

58319



**DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE
MODELLEME VE İKİ-BOYUTLU SIĞ YAPILARIN
ARANMASINDA ELEKTROD DİZİMLERİNİN
AYRIMLILIKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Mehmet Emin CANDANSAYAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

1997

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

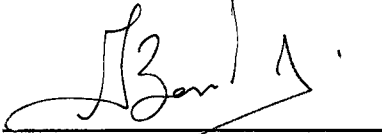
DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE MODELLEME VE
İKİ-BOYUTLU SIĞ YAPILARIN ARANMASINDA ELEKTROD DİZİMLERİNİN
AYRIMLILIKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Mehmet Emin CANDANSAYAR

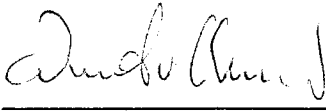
YÜKSEK LİSANS TEZİ

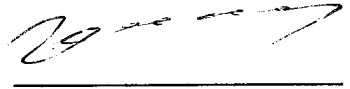
JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 10/ 9/ 1997 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından 100 (Yüz) not taktir edilerek
Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Ahmet T. BAŞOKUR

(Danışman)


Prof. Dr. O. Metin İLKİŞİK


Prof. Dr. Turan KAYIRAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE MODELLEME VE İKİ-BOYUTLU SİĞ YAPILARIN ARANMASINDA ELEKTROD DİZİMLERİNİN AYRIMLILIKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Mehmet Emin CANDANSAYAR

Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Ahmet Tuğrul BAŞOKUR
1997, Sayfa: 154

Jüri : Prof.Dr. Ahmet Tuğrul BAŞOKUR
Prof.Dr. O.Metin İLKİŞİK
Prof.Dr. Turan KAYIRAN

Düz çözüm, varsayılan bir jeolojik modelin oluşturacağı jeofizik belirtiyi hesaplamak şeklinde tanımlanabilir. Doğru akım öz direnç yönteminde yorumlama yaparken 1-B, 2-B ve 3-B modeller kullanılmaktadır.

Doğru akım öz direnç yönteminde aynı jeolojik yapı için farklı elektrod dizilimleri ile ölçülen GÖ değerleri farklı olacaktır. Aynı jeolojik model için farklı elektrod dizilimlerinin ayrımlılıkları teorik veri ile incelenebilir.

Arkeolojik yapıların fiziksel özellikleri genelde bulunduğu ortamın çevre jeolojisinden farklıdır ve bu farklılık jeofizik belirtiye sebep olur. Arkeolojik yapı, genelde belirtinin yanal ve düşey yöndeki değişimine bakılarak belirlenir. Bu nedenle 1-B yorum teknikleri yetersiz kalmaktadır ve 2-B hatta hızlı bir bilgisayar varsa 3-B yorum teknikleri kullanılmalıdır.

Bu çalışmada, doğru akım öz direnç verilerinin sonlu farklar ve sonlu elemanlar sayısal çözüm yöntemleri ile 2-B modellemesi anlatılmıştır. Wenner, iki-yönlü yarım-Wenner ve iki-yönlü üç-elektrod dizilimlerinin arkeolojik yapıların aranmasında kullanılabilirliği yukarıda bahsedilen sayısal çözüm yöntemleri ile incelenmiştir. Yine bu dizilimler için "Sinyal Katkı Kesitleri" (Signal Contribution Section) çizilmiş ve bu kesitler ile de elektrod dizilimlerinin ayrımlılıkları karşılaştırılmıştır.

Ayrıca yanal süreksizliklerin belirlenmesinde kullanılacak "İki Yönlü-Gradyen" (Two-sided gradient) dönüşümü isimli yeni bir veri işlem tekniği tanıtılmıştır. İki yönlü-Gradyen ve Karous and Pernu' nun (1984) tanımladığı Gradyen dönüşümlerinden hangisinin arkeolojik yapıların aranmasında daha kullanışlı olduğu araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Doğru akım öz direnç, 2-B modelleme, sonlu elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi, sinyal katkı kesiti, iki-yönlü üç elektrod dizilimi, iki-yönlü gradyen dönüşümü .

ABSTRACT
Masters Thesis

**MODELING IN DIRECT CURRENT RESISTIVITY METHOD AND
COMPARISON OF THE RESOLUTION OF THE ELECTRODE CONFIGUTATIONS
FOR THE INVESTIGATION OF TWO-DIMENSIONAL STRUCTURES**

Mehmet Emin CANDANSAYAR

**Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Geophysical Engineering**

Supervisor: Prof.Dr. Ahmet Tuğrul BAŞOKUR

1997, Page: 154

**Jury : Prof.Dr. Ahmet Tuğrul BAŞOKUR
Prof.Dr. O.Metin İLKİŞİK
Prof.Dr. Turan KAYIRAN**

The forward solution is defined as computation of the geophysical anomaly corresponding a hypothetical geological model. 1-D, 2-D or 3-D models is traditionally used for the interpretation of the direct current resistivity data.

The measured apparent resistivities are dependent on the electrode configuration e.i., the same geological model will produce different responses for certain electrode configurations in direct current resistivity method. Theoretical data sets corresponding the same geological model can be used to compare the resolution of different electrode configurations.

In general, physical properties of archaeological objects differs from the physical properties of surrounding geology giving sufficient contrast to obtain a geophysical anomaly. Conventionally, an archaeological object can be recognized by examining the lateral and horizontal variation of the anomaly. For this reason, 1-D interpretation technique is not sufficient, then the use of 2-D interpretation technique becomes necessary and 3-D interpretation technique can be used if available computer facilities permit.

In this study, 2-D modeling of direct current resistivity data by finite different and finite element techniques are described. Wenner, two-sided half-Wenner and two-sided three electrode configurations are examined for the investigation of archaeological objects by using the above mentioned numerical methods. The signal contribution section are also constructed for the same configurations for the comparison of their sensitivities to the target bodies.

In addition, a new data analysis technique is introduced, referred as "Two Sided-Gradient", to distinguish lateral discontinues. The investigation of two-sided gradient transformation and gradient transformation given by Karous and Pernu (1985) are carried out to select the successful one locating archaeological objects.

KEY WORDS: Direct current resistivity, 2-D modeling, finite element method, finite different method, signal contribution section, two-sided three electrode configuration, two sided-gradient transformation.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllarda geliştirilen çok-kanallı (multi electrode) doğru akım öz direnç aletleri sayesinde ölçü alımı kolaylaşmıştır. Ayrıca gelişen bilgisayar teknolojisi ve kullanılan sayısal çözüm teknikleri sayesinde doğru akım öz direnç verilerinin 1-B yorumlaması yavaş yavaş bırakılarak 2-B yorumlama teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Hatta 3-B yerin incelenmesinde en uygun yorum tekniği olan 3-B yorumlama tekniklerinin bir kaç yıla kadar kullanılmaya başlanacağı söylenebilir. Yine bu gelişmelere paralel olarak doğru akım öz direnç yöntemi sığ yapıların incelenmesinde de kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada 2-B yorumlamada kullanılan doğru akım öz direnç verilerinin SEY ve SFY ne göre 2-B modellemesi tanıtılmıştır. Ayrıca sığ yapılarının aranmasında en uygun elektrod dizilimi 2-B modelleme ile araştırılmıştır. İncelenen elektrod dizimleri için sinyal katkı kesitleri çizilmiş ve negatif ve pozitif katkı bölgeleri tanıtılmıştır. 2-B süreksizliklerin belirlenmesinde yeni bir veri işlem tekniği tanıtılmıştır.

Bu çalışma konusunu öneren ve çalışmam süresince karşılaştığım sorunlarda bilgilerinden faydalandığım hocam Prof.Dr. Ahmet Tuğrul BAŞOKUR' a çok teşekkür ederim. Ayrıca bilgilerinden yararlandığım sayın Ertan PEKŞEN' e (Utah Univ.), hafta sonları yaptığım çalışmalarını dinleyen ve eleştirilerinden yararlandığım sayın Cemal KAYA' ya (MTA) ve olanaklarından yararlandığım A.Ü. Rektörlüğü BİM' ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	v
SİMGELER VE MATEMATİK SEMBOLLER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
2. MODELLEME (DÜZ ÇÖZÜM)	3
2.1. Model Çalışmalarının Tarihçesi	4
2.2. Genel Bağını	5
2.3. Sonlu Farklar Yöntemi	10
2.3.1. Modelin köşe noktalarında sınır koşullarının uygulanması	14
2.3.2. Fark denklemlerinin elde edilmesi	16
2.3.3. Modelin alanlar ile ayrıştırılması	16
2.3.4. Katsayı dizeyinin kurulması	21
2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi	23
2.4.1. İntegral denkleminin elde edilmesi	24
2.4.2. Alanın elemanlara ayrılması	26
2.4.3. Eleman dizey denkleminin elde edilmesi	27
2.4.4. Genel dizey denkleminin (Global Matrix Equation) elde edilmesi	33
2.5. Gerilim Alanın Çözümü	37
2.6. Gerilimin (x, k_y, z) Uzayından (x, y, z) Uzayına Dönüşümü	40
3. GÖRÜNÜR ÖZDİRENÇ HESABI	42
3.1. Elektrod Dizilimleri	44
3.1.1. Wenner ve iki yönlü yarım-Wenner dizilimi	45
3.1.2. İki yönlü-üç elektrod dizilimi	47
3.2. Homojen ve İzotrop Ortam İçin Sinyal Katkı Kesiti	49
3.2.1. Wenner ve yarım-Wenner elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti	53
3.2.2. İki yönlü-üç elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti	54
3.3. Uygulanan Veri İşlem Teknikleri	54

4. MODELLEMELER	57
4.1. Model 1	61
4.2. Model 2	69
4.3. Model 3	77
4.4. Model 4	77
4.5. Model 5	91
4.6. Model 6	97
4.7. Model 7	97
4.8. Model 8	104
4.9. Model 9	111
4.10. Model 10 ..	118
5. SONUÇLAR	132
KAYNAKLAR ..	135
EKLER	140
EK-A	140
EK-B	146
EK-C	149
EK-D.....	150
EK-E	153

SİMGELER VE MATEMATİK SEMBOLLER DİZİNİ

\vec{B}	manyetik akı (indüksiyon) yoğunluğu, (magnetic induction), (<i>Weber / m²</i>)
C	sonlu farklar ağı için katsayı dizeyi
\vec{c}	toplam akım yoğunluğu (total current density) (<i>A / m²</i>)
\vec{D}	elektrik akı yoğunluğu (electric displacement) (<i>coulomb / m²</i>)
\vec{E}	elektrik alan şiddeti (electric field intensity) (<i>volt / m</i>)
\vec{H}	manyetik alan şiddeti (magnetic field intensity) (<i>amper / m</i>)
\vec{J}_c	iletkenlik akım yoğunluğu (electric current density) (<i>A / m²</i>)
\vec{J}_s	yerdeğiştirme akım yoğunluğu (surface electric current density) (<i>A / m²</i>)
I	elektrik akımı (electric current) (amper)
q	elektrik yük yoğunluğu (charge density) (<i>coulomb / m³</i>)
σ	iletkenlik (conductivity) (<i>siemens</i>)
ρ	özdirenç (resistivity) (<i>ohm - m</i>)
ρ_a	görünür özdirenç (<i>ohm - m</i>)
$\vec{\eta}$	yüzey normal vektör (surface normal vector)
ϕ	gerilim (potential) (<i>volt</i>)
$\delta(x)$	birim fonksiyon (dirac delta function) (<i>1 / m</i>)
$\vec{\phi}$	(x, k_y, z) bölgesinde sonlu farklar ağı için gerilim değerlerini içeren sütun vektör
(e)	eleman (element)
i	elemanın indisi
$\vec{\phi}(x, z)$	(x, k_y, z) bölgesinde elemanın gerilimi (volt)
$\vec{\phi}_i, \vec{\phi}_j, \vec{\phi}_k$	(x, k_y, z) bölgesinde i, j ve k düğüm noktalarındaki gerilim değerleri
k^i	i -elemanı için katsayı dizeyi
s^i	i -elemanı için kaynak değerlerini içeren sütun vektör
u^i	i -elemanı için gerilim değerlerini içeren sütun vektör

