bulunulmuştur. İlk olarak, akımı iletmeyen boya tabakası kazınmış ve kolon yüzeyi mümkün olduğunca düzleştirilmiştir. Elektrotların yüzey ile daha iyi temas edebilmesi için yeni bir pleksiglas hazırlanmış ve elektrotların pürüzlü/eğimli yüzeylere göre kendini ayarlayabilmesini sağlayan yaylı bir sistem geliştirilmiştir. Bu yeni düzenekte kullanılan x ve y yönündeki elektrot sayısı, elektrot aralığı ve profil aralığı şekil 5.8’de şematik olarak gösterilmiştir. Bunlara ek olarak, kontak direncinin düşürülmesi için ölçü alınan yüzey nemlendirilmiş ve elektrotların ucuna iletkenliği artıracak bir jel sürülmüştür.



Şekil 5.8 Hazırlanan yeni ölçüm düzeneğinde üzerinde elektrot konumlarının şematik gösterimi (kırmızı ile işaretli noktalar elektrotların bulunduğu konumları temsil etmektedir)

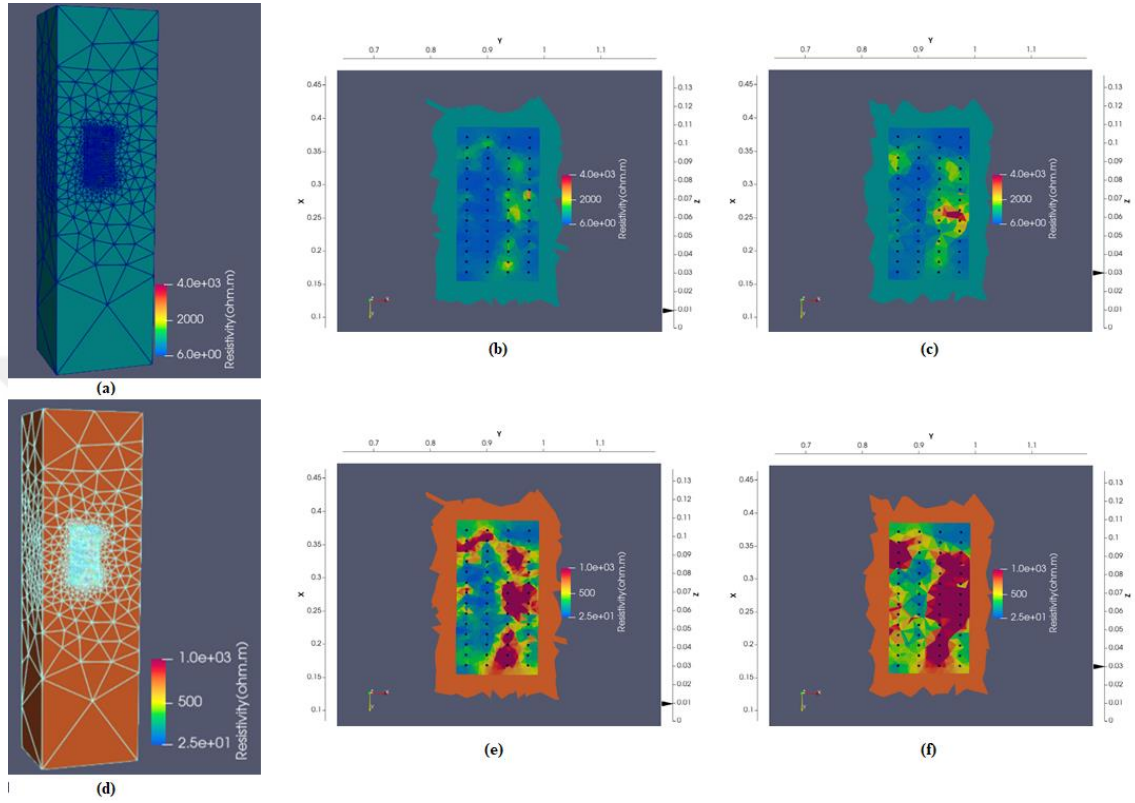
Hazırlanan bu 56 elektrotlu yeni düzenek ile DD elektrot dizilimi kullanılarak $n=1,2,\dots,8$ seviye için çok sayıda ölçü alınmıştır. Toplanan iki ayrı veri kümesine ait kontak direnç değerlerinin dağılımını gösteren grafikler şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9 Kolon üzerinde (a) az nemli yüzeyde (b) nemli yüzeyde yapılan iki adet ölçüm için her elektrota ait kontak direnç değerlerinin grafik üzerinde gösterimi