K	sonlu elemanlar ağı için katsayı dizeyi
S	nokta akım kaynağını içeren sütun vektör (sonlu farklar ve sonlu elemanlar yönteminde)
U	sonlu elemanlar ağı için gerilim değerlerini içeren sütun vektör
G	gradyen
TSG	iki-yönlü gradyen (two-sided gradient)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. 1-B iletkenlik modeli (a), 2-B iletkenlik modeli (b), 3-B iletkenlik modeli (c)	3
Şekil 2.3.1. Ayrık yeraltı modeli.....	13
Şekil 2.3.2. (i, j) düğümü etrafındaki alan ve komşu noktalar (Dey ve Morrison 1979) ...	18
Şekil 2.3.3. 3 × 3 boyutunda hücre ağı modeli	21
Şekil 2.4.1. Lineer üçgen elemanlara bölünmüş sonlu elemanlar ağının şematik gösterimi (Uchida' dan sonra 1995)	26
Şekil 2.4.2. Lineer üçgen eleman	27
Şekil 2.4.3. Lineer üçgen elemanın düğüm noktalarında $\tilde{\phi}(x,z)$ nin tanımlanması	28
Şekil 2.4.4. Kartezyen koordinatlar sisteminde (x,z); Simgesel bir sonlu elemanlar ağı üzerinde s elemanı (a), bölgesel koordinatlarda s elemanının görünümü (b) (Fenner' den sonra 1975)	29
Şekil 2.4.5. Sekiz lineer üçgen eleman ve dokuz düğüm noktası olan sonlu elemanlar ağı.....	33
Şekil 3.1. Elektrod dizilimlerinin genel gösterimi.....	43
Şekil 3.2. Wenner Dizilimi (a), iki yönlü yarım-Wenner dizilimi (b).....	45
Şekil 3.3. İki-yönlü üç elektrod dizilimi	47
Şekil 3.4. Wenner dizilimi (a) ve yarım-Wenner dizilimi (AMN değerleri) (a=5 m ve n=1,2,3 değerleri için) (b), (c) ve (d) sinyal katkı kesitleri.....	51
Şekil 3.5. İki yönlü-üç elektrod diziliminde, a=5 m ve n=1,2,3 ve 4 değerleri için AMN sinyal katkı kesiti (a), (b), (c) ve (d).....	52
Şekil 4.1. Şematik olarak 2-B yer modeli üzerinde dokuz adet istasyon ve A,B ve C akım elektrodları ile M ve N gerilim elektrodlarının İYÜE dizilimi için farklı AB/2 seviyelerinde profil üzerindeki konumları (a=0.5 m için).....	58
Şekil 4.2. İYÜE dizilimine göre; analitik çözüm, SEY ile 2-B modelleme ve SFY ile 2-B modelleme ile hesaplanan GÖ profil eğrileri (MN=0.5 için AB/2=0.75, 1.25, 1.75, 2.25, 2.75 ve 3.25 m seviyelerinde) ve yer modeli.....	60
Şekil 4.3. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3),	

- AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c)..... 62
- Şekil 4.4. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4). ve yer modeli (c)..... 63
- Şekil 4.5. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB DES eğrileri yer modeli..... 64
- Şekil 4.6. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli 65
- Şekil 4.7. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c) 66
- Şekil 4.8. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c) 67
- Şekil 4.9. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c)..... 70
- Şekil 4.10. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2),

ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4). ve yer modeli (c).....	71
Şekil 4.11. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB DES eğrileri yer modeli.....	72
Şekil 4.12. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli	73
Şekil 4.13. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c)	74
Şekil 4.14. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c)	75
Şekil 4.15. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c).....	78
Şekil 4.16. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4). ve yer modeli (c).....	79
Şekil 4.17. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB DES eğrileri yer modeli.....	80
Şekil 4.18. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli	81
Şekil 4.19. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c)	82

- Şekil 4.20. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c) 83
- Şekil 4.21. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c).....85
- Şekil 4.22. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4). ve yer modeli (c).....86
- Şekil 4.23. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB DES eğrileri yer modeli..... 87
- Şekil 4.24. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli 88
- Şekil 4.25. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c) 89
- Şekil 4.26. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c) 90
- Şekil 4.27. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c).....92

- Şekil 4.28. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1),
 ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3),
 ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi
için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2),
 ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4).
ve yer modeli (c)..... 93
- Şekil 4.29. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2,
AMNB DES eğrileri yer modeli..... 94
- Şekil 4.30. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2,
ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli 95
- Şekil 4.31. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2
değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2
değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c) 96
- Şekil 4.32. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1),
MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3),
AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod
dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti
(b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ
yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c)..... 98
- Şekil 4.33. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1),
 ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3),
 ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi
için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2),
 ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4).
ve yer modeli (c)..... 99
- Şekil 4.34. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2,
AMNB DES eğrileri yer modeli.....100
- Şekil 4.35. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2,
ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli101
- Şekil 4.36. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2),

- TSG* değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c)102
- Şekil 4.37. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), *TSG* değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c)103
- Şekil 4.38. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c)..... 105
- Şekil 4.39. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).....106
- Şekil 4.40. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB DES eğrileri yer modeli.....107
- Şekil 4.41. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli108
- Şekil 4.42. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), *TSG* değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c)109
- Şekil 4.43. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), *TSG* değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c)110
- Şekil 4.44. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti

- (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c)..... 112
- Şekil 4.45. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4). ve yer modeli (c).....113
- Şekil 4.46. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB DES eğrileri yer modeli.....114
- Şekil 4.47. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli115
- Şekil 4.48. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c)116
- Şekil 4.49. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c)117
- Şekil 4.50. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c)..... 119
- Şekil 4.51. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4). ve yer modeli (c)..... 120

- Şekil 4.52. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB DES eğrileri yer modeli.....121
- Şekil 4.53. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli122
- Şekil 4.54. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c)123
- Şekil 4.55. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c)124
- Şekil 4.56. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c)..... 125
- Şekil 4.57. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4). ve yer modeli (c)..... 126
- Şekil 4.58. İki-yönlü üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB DES eğrileri yer modeli.....127
- Şekil 4.59. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, ve Wenner dizilimi DES eğrileri ve yer modeli 128
- Şekil 4.60. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c)129
- Şekil 4.61. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2) ve yer modeli (c)130

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.3.1. $C.\tilde{\phi} = S$ denklem sisteminin açık yazılışı.....	22
---	----



1. GİRİŞ

Zamanla geliştirilen veri işlem teknikleri ve elektronik aygıtlar, jeofiziğin sığ araştırmalarda kullanışlı olmasını sağlamış ve yüzeye yakın arkeolojik kalıntıların bulunmasında da kullanılan bir yöntem olmuştur. Özellikle 1980 yılından sonra arkeolojik sahalarda kazı öncesi çalışmalarda jeofizik yöntemler, en çok da "Doğru Akım Özdirenç" (DAÖ) yöntemi kullanılmaktadır. Arkeolojik amaçlı DAÖ uygulamalarında araştırmacılar farklı elektrod dizilimleri kullanmaktadır.

DAÖ yönteminde bir yer modeli için farklı elektrod dizilimlerine göre ölçülen Görünür Özdirenç' ler ile çizilen yapma kesitlerde farklı olur. Bu nedenle yapılan araştırmanın amacına göre en uygun elektrod diziliminin seçimi önemlidir. Elektrod dizilimlerinin farklı jeolojik yapılar için vereceği belirti analitik olarak (van Nostran and Cook, 1996), Özdirenç Tankı (Resistivity Tank) ve sayısal yöntemlerle (1-B, 2-B ve 3-B modelleme) incelenebilir. Özdirenç tankını kullanarak Apparao(1979) Wenner ve İki nokta elektrod dizilimlerini iletken dayk modeli için incelemiştir, Brizzollari and Bernabini (1979) gömülü bir cisim modeli için Schlumberger ve Odaklanmış dizilimleri incelemiştir. Ayrıca Aktarakçı (1988); Wenner, dipol-dipol ve Gradient dizilimlerini dayk modeli için özdirenç tankı ve sonlu farklar yöntemine göre 2-B modelleme ile incelemiştir. Dittmer and Szymanski (1993) yarım-Wenner, Wenner ve Schlumberger elektrod dizilimini gömülü cisim modeli için sonlu elemanlar yöntemine göre 2-B modelleme ile incelemiştir. Coggon(1973) ise IP elektrod dizilimlerini dayk modeli için, sonlu elemanlar yöntemine göre 2-B modelleme ile incelemiştir.

Bu çalışmada arkeolojik yapıların araştırılmasında kullanılacak en uygun elektrod dizilimini belirlemek için; İki yönlü üç-elektrod dizilimi (İYÜE), iki yönlü yarım-Wenner (İYYW) dizilimi ve Wenner dizilimi 2-B modelleme ile incelenmiştir. Yine bu elektrod dizilimleri için sinyal katkı kesitleri çizilerek incelenmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar ve sonlu farklar sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak uygulanan 2-B modelleme yöntemleri incelenmiştir.

Jeofizik verilerin yorumlanması nitel ve nicel olmak üzere iki grupta toplanabilir. DAÖ verilerinin nitel yorumlanması; GÖ (Görünür Özdirenç) verileri kullanılarak çizilen GÖ

sondaj eğrileri, GÖ profil (seviye) eğrileri, GÖ yapma-kesitleri (Hollof 1957) ve GÖ seviye haritaları ile yapılır. Nicel yorumlamada çeşitli sayısal analiz teknikleri kullanılır. DAÖ verilerinin nicel yorumlamasında S/G (Sinyal/Gürültü) oranını artırıcı işleç olarak; GÖ profil eğrilerine filtre (Orlando et all. 1987, Brizzolari et all. 1989, Tsokas and Tsourlos 1997) ve karşıt-ilişki (cross-corelation) (Bernabini 1986, Bernabini et all. 1987, 1988, Brizzolari et. all 1989, 1992) ve 2-B yapıların belirlenmesinde GÖ profil verilerine "Gradyen Dönüşümü" (Gradient Transformation) (Karous and Pernu 1985) uygulanmaktadır. Bunlardan başka nicel yorumlamada; 1-B, 2-B ve 3-B ters çözüm (Inversion) yapılır.

Maden, jeotermal enerji, yeraltı suyu aramaları ile baraj yeri ve yol güzergahlarının belirlenmesi gibi derin amaçlı mühendislik problemlerinde yüzeye yakın gömülü kütlelerin sinyale katkısı gürültü olarak değerlendirilir. Fakat arkeolojik alanlarda, yüzeye yakın gömülü kütlelerin araştırılması amaçlı çalışmalarda; bu yapıların sinyale katkısı belirti olarak değerlendirilir ve belirginleştirilmeye çalışılır.

Yine bu çalışmada, 2-B yapıların belirlenmesinde kullanılan Karous and Pernu' nun (1985) işlecine benzer yeni bir işleç önerilmiştir. Önerilen yeni işleç ve Karous and Pernu' nun (1985) işleci İYÜE dizilimine göre 2-B modelleme sonucu elde edilen GÖ değerleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan incelemeler doğrultusunda önerilen yeni işlecin arkeolojik yapıların aranmasında daha kullanışlı olduğu söylenebilir.

1.1. Amaç ve Kapsam

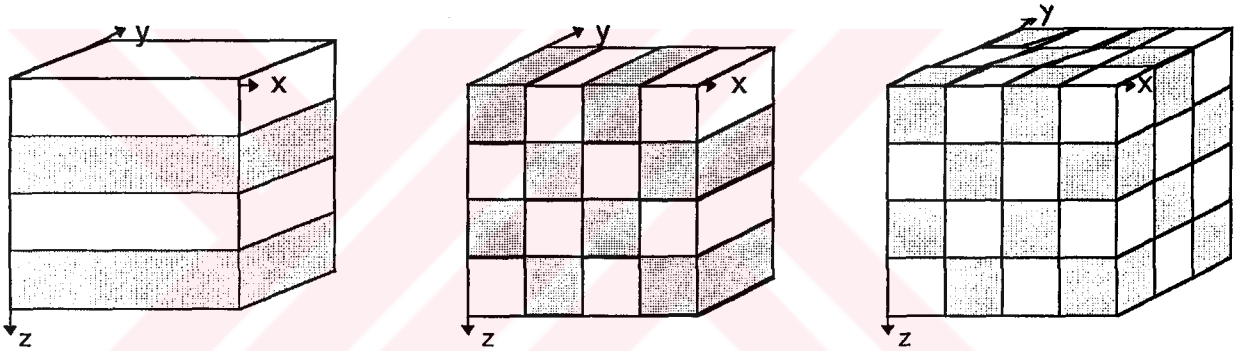
Kazı öncesi jeofizik çalışmalar, aranan yapının yeri, şekli ve doğrultusu hakkında ön bilgi vermektedir. Buda yapılacak arkeolojik kazının zaman, işgücü ve maliyetini düşürdüğünden jeofizik çalışmaların arkeolojik alanlarda kullanımı zorunlu bir hale gelmiştir.