Şekil 5.9 (a)'da kontak dirençleri gösterilen ilk ölçüm sırasında kolon yüzeyi, şekil 5.9 (b)'de kontak dirençleri gösterilen ikinci ölçümdekine göre daha az nemlendirilmiştir. Bu durumun etkisi, kontak direnç değerleri üzerinde de açıkça görülmektedir. Her ne kadar ikinci ölçümde kontak direnç değerleri ilkinde göre daha düşük olsa da bazı noktalarda genel dağılımın dışında olan değerler de ölçülmüştür ancak tekrarlanan ölçümler arasında en düzgün kontak direnç değerleri bu ölçü için elde edilmiştir.

Ters çözüm işleminden önce, bu veri setine ait görece yüksek kontak dirençli elektrotlara ait bazı veriler atılmıştır. Ters çözüm sonucu elde edilen 3B öz direnç modeli farklı renk aralıklarında çizdirilerek şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 (a,b,c) 6-4000 Ωm aralığında (a) öz direnç dağılımının kolon ile aynı ölçülerdeki model ağı üzerinde (b,c) ters çözüm uygulanan alan içerisinde (b) $z=1$ cm'den (c) $z=3$ cm'den alınan kesit üzerinde (d,e,f) 25-1000 Ωm aralığında (d) öz direnç dağılımının kolon ile aynı ölçülerdeki model ağı üzerinde (e,f) ters çözüm uygulanan alan içerisinde (e) $z=1$ cm'den (f) $z=3$ cm'den alınan kesit üzerinde gösterimi

Yapılan ölçümler sırasında kontak dirençlerin çok yüksek olması elde edilen sonuçların doğruluğunu ve yorumlanabilirliğini etkilemiştir. Bu nedenle ileride yapılacak çalışmalarda farklı materyallerden üretilmiş ve farklı boyutlardaki elektrotların kullanılabilirliği incelenecektir. Bu incelemeler sonucunda belirlenen en uygun materyal ve boyuttaki elektrot ile çalışmalara devam edilecektir.

6. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, betonarme yapıların kolon, kiriş ve demir donatı gibi taşıyıcı sistem elemanları üzerinde doğrudan ölçü almaya uygun bir ölçüm düzeneği geliştirilmiştir. Geliştirilen ölçüm düzeneği, yapı elemanının tek yüzeyinde ölçü alımına olanak vermenin yanı sıra karşılıklı ve komşu yüzeylerde de aynı anda ölçü almaya uygun tasarlanmıştır. Düzeneğin, öne çıkan diğer bir özelliği ise bu alanda yapılan çalışmaların çoğunda elektrotlar silindirik bir yapı yüzeyinde dairesel olarak dağılım gösterirken, bu çalışmada geliştirilen düzeneğin yapılarda daha sık kullanılan dikdörtgen veya kare prizma şeklindeki elemanlar üzerinde ölçü almaya uygun olmasıdır.

Ölçüm düzeneği geliştirilirken, çok elektrotlu çok kanallı DAÖ ölçü aleti ile üç boyutlu ters çözüme uygun verilerin toplanması amaçlanmıştır. Bu amaç için ilk olarak uygun veri setleri 3B modelleme çalışmaları ile belirlenmiştir. Modelleme çalışmalarında, DAÖ yönteminin, yapı taşıyıcı sistem elemanları üzerinde uygulanması ile eleman içerisindeki donatıların, kırık/çatlak ve nemli zonların özdirenç dağılımına etkisi incelenmiştir. Bu incelemelerde, farklı elektrot dizilimleri, elektrot dağılımları gibi durumların sonuçlara etkileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki maddelerde ilgili başlıklar ile verilmiştir.

- 1- Kullanılan Dizilim Türü: Laboratuvar ortamındaki çalışmalarda genellikle W ve DD dizilimleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada da, bu iki dizilim için model yanıtları hesaplanmıştır. Kolon yapısının bir yüzeyi üzerinde W ve DD dizilimi için elde edilen verilerin 3B ters çözümü sonucu donatı izleri, kırık yapısı ve nemli zonlar tespit edilebilmektedir. Ancak her iki dizilimde de ilk seviyelerde yanıltıcı belirtiler oluşmaktadır. Çalışmada, kolonun komşu veya karşı yüzeylerinde yer alan elektrotlar için kuyu-kuyu ölçülerinde yüksek çözünürlüklü sonuç veren PT dizilimi ile modelleme yapılmıştır. Bu durumda, donatı, kırık zon gibi süreksizlik yapıları belirlenmiş ve betonun özdirenci tek yüzeyde yer alan elektrotlara ait 3B ters çözümünden daha iyi şekilde elde edilmiştir.

- 2- Gerçek verilerin Ters çözümü: Bina içinde bir kolon üzerinde geliştirilen düzenek ve belirlenen elektrot dizilimi ve açıklıkları için çok-elektrotlu ve çok kanallı ölçü aleti ile veri toplanmıştır.
- İlk olarak plastik boyalı duvar üzerinde ölçü alma denenmiştir. Ancak, kontak direnci çok yüksek olduğundan veri toplanamamıştır. Daha sonra plastik boya ve alçı duvardan sıyrılarak, çıplak beton üzerinde ölçü alınabilmektedir. Bu çalışmada, beton yapının üzerinde alçı ve boya olması durumunda kontak direnci çok yüksek olduğundan, DAÖ ölçüsü alınamayacağı gösterilmiştir.
 - Çıplak beton yapı üzerinde geliştirilen düzenek ile alınan ölçülerde, kullanılan grafit elektrotların duvar eğiminden dolayı tam temas etmediği gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda yaylı bir sistem ile tüm elektrotların teması sağlanabilmektedir. Bu durumda dahi kontak dirençleri 10.000-20.000 ohm direnç aralığında ölçülmüştür.
 - Grafit elektrot ve duvar arasındaki kontak direnci azaltmak için farklı tip iletken jeller kullanılmıştır. Jelin kuruması durumunda, grafiti yalıtkan yaptığı gözlemlenmiş ve grafit elektrotların kullanımından sonra, jelin su ile temizlenmesi gerektiği belirlenmiştir. İlerleyen çalışmalarda, ölçü süresinin jelin kurumasına izin vermeyecek en uygun haline getirilmesi hedeflenmiştir.
 - Kolon üzerinde birçok ölçü alınmıştır. Bunlardan en gürültüsüz olanın ters çözüm sonucu tezde sunulmuştur. Bu verilerin ters çözümü sonucu betonun öz direnç dağılımı elde edilmiştir. Ancak elektrot açıklığı, $a=2.5$ ve seviye sayısı, $n=1,...,8$ alınması nedeni ile en büyük araştırma derinliği 5cm' de kalmıştır. Bu nedenle betonun içerisine doğru öz direnç dağılımı tam elde edilememiştir.

Bu tez çalışmasında, kolon gibi sonlu büyüklükteki ortamın öz direnç dağılımı araştırılmıştır. Dolayısıyla, bu yapılar üzerinde ölçülen DAÖ verileri, klasik yarı-sonsuz ortam için geliştirilen 3B modelleme ve ters çözüm algoritmaları ile değerlendirilememekte ve model sınır koşullarının sonlu sınırlar için uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada, bu amaç için geliştirilmiş R3t algoritması (Binley, 2013) kullanılmıştır.

Bu çalışmanın devamında, içinde demir donatı, kırık zon ve zayıf zon olan beton numuneler hazırlanacaktır. Bu numuneler üzerinde farklı elektrot aralıkları için karşılıklı yüzeylerde PT dizilimleri ile veriler toplanarak, pratikte yöntemin uygulanabilirliği gösterilecektir. Buna ek olarak kontak direncin azalması için farklı boyutlarda ve farklı malzemelerden yapılmış elektrotların etkisi araştırılarak oluşturulan düzenek geliştirilecektir.



KAYNAKLAR

- Adler, A., Amyot, R., Guardo and R., Bates, J. H. T., & Berthiaume, Y. (1997). Monitoring changes in lung air and liquid volumes with electrical impedance tomography.
- Alhadj, M.A., Palma-Lopes and S., Villain, G. 2019. Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey. Construction and Building Materials, 223, 898-909.
- Anderson, N.L., Torgashov, E. and Covin, O. 2010. Ground Penetrating Radar: utility/rebar/cable detection and concrete/subgrade debonding. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings, 9-21.
- Anonim. 2000. TS500 Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2000/07/20000712M1-23.pdf> Erişim Tarihi: 14.07.2022
- Anonim. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm> Erişim Tarihi: 14.07.2022
- Asadi, P., Gindy, M., Alvarez, M. and Asadi, A. 2020. A computer vision based rebar detection chain for automatic processing of concrete bridge deck GPR data, Automation in Construction, 112, 103-106.
- ASTM C597-09, American Society of Testing and Materials, Standart test method for pulse velocity through concrete
- ASTM E494-10, American Society of Testing and Materials, Standard practice for measuring ultrasonic velocity in materials
- Azari, H. 2016. Condition assessment of concrete bridge deck using GPR. LTBP News, 6.
- Balestra, C. E. T., Nakano, A. Y., Savaris, G., and Medeiros-Junior, R. A. (9 2019). Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: Proposal of parameters based on field structures. Ocean Engineering, 187, 106167
- Bang, E. S., Son, J. S., and Santamarina, J. C. 2013. Subsurface CO2 leakage: Lab-scale study of salient characteristics and assessment of borehole-based detection using resistivity tomography. Geotechnical and Geophysical Site Characterization, 4, 1441-1446.
- Binley, A. 2013. R3t version 2.31 manual. Lancaster University, Lancaster. <http://www.es.lancs.ac.uk/people/amb/Freeware/R3t/R3t.htm>. Erişim tarihi: 11.10.2021
- Binley, A. 2023. Çevrimiçi sözlü görüşme. <https://us05web.zoom.us/j/87029884604?pwd=K2xYVzBBOXVWNmdZRGIMUGtDem55QT09>