Bu çalışmanın amacı arkeolojik yapıların aranmasında kullanılacak en uygun elektrod dizilimini belirlemektir. Bu amaç için İYÜE yarım-Wenner ve Wenner elektrod dizilimleri 2-B modelleme ile incelenmiştir. DAÖ verilerinin sonlu farklar ve sonlu elemanlar sayısal çözüm yöntemleri ile 2-B modellemede anlatılmıştır. Ayrıca, İYÜE dizilimi verilerine uygulanan ve arkeolojik yapıların aranmasında kullanılan yeni bir işleç tanıtılmıştır.

2. MODELLEME (DÜZ ÇÖZÜM)

Modelleme, varsayılan bir jeolojik modelin jeofizik tepkisinin matematiksel bir bağıntı ile tanımlanması ve bu bağıntı yardımıyla ölçülmesi beklenen değerleri sayısal olarak hesaplamak şeklinde tanımlanabilir.

Modelleme 1-B, 2-B ve 3-B yapılabilir. DAÖ veirlerinin 1-B modellemesinde, iletkenlik dağılımına göre yeriçinin homojen ve izotrop katmanlardan oluştuğu varsayılır (Şekil 2.1.a). 2-B modellemede ise yeriçinin iletkenliğinin x ve z yönünde değişen y yönünde sabit kalan bloklardan oluştuğu varsayılır (Şekil 2.1.b). 3-B modellemede ise yeriçi, iletkenliğe göre kendi içinde homojen ve izotrop küpler' den (hexahedral veya tetrahedral) oluştuğu varsayılır (Şekil 2.1.c).



Şekil 2.1.1-B iletkenlik modeli (a),2-B iletkenlik modeli (b), 3-B iletkenlik modeli (c).

Modelleme yapabilmek için modeli tanımlayan bir matematiksel bağıntı gereklidir. 1-B modellemede bu bağıntı

$$\phi = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} T(\lambda) J_0(\lambda a) d\lambda \quad (2.1)$$

şeklinindedir (Koefod, 1970). Burada I yere uygulanan akım, $T(\lambda)$ dönüşük öz direnç fonksiyonu, $J_0(\lambda a)$ sıfırıncı dereceden birinci cins Bessel fonksiyonu ve ϕ ise gerilimdir. Denklem (2.1) ile ilgili ayrıntılı olarak Başokur' a (1984) bakılabilir.

2-B modellemede ise kullanılan bağıntı,

$$-\nabla(\sigma(x,z).\nabla\phi(x,z))=I(x,z) \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanan Poisson denklemdir. 3-B modellemede ise (2.2) denklemini

$$-\nabla(\sigma(x,y,z).\nabla\phi(x,y,z))=I(x,y,z) \quad (2.3)$$

şeklinde yazılır. (2.2) ve (2.3) denklemlerinde kullanılan değişkenler Bölüm 2.2 de verilmiştir.

Yukarda yazılan model bağıntılar sınır koşulları kullanılarak çözülür.

2.1. Model Çalışmalarının Tarihçesi

DAÖ verilerinin tabakalı bir ortam için 1-B modellemesinde belirti analitik olarak hesaplanabilir. Fakat 2-B ve 3-B modellemede, modeller daha karmaşık olacağından analitik hesap zordur ve hesaplamalar sayısal olarak yapılır. İntegral denklemi, Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar yöntemi, DAÖ verilerinin modellemesinde kullanılan başlıca sayısal hesaplama yöntemleridir. Bunlardan başka Eşdeğer Elektrik Devreleri (Network-Solution Technique, Transmission-Surface Method), Görüntü Kuramı (Alpha-Center) yöntemleri de kullanılmaktadır.

İntegral denklemi yönteminin esasları için Eskola' ya (1992) bakılabilir. DAÖ verilerinin 2-B modellemesinde integral denkleminin kullanılmasını ilk olarak Madden (1967), Dieter ve et all.(1969), Lee (1975) göstermiştir. Bu yöntem ile DAÖ ve elektromanyetikte 3-B modellemeyi ise Barnett (1972), Pratt (1972), Hohmann (1975), Meyer (1976) yapmışlardır.

Sonlu Farklar yöntemi ile DAÖ verilerinin 2-B modellemesini ilk olarak Jepsen(1969) göstermiştir. Yine bu yöntemle Mufti (1976) Neumann sınır koşulunu kullanarak, Dey ve Morrison (1979) ise karışık sınır koşulunu kullanarak DAÖ verilerinin 2-B modellemesini

yapmışlardır. Her ikisinde modellemede self-adjoint diferansiyel denklemi kullanmışlardır. Sonlu farklarla 3-B modellemeyi ise Dey ve Morrison (1979) yapmıştır. Zhao ve Yedlin (1996) ise sonlu farklar ile 3-B modellemede iki yenilik önermişlerdir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile DAÖ verilerinin 2-B modellemesini Coggon(1971) ve Rijo(1977) göstermiştir. Coggon(1971) ve Rijo(1977) 2-B modellemede varyasyonel yöntemi kullanmışlardır. Tong ve Yang (1990) sonlu elemanlar ile 2-B modellemede hesaplamalara topoğrafyanın etkisini de katmışlardır. Queralt ve diğ. (1991) sonlu elemanlar ile modellemede karışık sınır koşulunu uygulamışlardır. Uygulamalarında Coggon(1971) ve Rijo' dan (1977) farklı olarak Galerkin formülasyonunu kullanmışlardır. SEY ile 3-B modellemeyi ise Pridmore (1978) varyasyonel yöntemi kullanarak yapmıştır. Ayrıca Pridmore ve diğ. (1981) basit modeller için sonlu elemanlar, sonlu farklar, integral denklemi ve Transmission-Surface yöntemlerini incelemişlerdir. Yine Molano ve diğ. (1990) 2-B modellemede Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sonlu Farklar Yöntemini karşılaştırmışlardır. Rijo(1977) ise SEY ile İntegral denklemi yöntemi ve analitik yöntemi karşılaştırmıştır.

Elektrik eş-değer devre metodunu elektromanyetik için Qian ve Boerner (1994) kullanmıştır.

Görüntü yöntemi ile 2-B modellemenin temelini Stefanescu ve Stefanescu (1974) vermiştir. Shima(1990) "Alpha Centers" ile 2-B modelleme ve ters çözüm yapmıştır.

2.2.Genel Bağını

Elektromanyetik alanın varlığını ilk öne süren Faraday (1791-1867) olmuştur. Maxwell ise Elektromanyetik (EM) alanı matematiksel olarak,

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \vec{J}_s = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \vec{q} \quad (2.2.4)$$

şeklinde tanımlamıştır. Bu denklemler Maxwell denklemleri olarak bilinir. Burada,

\vec{E} elektrik alan şiddeti (V/m)

\vec{B} manyetik akı yoğunluğu (Weber / m²),

\vec{H} manyetik alan şiddeti (A / m),

\vec{D} elektrik akı yoğunluğu (C / m²),

\vec{J}_c iletkenin elektrik akım yoğunluğu (A / m²),

\vec{J}_s yer değiştirme elektrik akım yoğunluğu (A / m²),

\vec{q} hacim başına düşen birim yük yoğunluğu (A / m²)

dur. Maxwell denklemleri, Hertz(1857-1894) tarafından laboratuvarında deneylerle elde edilmiştir. Bu denklemler kısmi türevli denklemlerdir ve sınır koşulları kullanılarak çözülebilirler.

Elektrik prospeksiyon teorisi, homojen olmayan bir iletken yer için EM alanın genel kuralları kullanılarak geliştirilmiştir (Zhdanov ve Keller, 1994). Doğru akım özdirenç verilerinin modellenmesinde kullanılan Poisson Denklemi, EM alanları tanımlayan Maxwell denklemleri kullanılarak çıkarılabilir. Bu bağıntının çıkarılmasında, akımın süreklilik denklemi ve \vec{E} nin konservatif olması özelliklerinden yararlanılır.

Akımın süreklilik denklemi, Maxwell' in (2.2.1) ve (2.2.4). denklemleri kullanılarak çıkarılabilir. Maxwell' in (2.2.1) denklemine göre değişen bir elektriksel alan varsa iletkenlik akımından ayrı birde yerdeğiştirme akımı vardır ve bu iki akımın toplamı manyetik alanı oluşturur. (2.2.1) eşitliğinin sağ tarafındaki birinci terim iletkenlik akımını, ikinci terim ise yerdeğiştirme akımını ifade eder. (2.2.4) denklemi ise elektrik akı yoğunluğunun diverjansının yük yoğunluğu ile doğru orantılı olduğunu gösterir. Bu

denkleme göre elektrik yük, yerdeğiştirme akımının bir kaynağıdır. (2.2.1) denkleminin her iki tarafının diverjansı alınırsa,

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{H} = \nabla \cdot \left(\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = \nabla \cdot \vec{J}_c + \frac{\partial \nabla \cdot \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2.5)$$

eşitliği elde edilir. Burada rotasyoneli sıfırdan farklı olan bir fonksiyonun rotasyonelinin diverjansının sıfır olması özelliği kullanılarak \vec{H} için,

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{H} = 0$$

yazılabilir. Yukardaki eşitlik ile (2.2.4) denklemini, (2.2.5) denkleminde yerine konursa,

$$\nabla \cdot \vec{J}_c = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.2.6)$$

şeklinde akım yoğunluğu ile yük yoğunluğu arasında doğrusal bir ilişki bulunur. Bu denklem " akımın süreklilik denklemi " olarak bilinir ve kapalı bir bölgede akımın yük hareketinden oluştuğunu ve yüklerin korunduğunu ifade eder.

Denklem (2.2.6) ya göre kaynak civarında yerdeğiştirme akımı, iletkenin akımına eşittir ($\nabla \cdot \vec{J}_c = \nabla \cdot \vec{J}_s$). Bu denklem 3-B uzayda merkezdeki (0,0,0) nokta akım kaynağı için, I (Amper) nokta akım kaynağından uygulanan akım olmak üzere,

$$\nabla \cdot \vec{J}_c = \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \delta(x)\delta(y)\delta(z) = I\delta(x)\delta(y)\delta(z) \quad (2.2.7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada δ birim impuls fonksiyonudur (impuls function, dirac delta function). Eğer nokta akım kaynağı 3-B uzayda herhangi bir (x_s, y_s, z_s) noktasında ise denklem,

$$\nabla \cdot \vec{J}_c = I \cdot \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.2.8)$$

olur. Bu denklemde, $f(x, y, z)$ üç boyutlu bir fonksiyon olmak üzere, birim impuls fonksiyonunun,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z) \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = f(x_s, y_s, z_s)$$

özelliği kullanılmıştır.

Homojen ve izotrop bir ortamda iletkenin akım yoğunluğu ile elektrik alan şiddeti arasında,

$$\vec{J}_c = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.2.9)$$

şeklinde doğrusal bir ilişki vardır ve bu ilişki "Ohm Kanunu" olarak bilinir. Burada σ (*Siemens / m*) ortamın izotropik elektrik iletkenliğidir. Özetlenliğin tersine özdirenç denir ($\rho = 1/\sigma$) (*Ohm . m*). Özdirenç bir tensördür.

Statik elektrik alanın konservatif olması nedeni ile (bir fonksiyonun gradyentinin çizgisel integralinin; gidilen yoldan bağımsız olması, fonksiyonun sadece uç noktalarına bağlı olması),

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (2.2.10)$$

yazılabilir. Burada ϕ -gerilim olarak bilinmektedir. ϕ skaler bir büyüklüktür ve birimi Volt' tur (*Joule / Coulomb*). Bu denklem kapalı bir alanda \vec{E} nin, skaler gerilimin gradyentinin negatif işaretlisine eşit olduğunu gösterir. (2.2.10) denklemi (2.2.9) da yerine konursa,

$$\vec{J}_c = -\sigma \cdot \nabla \phi \quad (2.2.11)$$

elde edilir. Denklem (2.2.11), (2.2.8) de yerine konursa,

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] = I \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \quad (2.2.12)$$

bulunur. Bu denklem Poisson denklemi olarak bilinir ve sadece kaynak civarında geçerlidir. Denklem (2.2.12), 3-B uzay için yazılmıştır. 2-B modelleme için iletkenlik dağılımının y-yönünde değişmediği kabul edilirse,

$$\frac{\partial}{\partial y} [\sigma(x, y, z)] = 0 \quad (2.2.13)$$

yazılabilir. Bu kabul (2.2.12) denklemine uygulanırsa,

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \phi(x, y, z)] = I \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \quad (2.2.14)$$

eşitliği elde edilir.