- Bodenstein, M., David, M. and Markstaller, K. 2009. Principles of electrical impedance tomography and its clinical application. *Critical Care Medicine*, 37(2), 713-724.
- Bosch, D., Ledo, J., Queralt, P., Bellmunt, F., Luquot, L. and Gouze, P. 2016. Core-scale electrical resistivity tomography (ERT) monitoring of CO₂-brine mixture in Fontainebleau sandstone. *Journal of Applied Geophysics*, 130, 23-36.
- Broomfield, J. P. 2012. The application of simple modeling techniques to corrosion induced deterioration of reinforced concrete. In *Proc. of the 4th Int. Conf. Concrete Solutions*, 26-28.
- Brown, B.H. 2001. Medical impedance tomography and process impedance tomography: a brief review. *Meas. Sci. Technol.*, 12, 991.
- Brown, W.H. 2003. Electrical impedance tomography (EIT): a review. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 27(3), 97-108.
- Candansayar, M. E. 1997. Doğru akım öz direnç yönteminde modelleme ve iki boyutlu sığ yapıların aranmasında elektrot dizimlerinin ayrımlıklarının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Candansayar, M. E. 2007. Two-dimensional inversion of magnetotelluric data with consecutive use of conjugate gradient and least-squares solution with singular value decomposition algorithms. *Geophysical Prospecting*,
- Candansayar, M. E. 2008. Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 5, 290-300.
- Candansayar, M. E. 2015. Jeofizikte Hasarsız Yapı İnceleme Çalıştayı, 15 Ekim, İzmit Ticaret Odası Konferans Salonu, Jeofizikte Hasarsız Yapı İnceleme Çalıştayı Kitapçığı, 96-102, Kocaeli.
- Candansayar, M.E., 2016. Elektrik yöntemler (Ders notları, Yayınlanmamış, Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü)
- Chen, J. L., Chen, C. H., Kuo, C. L., Fen, C. S., and Wu, C. C. 2016. Estimating groundwater velocity using apparent resistivity tomography: A sandbox experiment. 39.
- Clement, R., and Moreau, S. 2016. How should an electrical resistivity tomography laboratory test cell be designed? Numerical investigation of error on electrical resistivity measurement. *Journal of Applied Geophysics*, 127, 45-55.
- Coggon, J. H. 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, 36, 132-155.
- Çakır A. F. 1994. Türkiye'nin metalik korozyon kaybı, 25-27 Ekim, IV. Korozyon Sempozyumu, 1-8, İTÜ İstanbul
- Demirci, I., Erdoğan, E., and Candansayar, M. E. 2012. Two-dimensional inversion of direct current resistivity data incorporating topography by using finite difference techniques with triangle cells: Investigation of Kera fault zone in western Crete. *Geophysics*, 77(1), E67-E75.