Denklem (2.2.14) de, nokta akım kaynağı ve gerilim; x, y ve z değişkenlerinin fonksiyonudur. Fakat iletkenlik x ve z değişkenlerinin fonksiyonudur. Hesaplamaların kolay yapılabilmesi için Fourier cosinüs dönüşümü ile (x, y, z) yerine, (x, k_y, z) uzayında işlemler yapılır. Bu amaç için,

$$\tilde{f}(x, k_y, z) = \int_0^{\infty} f(x, y, z) \cos(y k_y) dy \quad (2.2.15)$$

$$f(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \tilde{f}(x, k_y, z) \cos(y k_y) dk_y \quad (2.2.16)$$

dönüşüm çifti kullanılır. Burada $f(x, y, z)$ ve $\tilde{f}(x, k_y, z)$ çift fonksiyonlardır. Denklem (2.2.15), (x_s, y_s, z_s) noktasındaki nokta kaynak için, iki boyutlu iletkenlik $(\sigma(x, z))$ dağılımından oluştuğu varsayılan, 3-B gerilim $(\phi(x, y, z))$ dağılımını 2-B gerilim dağılımına $(\phi(x, k_y, z))$ çevirir.

Helmholtz denklemi ve Fourier dönüşümünün özelliklerinden yararlanarak (2.2.14) denklemi cosinüs dönüşümü sonucu (x, k_y, z) uzayında aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$-\nabla \cdot (\sigma(x, z) \nabla \tilde{\phi}(x, k_y, z)) + k_y^2 \sigma(x, z) \tilde{\phi}(x, k_y, z) = I \delta(x - x_s) \cdot \delta(z - z_s) \quad (2.2.17)$$

Bu ifade k_y nin sabit bir değeri içindir. 2-B modellemede 3-B nokta akım kaynağının kullanıldığı problemler 2.5-B (two and a half dimensional) problem olarak isimlendirilebilirler (Petrov, 1995). Çünkü denklem (2.2.17) de görüldüğü gibi frekans uzayında, k_y katsayısına bağlı olarak y - yönündeki iletkenlik değişimide bir terimle eklenmiştir. Denklem (2.2.17) aşağıdaki sınır koşulları ile çözülür.

1. $\phi(x, y, z)$ gerilimi, $\sigma(x, z)$ iki boyutlu iletkenlik dağılımının bütün sınırlarında sürekli olmalıdır.
2. $\vec{J} (\equiv \sigma \frac{\partial \phi}{\partial \eta})$ akım yoğunluğunun normal bileşeni bütün sınır yüzeylerinde sürekli olmalıdır (Dey ve Morrison 1979).

2.3. Sonlu Farklar Yöntemi

Sonlu farklar yöntemi (SFY), diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerden biridir.

Matematik ve fizik problemler genellikle sürekli ve çok değişkenlidirler. Bu fonksiyonlar bir formül şeklinde verilebilirler ve değişkenlerin belli değerleri için fonksiyonunun değeri bulunabilir. Bununla beraber bir fonksiyon sadece bir takım ayrık noktalarda da belirlenmiş olabilir. O zaman sonlu farklar matematiği kullanılarak bilinmeyen noktadaki fonksiyonun değeri için iyi bir tahmin yapılabilir. Hatta bazı durumlarda problemin analitik çözümü olduğu halde, sonlu farklar matematiği ile problemin çözümü tercih edilir (Aktaş ve diğ., 1981, s. 263).

DAÖ verilerinin 2-B modellemesinde kullanılan Poisson denklemi sürekli bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun 2-B ayırık bir yer modelinde değeri sonlu farklar ile hesaplanabilir. DAÖ verilerinin sonlu farklar ile modellemesi uzaklık ortamında (Mufti,1976) veya frekans ortamında (Dey ve Morrison, 1979) yapılabilir. 2-B modellemede iletkenlik dağılımının y-yönünde değişmediği kabul edilir. Burada nokta akım kaynağı kullanılıyorsa , bu kaynağın yarattığı gerilim 3-B dur. Mufti (1976) uygulamasında nokta akım kaynağını da 2-B kabul etmiştir ($I(x,z)$). Dey ve Morrison (1979) ise bu kaynağı 3-B kabul etmişlerdir ($I(x,y,z)$) ve hesaplama kolaylığı açısından Fourier cosinüs dönüşümü (denklem 2.15) ile $y-k_y'$ ye dönüştürerek (x,k_y,z) uzayında işlemleri yapmışlardır. Buna göre, Mufti' nin (1976) uygulamasına 2-B modelleme, Dey ve Morrison' un (1979) uygulamasına ise 2.5-B modelleme denebilir. Burada sadece frekans uzayında 2-B modelleme anlatılacaktır.

U ve A kartezyen koordinatlar sisteminde kısmi türevleri alınabilen fonksiyonlar olmak üzere ,

$$-\nabla \cdot (UA) = (\nabla U) \cdot A + U(\nabla \cdot A)$$

özellği σ ve ϕ ninde kısmi türevleri hesaplanabildiğinden (2.2.14) denklemine uygulanırsa

$$\nabla \sigma(x,z) \cdot \nabla \phi(x,y,z) + \sigma(x,z) \cdot \nabla^2 \phi(x,y,z) = \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \delta(x-x_s) \cdot \delta(y-y_s) \cdot \delta(z-z_s) \quad (2.3.1)$$

elde edilir.

$$\nabla \sigma(x,z) \cdot \nabla \phi(x,y,z) = \frac{1}{2} \left[-\sigma(x,z) \nabla^2 \phi(x,y,z) + \nabla^2 (\sigma(x,z) \phi(x,y,z) - \phi(x,y,z) \nabla^2 \sigma(x,z)) \right]$$

vektörel ilişkisi kullanılırsa (2.3.1) denklemi,

$$\begin{aligned} \nabla^2 \{ \sigma(x, z) \phi(x, y, z) \} + \sigma(x, z) \cdot \nabla^2 \phi(x, y, z) - \phi(x, y, z) \cdot \nabla^2 \sigma(x, z) = \\ - \frac{2 \partial q}{\partial t} \cdot \delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s) \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Helmotz denklemi ve Fourier dönüşümünün özelliklerinden yararlanarak yukardaki denklemin Fourier cosinüs dönüşümü sonucu (x, k_y, z) uzayında aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \{ \sigma(x, z) \tilde{\phi}(x, k_y, z) \} + \sigma(x, z) \nabla^2 \tilde{\phi}(x, k_y, z) - \tilde{\phi}(x, k_y, z) \nabla^2 \sigma(x, z) \\ - 2k_y^2 \sigma(x, z) \tilde{\phi}(x, k_y, z) = -2 \tilde{Q} \delta(x - x_s) \delta(z) \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Bu bağıntıdaki \tilde{Q} parametresi (x, k_y, z) uzayında

$$\tilde{Q} = \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial t}$$

ile verilir. \tilde{Q} ile akım yoğunluğu arasında

$$\tilde{Q} = \frac{I}{2\Delta A} \quad (2.3.4)$$

ilişkisi vardır. Buradaki ΔA , I akımının etki noktası etrafındaki alanını göstermektedir.

(2.2.17) ve (2.3.3) denklemlerinin genel biçimi

$$\begin{aligned} - \frac{\partial}{\partial x} \left(p(x, z) \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x}(x, k_y, z) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(p(x, z) \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z}(x, k_y, z) \right) \\ + \sigma(x, z) \tilde{\phi}(x, k_y, z) = f(x, z); \quad (x, z) \in R \end{aligned} \quad (2.3.5)$$

şeklinde dir. Bu ifade kapalı ve birbiriyle bağlantılı, içi boş olmayan ve Γ sınırında oldukça düzenli, dışı doğru normal η olan bir bölgede tanımlanmaktadır. $\tilde{\phi}$ gerilimi

$$\alpha(x, z) \tilde{\phi} + \beta(x, z) \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} = f_2(x, z); \quad (x, z) \in \Gamma \quad (2.3.6)$$

koşulunu sağlamalıdır. Bu koşul karışık sınır şartı olarak bilinir. $\tilde{\phi}$ fonksiyonu sınırlarda verilmiştir ve bölge içinde aranmaktadır. Burada R modelin bütün sınırlarını göstermektedir. Γ ise yüzey dışında, diğer sınır bölgelerini göstermektedir. R bölgesinde en azından parçalı sürekli olan p ve f fonksiyonları

$$p(x, z) > 0 \text{ ve } \sigma(x, z) > 0; \quad (x, z) \in R$$

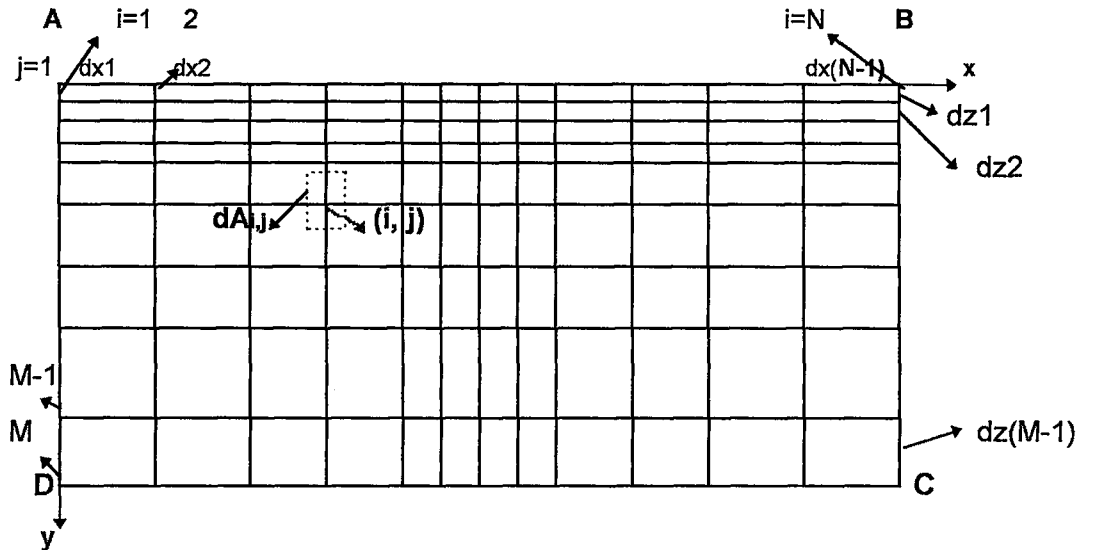
ve Γ sınırında

$$\alpha(x, z) \geq 0, \beta(x, z) \geq 0; \quad \alpha + \beta > 0; \quad (x, z) \in \Gamma$$

koşullarını sağlamalıdır. Çözülmesi gereken asıl bağıntı

$$L \tilde{\phi} = -\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \tilde{\phi}] = f(x, z)$$

şeklindedir. Burada L dizeyi iletkenlik değerlerine ve modelin geometrisine bağlıdır



Şekil 2.3.1 Ayrık yeraltı modeli.

R bölgesi, yani ABCD bölgesinde gelişigüzel iletkenlik dağılımı tanımlansın. Bu bölgenin sınırlarında Δx ve Δz değerleri diğer hücre aralıklarına oranla çok büyük seçilerek yapay sonsuz sınırlar oluşturulmaya çalışılır. Şekil 2.3.1 de oluşturulan yeraltı modelinde x yönünde düğümler $i=1,2,\dots,N$; z yönünde düğümler $j=1,2,\dots,M$ şeklinde gösterilmiştir. Yarısız kesitin sol ve sağ tarafından $i=1, i=N, j=1$ ve $j=M$ satır ve kolonlarının yapay sonsuz sınırlarda olduğu varsayılır. Nokta akım kaynağından oluşan birincil gerilim ve süreksizliklerden dolayı oluşan ikincil gerilimler (x,y,z) uzayında uzaklığa bağlı olarak azalmaktadır. Bu durum dönüşüm uzayı $K_0(k_y, r)$ içinde geçerlidir. Burada K_0 değiştirilmiş Bessel fonksiyonu, r ise kaynaktan olan dik uzaklıktır.