- Demirel, C., and Candansayar, M.E. 2017. Two-dimensional joint inversions of cross-hole resistivity data and resolution analysis of combined arrays. *Geophysical Prospecting*, 65: 876-890.
- Dey, A., and Morrison, H.F. 1979. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures*. *Geophysical Prospecting*, 27, 106–136.
- Dinh, K., Gucunski, N. and Duong, T.H. 2018. Migration-based automated rebar picking for condition assessment of concrete bridge decks with ground penetrating radar. *NDT & E International*, 98, 45-54.
- Du Plooy, R., Lopes, S. P., Villain, G., & Derobert, X. (2013). Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT & E International*, 54, 27-36.
- Erdoğan, E. Doğru akım öz direnç ve manyetotellürik yöntemlerde sonlu elemanlar ile iki-boyutlu düz çözüme topoğrafya etkisinin eklenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Erlandsson, K., Odenstedt, H., Lundin, S., and Stenqvist, O. 2006. Positive end-expiratory pressure optimization using electric impedance tomography in morbidly obese patients during laparoscopic gastric bypass surgery. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 50, 833–839.
- Fan, W., Wang, H, Xue, Q., Cui, Z., Sun, B. and Wang, Q. 2016. Modified sparse regularization for electrical impedance tomography. *Review of Scientific Instruments*, 87.
- Fares, M., Villain, G., Bonnet, S., Lopes, S. P., Thauvin, B., and Thiery, M. 2018. Determining chloride content profiles in concrete using an electrical resistivity tomography device. *Cement and concrete composites*, 94, 315-326.
- Gündoğdu, N. Y., ve Candansayar, M. E. 2018. Three-dimensional regularized inversion of DC resistivity data with different stabilizing functionals. *Geophysics*, 83(6), E399-E407.
- Hallaji, M., Seppänen, A., and Pour-Ghaz, M. 2015. Electrical resistance tomography to monitor unsaturated moisture flow in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 69, 10-18.
- Henderson, R.P. and Webster, J.G. 1978. An impedance camera for spatially specific measurements of the thorax. *JFKF, Transactions on Biomedical Engineering*, 25, 250-254.
- Hojat, A., Ferrario, M., Arosio, D., Brunero, M., Ivanov, V. I., Longoni, L. and Zanzi, L. 2021. Laboratory studies using electrical resistivity tomography and fiber optic techniques to detect seepage zones in river embankments. *Geosciences (Switzerland)*, 11, 1–15.
- Holder, D. S. 1992. Electrical impedance tomography (EIT) of brain function. *Brain Topography*, 5, 87–93.
- Hornbostel, K., Larsen, C.K. and Geiker, M.R. 2013. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate-a literature review. *Cem. Concr. Compos.*, 39 , 60-72.

- Hugenschmidt, J., Kalogeropoulos, A., Soldovieri, F. and Prisco, G. 2010. Processing strategies for high-resolution GPR concrete inspections. *NDT & E International*, 43(4), 334-342.
- Karhunen, K., Seppänen, A., Lehtikoinen, A., Monteiro, P. J., and Kaipio, J. P. 2010. Electrical resistance tomography imaging of concrete. *Cement and concrete research*, 40(1), 137-145.
- Kaufhold, S., Grisseemann, C., Dohrmann, R., Klinkenberg, M., and Decher, A. 2014. Comparison of three small-scale devices for the investigation of the electrical conductivity/resistivity of swelling and other clays. *Clays and Clay Minerals*, 62, 1–12. doi:10.1346/CCMN.2014.0620101
- Kremer, T., Mainault, A. J., Binley, A., Vieira, C., and Zamora, M.. 2012. Modelling the electrical resistivity response to CO₂ plumes generated in a laboratory, cylindrical sandbox. vol. American Geophysical Union, Fall Meeting.
- Kremer, T., Vieira, C., and Mainault, A. 2018. ERT monitoring of gas injection into water saturated sands: Modelling and inversion of cross-hole laboratory data, *Journal of Applied Geophysics*, 158, 11-28.
- LaBrecque, D. J., Sharpe, R., Wood, T., and Heath, G. 2004. Small-scale electrical resistivity tomography of wet fractured rocks. *Groundwater*, 42(1), 111-118.
- Lai, W. W., Dérobert, X. and Annan, P. 2018. A review of Ground penetrating radar application in civil engineering: A 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis. *NDT & E International*, 96, 58-78.
- Lataste, J. F., Sirieix, C., Breysse, D. and Frappa, M. 2003. Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *NDT & E International*, 36 (6), 383-394.
- Loke, M. H., and Barker, R. D. 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical prospecting*, 44(3), 499-523.
- Martinho, E., and Dionísio, A. 2014. Main geophysical techniques used for non-destructive evaluation in cultural built heritage: A review. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11, 163–181.
- Martinho, E., and Dionísio, A. 2014. Main geophysical techniques used for non-destructive evaluation in cultural built heritage: a review. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(5).
- Morris, W., Moreno, E. I., and Sagiics, A. A. 1996. Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a W array probe. 26, 1779–1787.
- Namita, 2022 <https://civildigital.com/major-parts-reinforced-concrete-buildings-framed-structures/> Erişim Tarihi: 16.12.2022
- Niederleithinger, E. 2017. Seismic methods applied to ultrasonic testing in civil engineering. Habilitationsschrift, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Ochs, J., and Klitzsch, N. 2020. Considerations regarding small-scale surface and borehole-to-surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 172.

- Pérez-Gracia, V., Caselles, J.O., Clapés, J., Martinez, G., and Osorio, R. 2013. Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures. *NDT & E International*, 59, 40-47.
- Plati, C., Loizos, A., and Gkyrtis, K. 2020. Assessment of modern roadways using non-destructive geophysical surveying techniques. *Surv Geophys* 41, 395–430.
- Plooy, R. D., Lopes, S. P., Villain, G., and Dérobert, X. 2013. Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT & E International*, 54, 27–36.
- Polimeno, M.R., Roselli, I., Luprano, V.A.M., Mongelli, M., Tati, A. and De Canio, G. 2018. A non-destructive testing methodology for damage assessment of reinforced concrete buildings after seismic events. *Engineering Structures*, 163, 122-136.
- Reichling, K., Raupach, M. and Klitzsch, N. 2015. Determination of the distribution of electrical resistivity in reinforced concrete structures using electrical resistivity tomography. *Mater. Corros.*, 66, 763-771.
- Rhee, JY., Choi, JJ. and Kee, SH. 2019. Evaluation of the depth of deteriorations in concrete bridge decks with asphalt overlays using air-coupled GPR: A case study from a pilot bridge on Korean Expressway. *Int J Concr Struct Mater*, 13, 23.
- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, J. and Betelu, S. 2021. Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, 269.
- Rücker, C. 2010. Advanced electrical resistivity modelling and inversion using unstructured discretization (Doctoral dissertation, Universität Leipzig).
- Sabbağ, N. ve Uyanık, O. 2017. Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 141, 13-23.
- Saenger, E.H., Kocur, G.K., Jud, R. and Torrilhon, M. 2011. Application of time reverse modeling on ultrasonic non-destructive testing of concrete, *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 807-816.
- Sasaki, Y. 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, 54, 254–262.
- Sasaki, Y. 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics* 59.12, 1839-1848.
- Sentenac, P., Hogson, T., Keenan, H., and Kulesa, B. 2015. Small scale monitoring of a bioremediation barrier using miniature electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 115, 24–31.
- Seppänen, A., Karhunen, K., Lehtikainen, A., Kaipio, J. P., and Monteiro, P. J. M. 2009. Electrical resistance tomography imaging of concrete. In *concrete repair, rehabilitation and retrofitting II: 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, 571-577.
- Si, H. 2020 TetGen, A quality tetrahedral mesh generator and 3D delaunay triangulator version 1.6 user's manual. <https://wias-berlin.de/software/tetgen/>. Erişim Tarihi: 03.01.2022

- Tasker, L., Karrech, A., Shragge, J. and Josh, M. 2018. Time-lapse monitoring of internal alteration of a concrete structure using ground penetrating radar. *Construction and Building Materials*, 191, 300-310.
- Topçu, A. 2022, Betonarme-I (Ders Notları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü). <https://insaat.ogu.edu.tr/Personel/Detay/46/prof-dr-ahmet-topcu> Erişim Tarihi: 24.02.2022
- Verdet, C., Anguy, Y., Sirieix, C., Clément, R. and Gaborieau, C. 2018. On the effect of electrode finiteness in small-scale electrical resistivity imaging. *Geophysics*, 83 (6), EN39–EN52.
- W. Morris, A. Vico, M. Vazquez and S.R. Sanchez. 2002. Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurement. *Corros. Sci.*, 44, 81-99.
- Wiwattanachang, N. and Giao, P.H. 2011. Monitoring crack development in fiber concrete beam by using electrical resistivity imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 75(2), 294-304.
- Xu, J and Wei, H. 2019. Ultrasonic testing analysis of concrete structure based on s transform. *Shock and Vibration*, vol. 2019, 9 pages.
- Zadhoush H, Giannopoulos A and Giannakis I. 2021. Optimising the complex refractive index model for estimating the permittivity of heterogeneous concrete models. *Remote Sensing*, 13(4), 723.
- Zatar, W., Nguyen, T.T. and Nguyen, H. 2021. Predicting GPR signals from concrete structures using artificial intelligence-based method. *Advances in Civil Engineering*, 9 pages.
- Zhong, S., Wang, Y., Zheng, Y., Wu, S., Chang, X. and Zhu, W. 2021. Electrical resistivity tomography with smooth sparse regularization. *Geophysical Prospecting*, 69(8-9), 1773-1789.