Yeterli sayıda $M \times N$ düğüm noktası seçildikten sonra modelin köşe noktalarında sınır koşulları uygulayarak (2.2.17) ve (2.3.3) denklemleri her bir (i, j) düğüm noktası için yazılır. Bu uygulama ΔA alanı içinde kalan düğüm noktasında geçerlidir. Modelin içindeki bir nokta akım kaynağı için bu alan

$$\Delta A = \frac{(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})}{4}$$

ile verilir. Nokta akım kaynağı yüzeyde ise, z limiti sıfır olacağından bu alan

$$\Delta A = \frac{(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})\Delta z_j}{4}$$

şeklinde olur.

2.3.1. Modelin köşe noktalarında sınır koşullarının uygulanması

R bölgesinde tanımlanan iletkenlik değerlerinden bazı (x,z) noktalarına sınır koşullarının uygulanması gerekmektedir. Γ yüzeyi göstermek üzere modeldeki her bir (x,z) noktası $\in \Gamma \cup R$ koşulunu sağlamalıdır. Yüzeyde $z=0$ seçilmesi Neumann sınır koşulunu sağlar.

Bu

$$\sigma_{i,j} \frac{\partial \tilde{\phi}_{i,j}}{\partial \eta} = 0, \quad i=1,2,\dots,N \text{ ve } j=1$$

ile gösterilir. Modelde oluşturulmaya çalışılan yapay sonsuz sınırlar $x = \pm\infty$ ve $z = \infty$ şeklinde düşünülür. Bu koşulun kabul edilebilmesi için nokta akım kaynağının sınırdan yeterince uzak olması gerekmektedir. Klasik sınır koşulları, yani yüzeyde Neumann ve diğer sınırlarda Dirichlet sınır koşulları uygulandığında iyi sonuç alabilmek için modelin sınırlarında Δx ve Δz adımları iç noktalardaki adımlara göre çok büyük olmalıdır (Mufti 1976). Sınırlarda; sağ, sol ve tabanda modeli oluşturan iletkenlik dağılımına bağlı olarak, gerilim eğrilerinde bozulmalar olmaktadır. Normalde Dirichlet tipi sınır koşulu, sağ, sol ve tabanda $\phi(i,j) = 0$ değeri verilerek uygulanır. Modellerde bu sınır koşulunun uygulanması çok büyük sınırlar gerektirmektedir.

Akım kaynağı sınırlardan yeterince uzaksa ϕ , $\frac{\partial \phi}{\partial \eta}$ asimptotik davranışından yararlanarak karışık sınır koşulları uygulanabilir (Dey and Morrison,1976). Eğer akım kaynağı sınırlardan yeterince uzaksa $\tilde{\phi}$, (x, k_y, z) uzayında

$$\tilde{\phi}(x, k_y, z) = A K_0(k_y \cdot r)$$

şeklinde verilir. Burada, r kaynaktan olan dik uzaklık ve A sabittir. Buradan

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{\phi}(x, k_y, z)}{\partial \eta} &= -A k_y K_1(k_y \cdot r) \cdot \hat{e}_r \cdot \hat{\eta} \\ &= -A k_y K_1(k_y \cdot r) \cdot \cos \theta \end{aligned}$$

yazılabilir. Burada, θ alan vektörü \hat{e}_r ile normal vektörü arasındaki açıdır. Bu özelliklerden,

$$\frac{\partial \tilde{\phi}(x, k_y, z)}{\partial \eta} + \alpha \tilde{\phi}(x, k_y, z) = 0$$

$$\alpha = \frac{k_y K_1(k_y, r)}{K_0(k_y, r)}$$

biçiminde yazılabilir (Dey ve Morrison 1979).

Karışık sınır koşulu, Dirichlet ve Neumann sınır koşulundan daha küçük boyutlu modeller için problemin çözümünü sağlar. Dirichlet ve Neumann sınır koşulunda sınırlara değer verilirken, karışık sınır koşulunda buna gerek yoktur. Modele göre sınır değerleride değişmektedir. Yani ϕ ve $\frac{\partial \phi}{\partial \eta}$ fonksiyonlarının değeri iletkenlik, derinlik ve uzaklığa bağlı olarak değişmektedir. Farklı iki akım noktasının dik uzaklıkları eşit ise, bu noktalarda hesaplanan gerilim değerleri yaklaşık olarak eşittir. Asimptotik limitte tanımlanan α hesaplamalarda hatayı arttırmaz. Karışık sınır koşulu ile çözülen $\tilde{\phi}$ nin sınır değerleri ile analitik çözümün iyi uyum sağladığı gözlenmiştir (Dey ve Morrison 1979).

2.3.2. Fark denklemlerinin elde edilmesi

Fark denklemleri model bölgesinin, noktalarla veya alanlarla ayrıklaştırılması ile elde edilir. Noktalarla ayrıklaştırma sonucu elemanlar birbirlerinin komşu noktalardaki değerlerinden etkilenirler. Alanda ayrıklaştırma sonucunda ise ortadaki bir nokta etrafındaki küçük bir alandan etkilenir. Noktalarla ayrıklaştırmada denklem (2.3.3) kullanılır. Alanda ayrıklaştırmada ise denklem (2.2.17) kullanılır. Bu tezde sonlu farklar ile yapılan modeller alanda ayrıklaştırmayı kullanarak çözüm bulan Dey' in (1976) bilgisayar programı ile yapılmıştır. Burada sadece alanlarla ayrıklaştırma ile modelleme anlatılacaktır. Ayrıca sınır koşullarının nasıl ve hangi bağıntılarla uygulanacağıda gösterilecektir. Noktalarla ayrıklaştırma için Pekşen' e (1995) bakılabilir.

2.3.3. Modelin alanlar ile ayrıklaştırılması

R bölgesinde herhangi bir düğüm noktası, bilinmeyen $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ ler için 'self-adjoint' eliptik diferansiyel denklem (2.2.17) yi Dey ve Morrison (1979)

$$-\nabla \cdot (\sigma(x, z) \nabla \tilde{\phi}(x, k_y, z)) + k_y^2 \sigma(x, z) \tilde{\phi}(x, k_y, z) = \tilde{Q} \cdot \delta(x_s) \cdot \delta(z_s) \quad (2.2.17.b)$$

şeklinde tanımlamıştır. Denklem (2.3.6) ile verilen sınır koşulu

$$\beta \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} = f_2(x, z) - \alpha(x, z) \tilde{\phi}$$

biçiminde yazılabilir. Burada $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ ve $\alpha + \beta > 0$ koşulları sağlanmalıdır ($\Gamma \cup R$). İletkenlik dağılımının her (i, j) düğüm noktasında yukarıdaki denklemin sayısal çözümü yapılmalıdır.

Denklem (2.2.17.b) nin her bir (i, j) noktası için integrali bilinmeyen $\tilde{\phi}_{i,j}$ ler için

$$\begin{aligned} & - \iint_{\Delta A_{i,j}} \nabla \cdot \{ \sigma(x_i, z_j) \nabla \tilde{\phi}(x_i, k_y, z_j) \} dx_i dz_j + \iint_{\Delta A_{i,j}} k_y^2 \sigma(x_i, z_j) \tilde{\phi}(x_i, k_y, z_j) dx_i dz_j \\ & = \iint_{\Delta A_{i,j}} \tilde{Q} \delta(x_s) \delta(z_s) dx_i dz_j \end{aligned} \quad (2.3.7)$$

şeklinde olur. Denklem (2.3.4) kullanılarak yukardaki eşitlik

$$\begin{aligned} & - \iint_{\Delta A_{i,j}} \nabla \cdot \{ \sigma(x_i, z_j) \nabla \tilde{\phi}(x_i, k_y, z_j) \} dx_i dz_j + \iint_{\Delta A_{i,j}} k_y^2 \sigma(x_i, z_j) \tilde{\phi}(x_i, k_y, z_j) dx_i dz_j \\ & = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s) \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

şeklinde yazılabilir. Green teoremi kullanılarak,

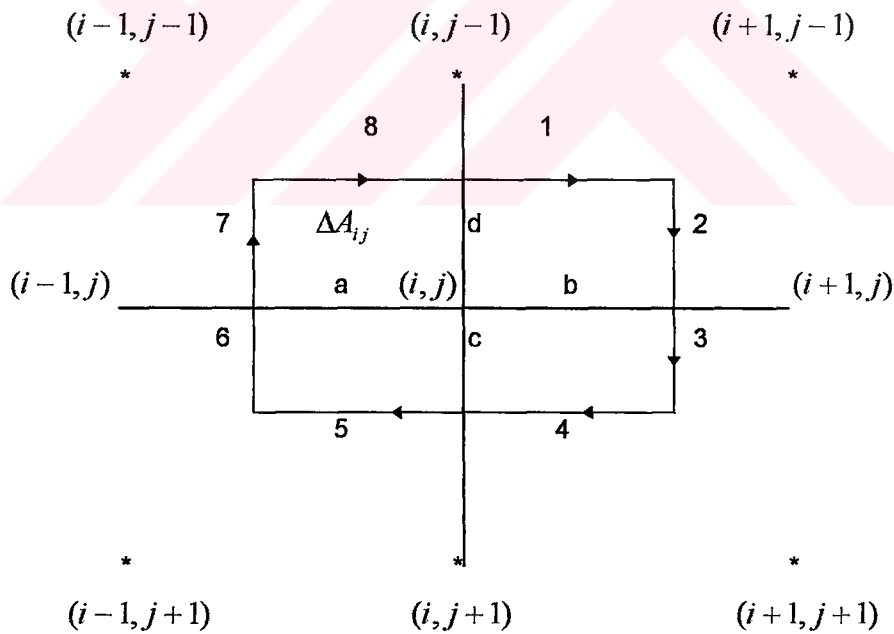
$$\int_v (\sigma \nabla^2 \tilde{\phi} + \nabla \sigma \cdot \nabla \tilde{\phi}) dv = \int_s (\sigma \nabla \tilde{\phi}) ds$$

eşitliği yazılabilir. Burada σ ve $\tilde{\phi}$ skaler fonksiyonlardır. Bu özellikten yararlanarak

$$\iint_{\Delta A_{i,j}} \nabla \cdot (\sigma \nabla \tilde{\phi}) da = \oint_{L_{i,j}} \sigma \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} dl \quad (2.3.9)$$

yazılabilir. Burada η dışa doğru normal vektör ve $L_{i,j}$, $\Delta A_{i,j}$ alanını çevreleyen sınırları göstermektedir. Şekil 2.3.2 de hücre ağının içinde herhangi bir (i, j) noktası etrafındaki alan, $L_{i,j}$ konturu ve komşu düğüm noktaları gösterilmiştir. Denklem (2.3.9) a göre (2.3.8) bağıntısının ilk terimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$- \iint_{\Delta A_{i,j}} \nabla \cdot (\sigma_{i,j} \nabla \tilde{\phi}_{i,j}) dx_i dz_j = - \oint_{L_{i,j}} \sigma_{i,j} \frac{\partial \tilde{\phi}_{i,j}}{\partial \eta} dl$$



Şekil 2.3.2. (i, j) düğümü etrafındaki alan ve komşu noktalar (Dey ve Morrison 1979).