EKLER

EK 1 Tetgen Algoritması ile Basit Kolon Modeli Tasarımı

EK 2 “protocol.dat” Dosyasının Hazırlanması İçin Kullanılan MATLAB Kodu

EK3 Pol-Tripol Dizilimi İçin Örnek “protocol.dat” Dosyası

```

clc; clear all; close all;
xx=[0 0.3];yy=[0 0.725];zz=[0 0.3]; res=100; resatt=1;
[cnc,lc,dnc,ld,enc,lcl,rnc,rncy,rncx,lr,ps,yes,ea,attribute,la]=nodes_refine(xx,yy,zz,res,resatt);
nodes=[cnc;dnc;enc;rnc]; ln=length(nodes); nodes(:,1)=1:ln;
f=zeros(ld/8+1,5);ba=zeros(ld/8+1,5);r=zeros(ld/8+1,5);
l=zeros(ld/8+1,5);t=zeros(ld/8+1,5);bo=zeros(ld/8+1,5);
f(1,:)= [4 1 2 4 3]; ba(1,:)= [4 5 6 8 7]; l(1,:)= [4 5 6 2 1]; r(1,:)= [4 3 7 8 4]; t(1,:)= [4 5 7 3 1]; bo(1,:)= [4 6 8 4 2]; %front,back,righth,left,top,bottom mesh
fn=ones(lcl,2); fn(:,2)=lc+ld+1:lc+ld+lcl; lf=length(fn); %node numbers of electrodes
sayac=1;
for i=2:ld/8+1
    f(i,2:end)=f(1,2:end)+(8*sayac);ba(i,2:end)=ba(1,2:end)+(8*sayac);
    r(i,2:end)=r(1,2:end)+(8*sayac);l(i,2:end)=l(1,2:end)+(8*sayac);
    t(i,2:end)=t(1,2:end)+(8*sayac);bo(i,2:end)=bo(1,2:end)+(8*sayac);
    f(:,1)=4;ba(:,1)=4;r(:,1)=4;l(:,1)=4;t(:,1)=4;bo(:,1)=4;sayac=sayac+1;
end
fnum=((ld/8+lc/8)*6);fname=('basitkolon.poly');file = fopen(fname,'w+');
fprintf(file,'%g %g %g %c\n',ln,3,0,'0');fprintf(file,'%g %g %g %g\n',nodes); %nodes
fprintf(file,'%g %c %c\n',(fnum),'0','0'); %facets
fprintf(file,'%g\n',lf+1);fprintf(file,'%g %g %g %g %g\n',f(1,:));fprintf(file,'%g %g\n',fn);
fprintf(file,'%c\n%g %g %g %g %g\n%c\n%g %g %g %g %g\n%c\n%g %g %g %g %g\n',
'1',ba(1,:), '1',r(1,:), '1',l(1,:));
fprintf(file,'%c\n%g %g %g %g %g\n%c\n%g %g %g %g %g\n', '1',bo(1,:), '1',t(1,:));
for i=2:ld/8+1
    fprintf(file,'%c\n%g %g %g %g %g\n%c\n%g %g %g %g %g\n%c\n%g %g %g %g %g\n',
'1',f(i,:), '1',ba(i,:), '1',r(i,:), '1',l(i,:));
    fprintf(file,'%c\n%g %g %g %g %g\n%c\n%g %g %g %g %g\n', '1',t(i,:), '1',bo(i,:));end
fprintf(file,'%c\n','0'); %holes
fprintf(file,'%g\n',(la)); %attribute number
fprintf(file,'%g %g %g %g %g %g\n',attribute);