Şekil 2.3.2 den de görülebileceği gibi $\Delta A_{i,j}$ alanını sınırlayan L konturu boyunca sekiz parçaya bölünüp integrali hesaplanabilir. Bu integral sekiz parçalı alınabilir. $\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta}$ ifadesinin merkezi farklar ile yaklaşık olarak değeri

$$\begin{aligned}
\oint_{L_{i,j}} \sigma_{i,j} \frac{\partial \tilde{\phi}_{i,j}}{\partial \eta} dl &= \frac{\Delta x_i \sigma_{i,j-1}}{2} \left(\frac{\tilde{\phi}_{i,j-1} - \tilde{\phi}_{i,j}}{\Delta z_{j-1}} \right) + \frac{\Delta z_{j-1} \sigma_{i,j-1}}{2} \left(\frac{\tilde{\phi}_{i+1,j} - \tilde{\phi}_{i,j}}{\Delta x_i} \right) \\
&+ \frac{\Delta z_j \sigma_{i,j}}{2} \left(\frac{\tilde{\phi}_{i+1,j} - \tilde{\phi}_{i,j}}{\Delta x_i} \right) + \frac{\Delta x_i \sigma_{i,j}}{2} \left(\frac{\tilde{\phi}_{i-1,j-1} - \tilde{\phi}_{i,j}}{\Delta z_j} \right) \\
&+ \frac{\Delta x_{i-1} \sigma_{i-1,j}}{2} \left(\frac{\tilde{\phi}_{i-1,j-1} - \tilde{\phi}_{i,j}}{\Delta z_j} \right) + \frac{\Delta z_j \sigma_{i-1,j}}{2} \left(\frac{\tilde{\phi}_{i-1,j} - \tilde{\phi}_{i,j}}{\Delta x_{i-1}} \right) \\
&+ \frac{\Delta z_{j-1} \sigma_{i-1,j-1}}{2} \left(\frac{\tilde{\phi}_{i-1,j} - \tilde{\phi}_{i,j}}{\Delta x_{i-1}} \right) + \frac{\Delta x_{i-1} \sigma_{i-1,j-1}}{2} \left(\frac{\tilde{\phi}_{i,j-1} - \tilde{\phi}_{i,j}}{\Delta z_{j-1}} \right)
\end{aligned} \tag{2.3.10}$$

ile verilir (Dey ve Morrison 1979). Benzer şekilde (2.3.10) bağıntısının sol tarafında bulunan ikinci terim ise

$$\iint_{\Delta A_{i,j}} k_y^2 \sigma_{i,j} \tilde{\phi}_{i,j} dx_i dz_j = k_y^2 \tilde{\phi}_{i,j} \left[\frac{\sigma_{i-1,j-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\sigma_{i,j-1} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\sigma_{i,j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_j}{4} + \frac{\sigma_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_j}{4} \right] \equiv A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \cdot \tilde{\phi}_{i,j} \tag{2.3.11}$$

şeklinde yazılabilir. (2.3.10) ve (2.3.11) ifadeleri fark yaklaşımlarıyla ortadaki bir (i, j) noktası için (2.3.8) denkleminde yararlanarak

$$C_L^{ij} \tilde{\phi}_{i-1,j} + C_R^{ij} \tilde{\phi}_{i+1,j} + C_T^{ij} \tilde{\phi}_{i,j-1} + C_B^{ij} \tilde{\phi}_{i,j+1} + C_P^{ij} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s) \tag{2.3.12}$$

şeklinde gösterilebilir. Burada bağlantı katsayıları (i, j) ve $(i-1, j)$ düğümleri için

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1} + \Delta z_j \cdot \sigma_{i-1,j}}{2\Delta x_{i-1}} \right]$$

(i, j) ve $(i+1, j)$ düğümleri için

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i,j-1} + \Delta z_j \cdot \sigma_{i,j}}{2\Delta x_i} \right]$$

(i, j) ve $(i, j-1)$ düğümleri için

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1} + \Delta x_i \cdot \sigma_{i,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right]$$

(i, j) ve $(i, j+1)$ düğümleri için katsayılar

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j} + \Delta x_i \cdot \sigma_{i,j}}{2\Delta z_j} \right]$$

ile verilir. (i, j) noktasında bağlantı katsayısı

$$C_P^{ij} = - \left[C_L^{ij} + C_R^{ij} + C_T^{ij} + C_B^{ij} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right] \quad (2.3.13)$$

şeklinde olur (Dey and Morrison 1979).

Denklem (2.3.12) de görüldüğü gibi gerilimin (i, j) noktasındaki değerinin çözümü, kendisine komşu $(i-1, j), (i+1, j), (i, j+1), (i, j-1)$ düğüm noktalarındaki gerilim değerlerine bağlı çözülür. Burada düğüm noktası katsayıları bir model için önceden bilinir.

Bu katsayılar, modelin geometrisine ve iletkenliğine bağlıdır. Farklı modellerin bağlantı katsayıları farklı olur. Nokta akım kaynağının farklı konumları için aynı C düzeyi kullanılır.

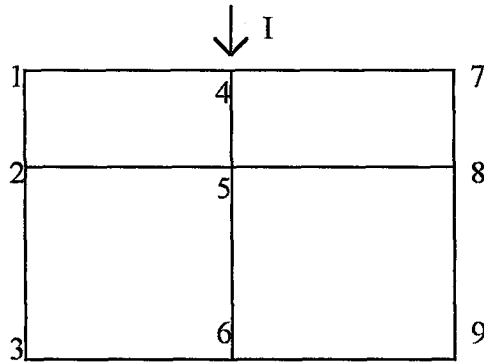
Γ sınırında (yüzeyde) sınır koşulları uygulanırken (2.3.6) sınır koşulu ifadesinde $\alpha = 0$, $\beta = \sigma_{i,j}$ ve $f_2 = 0$ alınır. Sağ ve sol köşelerde sınır boyunca

$$\alpha = \frac{k_y K_1(k_y \cdot r)}{K_0(k_y \cdot r)}, \quad \beta = 1 \text{ ve } f_2 = 0$$

koşulu uygulanır. Sınırlarda bağlantı katsayılarının hesabı Ek-A da verilmiştir (Dey ve Morrison 1979).

2.3.4. Katsayı düzeyinin kurulması

Alanda ayrıklaştırma sonucu bütün (i, j) düğümleri için elde edilen C_B, C_L, C_T, C_R ve C_P katsayıları "Kapasitans veya Özdirenç Dizeyi" olarak isimlendirilen düzeyin oluşturulmasında kullanılır. Kapasitans düzeyinin oluşturulmasını daha iyi anlamak için 3x3 boyutunda bir model düşünelim. Aslında modelin düşey ve yatay boyutları eşit olmayabilir. Fakat katsayı düzeyi MNxMN boyutunda, bir kare düzeydir.



Şekil 2.3.3. 3x3 boyutunda hücre ağı modeli.

Daha önceki bölümlerde bulunan, modelin iletkenliğine ve geometrisine bağlı C katsayıları ve akımın konumunu belirten S değerleri ile aranılan $\tilde{\phi}$ değerleri düzeylerle

$$C \tilde{\phi} = S \quad (2.3.14)$$

biçiminde gösterilebilir. Bu denklem sisteminin açık yazılışı Çizelge 2.3.1 de verilmiştir.

Çizelge 2.3.1. $C \tilde{\phi} = S$ denklem sisteminin açık yazılışı.

$$\begin{bmatrix} C_P(1) & C_B(1) & 0 & C_R(1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_T(2) & C_P(2) & C_B(2) & 0 & C_R(2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_T(3) & C_P(3) & 0 & 0 & C_R(3) & 0 & 0 & 0 \\ C_L(4) & 0 & 0 & C_P(4) & C_B(4) & 0 & C_R(4) & 0 & 0 \\ 0 & C_L(5) & 0 & C_T(5) & C_P(5) & C_B(5) & 0 & C_R(5) & 0 \\ 0 & 0 & C_L(6) & 0 & C_T(6) & C_P(6) & 0 & 0 & C_R(6) \\ 0 & 0 & 0 & C_L(7) & 0 & 0 & C_P(7) & C_B(7) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_L(8) & 0 & C_T(8) & C_P(8) & C_B(8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_L(9) & 0 & C_T(9) & C_P(9) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1 \\ \tilde{\phi}_2 \\ \tilde{\phi}_3 \\ \phi_4 \\ \tilde{\phi}_5 \\ \tilde{\phi}_6 \\ \tilde{\phi}_7 \\ \tilde{\phi}_8 \\ \tilde{\phi}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Burada C kapasitans dizeyi, $\tilde{\phi}$ bilinmeyen gerilim vektörü, S kaynak terimini içeren vektörü göstermektedir. Şekil 2.3.3 ve Çizelge 2.3.1 incelenirse; ortadaki bir düğüm için 5 gerilim değerinin, komşu dört değerden etkilenmesi C dizeyinin beşinci satırında görülmektedir. Beşinci satır potansiyel vektörü ile çarpılırsa, 5 noktasının değeri komşu dört değer olan 2, 4, 6 ve 8 numaralı düğüm noktalarının değerlerinden etkilenir.

C dizeyi simetrik, sınırlı ve köşegen bir dizeydir. Burada, x ve z yönlerinde sonsuz kabul edilen sınırlarda karışık sınır koşulu uygulanmıştır. Herhangi bir düğüm için etkilendiği gerilim değerleri Çizelge 2.3.1 de görülmektedir.

Denklem (2.3.14) ün çözümü Bölüm (2.5) de anlatılmaktadır.

2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY); kısmi diferansiyel denklem veya enerji teoremiyle tanımlanan fiziksel bir problemi çözmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir ve ilk olarak Zienkiewich ve Cheung (1965) tarafından kullanılmıştır.

SEY aşağıda sıralanan altı aşamada uygulanır.

1. Verilen diferansiyel denklem, integral denklemine dönüştürülür. Burada integral denklemi tanımlanan alan için yazılır. İntegral denklemine dönüştürme işlemi, ağırlıklı rezidüel yöntem veya varyasyonel yöntem kullanılarak yapılır.
2. Verilen çözüm bölgesi sonlu sayıda küçük elemana bölünür. Burada alan, doğrusal üçgen elemanlara bölünmüştür. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktalarından (node) bağlıdır. Daha sonra sonlu elemanlar ağındaki elemanlar ve düğüm noktaları ayrı ayrı numaralandırılır.
3. Bilinmeyen ϕ (gerilim) değerleri, her eleman içinde polinom denklemi ile tanımlanır. Burada doğrusal polinom yaklaşımı kullanılmıştır. Tanımlanan polinom denklemi kullanılarak elemanın düğüm noktalarındaki gerilim (ϕ_i, ϕ_j, ϕ_k), değerleri tanımlanır. Daha sonra elemanın ϕ değeri düğüm noktalarında tanımlanan ϕ_i, ϕ_j, ϕ_k değerleri cinsinden yazılır.
4. Üçüncü adımda, düğüm noktalarındaki gerilim değerleri cinsinden yazılan elemanların gerilim değerleri, birinci adımda elde edilen integral denkleme yerleştirilerek her eleman için doğrusal denklem takımları geliştirilir. Geliştirilen bu doğrusal denklem takımları birleştirilerek, her elemana ait düzey denklemleri oluşturulur.
5. Dördüncü adımda oluşturulan eleman düzey denklemleri birleştirilerek sonlu elemanlar ağı için genel düzey denklemi (global matrix equation) elde edilir. Genel düzey denklemini oluştururken Neumann ve Dirichlet sınır koşulları uygulanır.

6. Genel düzey denklemi çözülerek düğüm noktalarında tanımlanan gerilimler hesaplanır.

2.4.1. İntegral Denkleminin Elde Edilmesi

Akımın süreklilik denklemi (Denklem (2.2.6)) ve elektrik alanın konservatif olması (Denklem (2.10)) özellikleri kullanılarak yazılan (2.3.1) denklemi, $(x_s, 0, 0)$ noktasındaki nokta akım kaynağı için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\nabla \sigma(x, z) \cdot \nabla \phi(x, y, z) + \sigma(x, z) \cdot \nabla^2 \phi(x, y, z) = -I \delta(x - x_s) \delta(y) \delta(z) \quad (2.4.1)$$

Bu denklemde,

$$\nabla \sigma(x, z) \cdot \nabla \phi(x, y, z) = 0$$

olduğu gözönüne alınırsa, 2-B yer modeli için doğru akım cevabı Poisson denklemi ile aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Sasaki, 1989):

$$-\sigma(x, z) \cdot \nabla^2 \phi(x, y, z) = I \delta(x - x_s) \delta(y) \delta(z) \quad (2.4.2)$$

Bu denklemde I ; x, y ve z nin fonksiyonudur. Hesaplama kolaylığı açısından (2.4.2) denklemine, $y=0$ etrafındaki simetriden dolayı Fourier cosinüs dönüşümü ((2.15) denklemi ile) uygulanırsa,

$$-\sigma(x, z) \left[\frac{\partial^2 \tilde{\phi}(x, k_y, z)}{\partial x^2} + k_y^2 \tilde{\phi}(x, k_y, z) + \frac{\partial^2 \tilde{\phi}(x, k_y, z)}{\partial z^2} \right] = I \delta(x - x_s) \delta(z) \quad (2.4.3)$$

elde edilir. Burada, k_y ; dönüşüm katsayısını ve $\tilde{\phi}$ ise (x, k_y, z) uzayındaki elektrik gerilimi ifade eder.

Denklem (2.4.3) kullanılarak (x, k_y, z) uzayında farklı k_y değerleri için yalnızca x ve z değişkenlerine bağlı olan $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ hesaplanabilir. Elde edilen $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ değerleri

kullanılarak (2.2.16) denklemi ile 3-B $\phi(x,y,z)$ uzayına dönülür. Denklem (2.4.3) de $k_y^2 \tilde{\phi}(x,k_y,z)$ terimi ile 2-B modele y- yönündeki katkı da eklenmiştir. Buna göre bu bağıntıyla yapılan modellemeye 2.5-B modelleme denilebilir.

SEY de diferansiyel denklemin integral denklemine dönüştürülmesi işlemi, varyasyonel yöntemler (variational methods) veya ağırlıklı rezidüel (method of weighted residual) yöntemlerden birisi kullanılarak yapılır. Laplacian operatörü eliptik , self-adjoint ve pozitif tanımlı olduğundan, her iki yöntemde aynı sonlu elemanlar algoritmasını oluşturur (Pelton, Rijo and Swift, 1978). Burada varyasyonel yöntem kullanılacaktır.

Varyasyonel yöntemde diferansiyel denklemin integral denklemine dönüştürülmesinde "fonksiyonel" kavramı kullanılır. Fonksiyonel şu şekilde tanımlanabilir; eğer y değişkeni x in fonksiyonu ise ($y= f(x)$), x in tanımlandığı bir bölgede, x in bütün değerleri için y hesaplanabilir. z değişkeni ise y' ye bağlı ($z=y(f(x))$) elde ediliyorsa, z ye y nin fonksiyoneli denir. Fonksiyonel, bir değişkenin ayrık değerlerine karşı elde edilen fonksiyona bağlıdır. Bir fonksiyon gibi fonksiyonel de, sürekli ve doğrusal olarak elde edilebilir (Zhdanov ve Keller, 1995).

Varyasyonel yöntem, fonksiyonelin tanımlanan alan içinde en küçüklenmesi esasına dayanır. DAÖ yönteminde alan enerjisi bir integral denklemi ile tanımlanır ve bu en küçüklenmeye çalışılır. Denklem (2.4.3) kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$F(\phi) = \sigma(x,z) \left[\frac{\partial^2 \tilde{\phi}(x,k_y,z)}{\partial x^2} + k_y^2 \tilde{\phi}(x,k_y,z) + \frac{\partial^2 \tilde{\phi}(x,k_y,z)}{\partial z^2} \right] + I \delta(x-x_s) \delta(z) = 0 \quad (2.4.4)$$

Burada $F(\tilde{\phi})$, bilinmeyen $\tilde{\phi}(x,k_y,z)$ bağlı fonksiyondur.

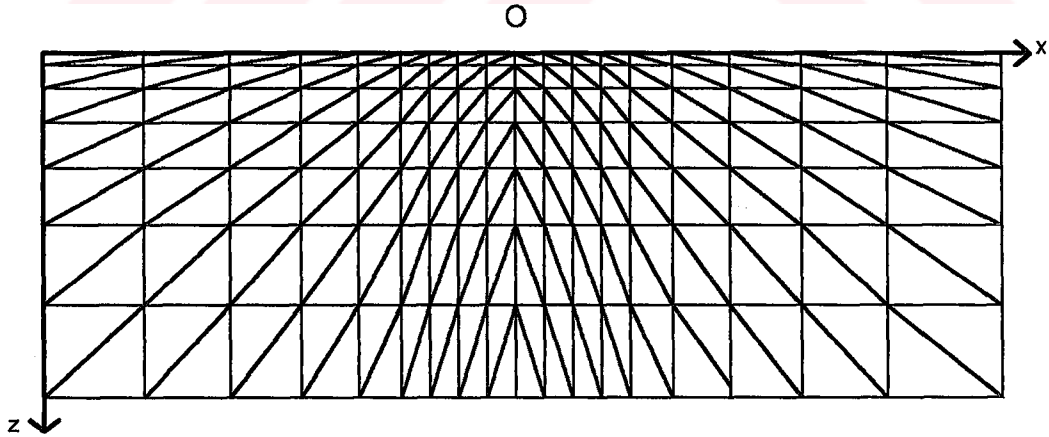
Denklem (2.4.4) de, akım yoğunluğunun normal bileşenin bütün eleman sınır yüzeylerinde sürekli olması (Dey ve Morrison, 1979) sınır koşulu uygulanırsa, aşağıdaki fonksiyonel bağıntısı Ek-B de verilen birkaç matematiksel adım sonucu bulunur.

$$\chi = \frac{1}{2} \iint \left\{ \sigma \left[\left(\frac{\partial \tilde{\phi}(x, k_y, z)}{\partial x} \right)^2 + k_y^2 \tilde{\phi}^2(x, k_y, z) + \left(\frac{\partial \tilde{\phi}(x, k_y, z)}{\partial z} \right)^2 \right] + 2I \delta(x - x_s) \delta(z) \tilde{\phi}(x, k_y, z) \right\} dx dz \quad (2.4.5)$$

Düğüm noktalarındaki bilinmeyen gerilim değerleri denklem (2.4.5) in çözümü ile hesaplanacaktır. Bu bağıntının çözümü sabit bir k_y değeri için yapılır. Bundan sonraki bağıntılarda kolaylık açısından $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ yerine $\tilde{\phi}(x, z)$ kullanılacaktır.

2.4.2. Alanın Elemanlara Ayrılması

İkinci aşamada, denklem (2.4.5) in tanımlı olduğu alan, eleman adı verilen sonlu sayıda küçük parçalara bölünür. Elemanlar birbirlerine belli sayıda noktalardan bağlıdır ve bilinmeyen değerler her eleman üzerinde belirlenen bu noktaların koordinat değerlerinde hesaplanırlar. Bilinmeyen değerlerin hesaplandığı bu noktalara düğüm noktası (node) denir. Birbirlerine düğüm noktalarından bağlı sonlu sayıda elemanın oluşturduğu alana sonlu elemanlar ağı (finite element mesh) adı verilir. Şekil 2.4.1 de doğrusal üçgen (linear triangle) elemanlara bölünmüş bir sonlu elemanlar ağı görülmektedir.



Şekil 2.4.1. Doğrusal üçgen elemanlara bölünmüş sonlu elemanlar ağının şematik gösterimi (Uchida, 1995).

Ağ üzerindeki elemanların boyutları ve sayısı ile düğüm noktası sayısı problemin çözümünde çok önemlidir. Elemanlara ayrılan alanda, düğüm noktaları ve elemanlar ayrı ayrı numaralandırılır (Bkz. Şekil 2.6.4). Dirichlet sınır koşulunu uygulamak için

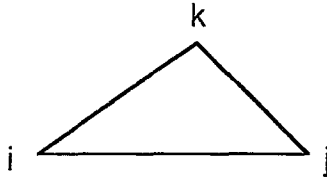
sonlu elemanlar ağının orta noktasından (O) sol, sağ ve aşağı yöne doğru gidildikçe elemanların boyutları artırılır.

2.4.3. Eleman Dizey Denkleminin Elde Edilmesi

SEY 1-B, 2-B ve 3-B tanımlanan diferansiyel denklemlerin sayısal çözümü için kullanılabilir. 1-B çözümde bir eğri düzgün doğru parçalarının bir serisi ile tanımlanır. 2-B çözümde üçgen veya dikdörtgen elemanlar yada her ikisinin birleşimi kullanılabilir. 3-B çözümde ise quadratik üçgen veya dikdörtgen şekilli elemanlar kullanılır. Burada 2-B modellemede kullanılan doğrusal üçgen eleman anlatılacaktır.

Doğrusal üçgen eleman Şekil 2.2.4 de görülmektedir. Bilinmeyen gerilim değerleri elemanın sadece köşe noktalarında tanımlandığından doğrusal üçgen denmektedir. Sonlu elemanlar ağı içinde elemanın şekline bağlı bir fonksiyon, Lagrangien veya Hermitien polinom yaklaşımı kullanılarak tanımlanır. Doğrusal üçgen eleman (Şekil 2.2.4) için bilinmeyen gerilim ($\tilde{\phi}(x, z)$) değerlerini, Lagrangien polinom yaklaşımından aşağıdaki gibi yazılabilir.

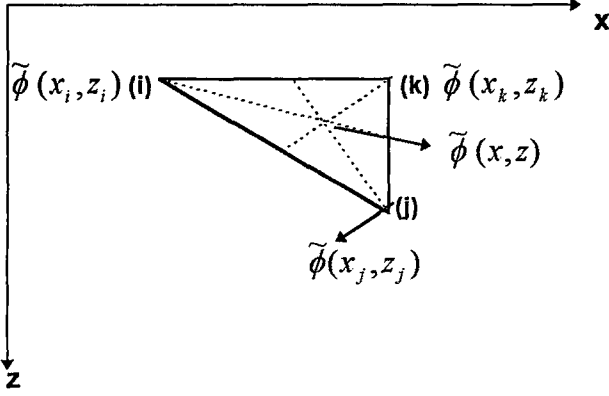
$$\tilde{\phi}(x, z) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 z = \begin{bmatrix} 1 & x & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (2.4.6)$$



Şekil 2.4.2. Doğrusal üçgen eleman.

Doğrusal üçgen elemanda bilinmeyenler elemanın köşe noktalarında tanımlanır. Buna göre i, j ve k noktalarında tanımlı olan $\tilde{\phi}(x, z)$ fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir (Şekil 2.4.3).

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_i(x_i, z_i) &= \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 z_i \\ \tilde{\phi}_j(x_j, z_j) &= \alpha_0 + \alpha_1 x_j + \alpha_2 z_j \\ \tilde{\phi}_k(x_k, z_k) &= \alpha_0 + \alpha_1 x_k + \alpha_2 z_k \end{aligned} \quad (2.4.7)$$



Şekil 2.4.3. Doğrusal üçgen elemanın düğüm noktalarında $\tilde{\phi}(x, z)$ nin tanımlanması.

Bundan sonra kısalık açısından

$$\tilde{\phi}_i = \tilde{\phi}(x_i, z_i)$$

$$\tilde{\phi}_j = \tilde{\phi}(x_j, z_j)$$

$$\tilde{\phi}_k = \tilde{\phi}(x_k, z_k)$$

$$\tilde{\phi} = \tilde{\phi}(x, z)$$

olarak kullanılacaktır.

Bu denklemlerde α_0, α_1 ve α_2 sabit katsayılarıdır. (2.4.7) denklem sistemi dizey formu şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \tilde{\phi}_i \\ \tilde{\phi}_j \\ \tilde{\phi}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (2.4.8)$$

Yazılan bu dizey denkleminde α_0, α_1 ve α_2

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} a_i & a_j & a_k \\ b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_i \\ \tilde{\phi}_j \\ \tilde{\phi}_k \end{bmatrix} \quad (2.4.9)$$

şeklinde çözülür. Burada, Δ doğrusal üçgenin alanıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \end{vmatrix} \quad (2.4.10)$$

Elemanın alanını pozitif hesaplayabilmek için düğüm noktaları saatin tersi yönünde numaralandırılır. a, b ve c sabitleri ise global koordinatlarda,

$$\begin{aligned} a_i &= x_j z_k - x_k z_j & b_i &= z_j - z_k & c_i &= x_k - x_j \\ a_j &= x_k z_i - x_i z_k & b_j &= z_k - z_i & c_j &= x_i - x_k \\ a_k &= x_i z_j - x_j z_i & b_k &= z_i - z_j & c_k &= x_j - x_i \end{aligned}$$

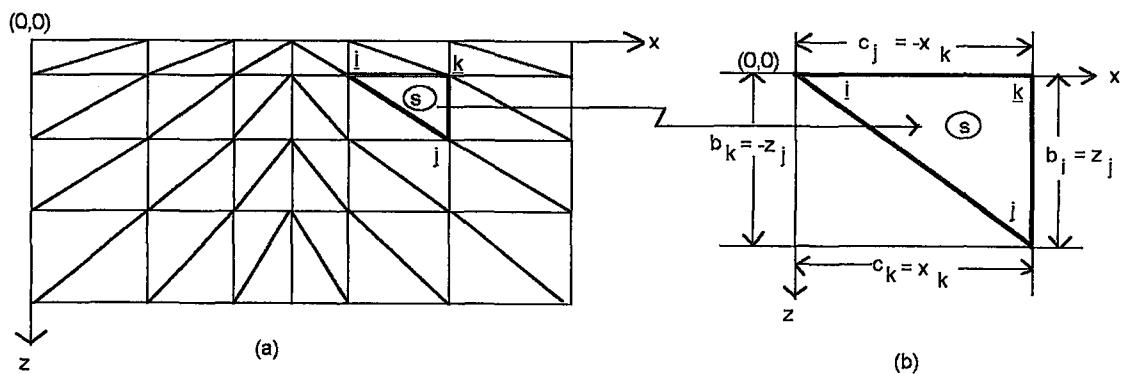
şeklinde çözümlür. Burada,

$$b_i + b_j + b_k = c_i + c_j + c_k = 0$$

ve i- düğüm noktası merkez $((x_i, z_i) = (0,0))$ olmak üzere

$$a_i = 2\Delta, \quad a_j = a_k = 0$$

olduğu görülmektedir. Genel (global) ve bölgesel (lokal) koordinatlarda yukardaki katsayılar, i- düğüm noktası merkez olmak üzere Şekil 2.4.4 de görülmektedir.