```

EK 2 “protocol.dat” Dosyasının Hazırlanması İçin Kullanılan MATLAB Kodu

```
% DD
n=8; a=0; s=1;
for c=1:ps
say=0;
    for k=1:s
        for i=1:n
            for j=1:yes
                if (j+2*k+i+say+(c-1)*yes)<=yes*c
                    a=a+1;
                    A(a,1)=j+(c-1)*yes;B(a,1)=j+k+(c-1)*yes;
                    M(a,1)=j+i+k+say+(c-1)*yes;N(a,1)=j+2*k+i+say+(c-1)*yes;
                end
                say=1+say;
            end, end, end, end
        end
    end
%W
ne=112;
ns=4;
nes=ne/ns;
el=(reshape(1:ne,nes,ns));
nlev=2;
%nlevel=1;
say=1;
for j=1:nlev
    for i=1:nes-3
        A=el(i,1); M=A+j; N=M+j; B=N+j;
        if B<=nes
            elec(say,:)= [A B M N];
            say=say+1;
        end, end, end
    end
end
A_MNB
say=1;
```

```

for tt=5:ns;
    for i=1:(nes-2)
        for k=1:length(sep)
            M=el(i,tt); N=M+sep(k); B=N+sep(k);
            if B<=(ne)
                elec(say,:)= [B M N];
                say=say+1;
            end, end, end, end
        A=repmat((el(1,1):el(end,4))',length(elec),1);
        elec=repmat(elec,(56),1);
        elec=[sort(A) elec];
        elecx=elec;
        for i=2:ns-1
            temp=elecx+nes*(i-1);
            %   elec=[elec;temp];
        end
        electrode=elec;
        p1=ones(length(electrode),8);
        say2=1;
        for m=2:2:8, p1(:,m)=electrode(:,say2); say2=say2+1; end
        b=1:length(p1); p1=[b' p1];
        for i=1:length(p1)
            for j=3:2:9
                if p1(i,j)>yes && p1(i,j)<2*yes+1
                    p1(i,j-1)=2;
                elseif p1(i,j)>2*yes && p1(i,j)<3*yes+1
                    p1(i,j-1)=3;
                elseif p1(i,j)>3*yes && p1(i,j)<4*yes+1
                    p1(i,j-1)=4;
                elseif p1(i,j)>4*yes && p1(i,j)<5*yes+1
                    p1(i,j-1)=5;
                elseif p1(i,j)>5*yes && p1(i,j)<6*yes+1

```

```
p1(i,j-1)=6;
elseif p1(i,j)>6*yes && p1(i,j)<7*yes+1
p1(i,j-1)=7;
elseif p1(i,j)>7*yes && p1(i,j)<8*yes+1
p1(i,j-1)=8;
end, end, end
fname=('protocol.dat'); file = fopen(fname,'w+');
fprintf(file,'%g\n',length(p1));
fprintf(file,'%g %g %g %g %g %g %g %g %g\n',p1);
```



EK 3 Pol-Tripol Dizilimi İçin Örnek “protocol.dat” Dosyası

2912

1 1 1 3 57 3 58 3 59 -118.215
2 1 1 3 58 3 59 3 60 -123.926
3 1 1 3 59 3 60 3 61 -64.2529
4 1 1 3 60 3 61 3 62 -73.2899
5 1 1 3 61 3 62 3 63 -115.143
6 1 1 3 62 3 63 3 64 -118.049
7 1 1 3 63 3 64 3 65 -119.813
8 1 1 3 64 3 65 3 66 -119.984
9 1 1 3 65 3 66 3 67 -128.965
10 1 1 3 66 3 67 3 68 -73.3908
11 1 1 3 67 3 68 3 69 -65.0553
12 1 1 3 68 3 69 3 70 -115.29
13 1 1 3 69 3 70 3 71 -121.301
14 1 1 3 70 3 71 3 72 -121.972
15 1 1 3 71 3 72 3 73 -122.467
16 1 1 3 72 3 73 3 74 -130.018
17 1 1 3 73 3 74 3 75 -93.9877
18 1 1 3 74 3 75 3 76 -60.6492
19 1 1 3 75 3 76 3 77 -111.248
20 1 1 3 76 3 77 3 78 -120.625
21 1 1 3 77 3 78 3 79 -122.482
22 1 1 3 78 3 79 3 80 -122.572
23 1 1 3 79 3 80 3 81 -129.339
24 1 1 3 80 3 81 3 82 -110.404
25 1 1 3 81 3 82 3 83 -56.1856
26 1 1 3 82 3 83 3 84 -103.24
27 1 2 3 57 3 58 3 59 -120.98
28 1 2 3 58 3 59 3 60 -124.332
29 1 2 3 59 3 60 3 61 -62.0776
30 1 2 3 60 3 61 3 62 -71.727
31 1 2 3 61 3 62 3 63 -114.077
32 1 2 3 62 3 63 3 64 -117.254
33 1 2 3 63 3 64 3 65 -119.193
34 1 2 3 64 3 65 3 66 -119.48
35 1 2 3 65 3 66 3 67 -128.542
36 1 2 3 66 3 67 3 68 -73.1068
37 1 2 3 67 3 68 3 69 -64.8121
38 1 2 3 68 3 69 3 70 -115.079
39 1 2 3 69 3 70 3 71 -121.121
40 1 2 3 70 3 71 3 72 -121.817
41 1 2 3 71 3 72 3 73 -122.331
42 1 2 3 72 3 73 3 74 -129.894

.
.
.