Şekil 2.4.4. Kartezyen koordinatlar sisteminde (x,z); Simgesel bir sonlu elemanlar ağı üzerinde s elemanı (a), bölgesel koordinatlarda s elemanının görünümü (b) (Fenner' den sonra 1975).

Denklem (2.4.9) da (x,z) koordinatlarına bağlı çözülen α_0, α_1 ve α_2 değerleri, denklem (2.4.6) de yerine konursa,

$$\tilde{\phi} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} 1 & x & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i & a_j & a_k \\ b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_i \\ \tilde{\phi}_j \\ \tilde{\phi}_k \end{bmatrix} \quad (2.4.11)$$

elde edilir. Bu denkleme göre $\tilde{\phi}(x,z)$ fonksiyonu alan içinde tanımlanan doğrusal üçgen elemanın düğüm noktalarında hesaplanmış $\tilde{\phi}_i, \tilde{\phi}_j$ ve $\tilde{\phi}_k$ ya bağlı olarak çözülebilir. $\tilde{\phi}_i, \tilde{\phi}_j$ ve $\tilde{\phi}_k$ nin yanında çarpan olarak bulunan değerler grubu,

$$\begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} 1 & x & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i & a_j & a_k \\ b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \quad (2.4.12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada N_i, N_j ve N_k değişkenleri şekil fonksiyonu, aradeğer fonksiyonu veya temel fonksiyon (shape functions, interpolation functions, or basis functions) olarak bilinir. Şekil fonksiyonlarının x ve z e bağlı türevleri sıfırdır. Her şekil fonksiyonunun ait olduğu düğüm noktasındaki değeri bire eşit veya birden küçüktür. Diğer düğüm noktalarındaki değeri ise sıfırdır. Bir elemana ait şekil fonksiyonlarının toplamı birdir. Her şekil fonksiyonu kendi düğüm noktası ile kendisine komşu düğüm noktalarının kenarları boyunca lineer olarak değişir. Şekil fonksiyonu denklem (2.4.12) da görüldüğü gibi sadece elemanın koordinatlarına bağlıdır. Buna göre (2.4.11) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tilde{\phi} = N_i \tilde{\phi}_i + N_j \tilde{\phi}_j + N_k \tilde{\phi}_k \quad (2.4.13)$$

Burada çözüm bölgesi içinde herhangi bir elemanın gerilimi, elemanın düğüm noktalarında tanımlanan gerilimler ve şekil fonksiyonları cinsinden tanımlanmıştır. $\tilde{\phi}(x,z)$ nin x ve z ye göre kısmi türevi alınırsa,

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} = \alpha_1 = \frac{1}{2\Delta} (b_i \tilde{\phi}_i + b_j \tilde{\phi}_j + b_k \tilde{\phi}_k) \quad (2.4.14)$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} = \alpha_2 = \frac{1}{2\Delta} (c_i \tilde{\phi}_i + c_j \tilde{\phi}_j + c_k \tilde{\phi}_k) \quad (2.4.15)$$

elde edilir. (2.4.13), (2.4.14) ve (2.4.15) denklemleri (2.4.5) de yerine konursa,

$$\begin{aligned} X = & \frac{1}{2} \iint_{\Delta} \frac{\sigma}{4\Delta^2} \left\{ (b_i \tilde{\phi}_i + b_j \tilde{\phi}_j + b_k \tilde{\phi}_k)^2 + (c_i \tilde{\phi}_i + c_j \tilde{\phi}_j + c_k \tilde{\phi}_k)^2 \right\} dx dz \\ & + \frac{1}{2} \iint_{\Delta} \sigma k^2 (N_i \tilde{\phi}_i + N_j \tilde{\phi}_j + N_k \tilde{\phi}_k)^2 dx dz + \iint_{\Delta} I_{\Delta} \delta(x - x_s) \delta(z) (N_i \tilde{\phi}_i + N_j \tilde{\phi}_j + N_k \tilde{\phi}_k) dx dz \end{aligned} \quad (2.4.16)$$

bulunur. Yukardaki integral denklemi doğrusal üçgenin alanı için yazılmıştır. Ek-C de verilen şekil fonksiyonunun özellikleri denklem (2.4.16) ya uygulanırsa,

$$\begin{aligned} X = & \frac{\sigma}{8\Delta} \left\{ (b_i \tilde{\phi}_i + b_j \tilde{\phi}_j + b_k \tilde{\phi}_k)^2 + (c_i \tilde{\phi}_i + c_j \tilde{\phi}_j + c_k \tilde{\phi}_k)^2 \right\} \\ & + \frac{1}{12} \sigma k^2 \Delta (\tilde{\phi}_i^2 + \tilde{\phi}_j^2 + \tilde{\phi}_k^2 + \tilde{\phi}_i \tilde{\phi}_j + \tilde{\phi}_j \tilde{\phi}_k + \tilde{\phi}_i \tilde{\phi}_k) + \frac{I_{\Delta}}{2\Delta} (a_i \tilde{\phi}_i + a_j \tilde{\phi}_j + a_k \tilde{\phi}_k) \end{aligned} \quad (2.4.17)$$

elde edilir. Enerjiyi minimize etmek için (2.4.17) bağıntısının, bilinmeyen fonksiyonlara göre kısmi türevi alınarak sıfıra eşitlenir. Buna göre,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi}{\partial \tilde{\phi}_i} = & \frac{\sigma}{4\Delta} \left\{ b_i (b_i \tilde{\phi}_i + b_j \tilde{\phi}_j + b_k \tilde{\phi}_k) + c_i (c_i \tilde{\phi}_i + c_j \tilde{\phi}_j + c_k \tilde{\phi}_k) \right\} \\ & + \frac{1}{12} \sigma k^2 \Delta (2\tilde{\phi}_i + \tilde{\phi}_j + \tilde{\phi}_k) + \frac{I_{\Delta}}{2\Delta} a_i = 0 \end{aligned} \quad (2.4.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi}{\partial \tilde{\phi}_j} = & \frac{\sigma}{4\Delta} \left\{ b_j (b_i \tilde{\phi}_i + b_j \tilde{\phi}_j + b_k \tilde{\phi}_k) + c_j (c_i \tilde{\phi}_i + c_j \tilde{\phi}_j + c_k \tilde{\phi}_k) \right\} \\ & + \frac{1}{12} \sigma k^2 \Delta (\tilde{\phi}_i + 2\tilde{\phi}_j + \tilde{\phi}_k) + \frac{I_{\Delta}}{2\Delta} a_j = 0 \end{aligned} \quad (2.4.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi}{\partial \tilde{\phi}_k} = & \frac{\sigma}{4\Delta} \left\{ b_k (b_i \tilde{\phi}_i + b_j \tilde{\phi}_j + b_k \tilde{\phi}_k) + c_k (c_i \tilde{\phi}_i + c_j \tilde{\phi}_j + c_k \tilde{\phi}_k) \right\} \\ & + \frac{1}{12} \sigma k^2 \Delta (\tilde{\phi}_i + \tilde{\phi}_j + 2\tilde{\phi}_k) + \frac{I_{\Delta}}{2\Delta} a_k = 0 \end{aligned} \quad (2.4.20)$$

elde edilir. Bu denklemler, enerjinin minimizasyonu için türetilen fonksiyonelin extramum değerleridir. Hesaplanması gereken düğüm noktalarındaki $(\tilde{\phi}_i, \tilde{\phi}_j, \tilde{\phi}_k)$

değerleri yukardaki denklemlerin çözümünden elde edilir. Bu denklemler doğrusaldır ve çözümünde doğrusal olarak elde edilir (Coggon, 1971).

Denklem (2.4.18), (2.4.19) ve (2.4.20) aşağıdaki gibi dizey denklemi biçimine getirilir.

$$\frac{\sigma}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_i & c_i \\ b_j & c_j \\ b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_i \\ \tilde{\phi}_j \\ \tilde{\phi}_k \end{bmatrix} + \frac{1}{12} \sigma k^2 \Delta \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_i \\ \tilde{\phi}_j \\ \tilde{\phi}_k \end{bmatrix} + \frac{I_\Delta}{2\Delta} \begin{bmatrix} a_i \\ a_j \\ a_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.4.21)$$

Bu denklem sonlu elemanlar ağı içinde bir doğrusal üçgen eleman için yazılmıştır. Denklemde ilk toplamaya kadar olan bölümde ilk iki dizey çarpılırsa,

$$\frac{\sigma}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_i b_j + c_i c_j & b_j^2 + c_j^2 & b_j b_k + c_j c_k \\ b_i b_k + c_i c_k & b_j b_k + c_j c_k & b_k^2 + c_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_i \\ \tilde{\phi}_j \\ \tilde{\phi}_k \end{bmatrix} + \frac{1}{12} \sigma k^2 \Delta \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_i \\ \tilde{\phi}_j \\ \tilde{\phi}_k \end{bmatrix} + \frac{I_\Delta}{2\Delta} \begin{bmatrix} a_i \\ a_j \\ a_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.4.22)$$

olur. A ve B satır ve sütun sayıları birbirine eşit ve C ninde satır sayısı A ve B nin sütun sayısına eşit üç dizey için

$$(A+B)C=AC+BC$$

özelliği yazılabilir. Bu özellik denklem (2.4.22) ye uygulanırsa, simgesel bir i- elemanı için aşağıdaki dizey denklemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} k_{11}^i & k_{12}^i & k_{13}^i \\ k_{21}^i & k_{22}^i & k_{23}^i \\ k_{31}^i & k_{32}^i & k_{33}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^i \\ \tilde{\phi}_2^i \\ \tilde{\phi}_3^i \end{bmatrix} = I_\Delta \begin{bmatrix} a_1^i \\ a_2^i \\ a_3^i \end{bmatrix} \quad (2.4.23)$$

Bu denklem kısaca,

$$k^i . u^i = s^i \quad (2.4.24)$$

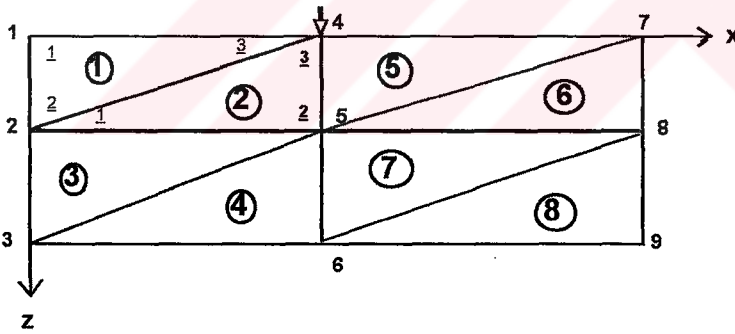
şeklinde yazılabilir. Yukardaki denklemde i-elemanı için k^i , (3×3) boyutlu düğüm noktalarının koordinatlarına, k_p dönüşüm katsayısına ve elemanın öziletkenliğine

bağlı katsayı dizeyi (stiffness matrix), u^i düğüm noktalarındaki gerilimlere bağlı (3×1) boyutunda sütun vektör, s^i elemana uygulanan nokta akıma bağlı (3×1) boyutunda sütun vektördür.

2.4.4. Genel Dizey Denkleminin (Global Matrix Equation) Elde Edilmesi

Elemanlar düğüm noktalarından birbirine bağlı olduğundan, düğüm noktalarındaki gerilimler bir eleman için yazılan dizey denkleminin çözümüyle bulunamaz. Gerilimlerin hesaplanması için elemanlar için oluşturulan dizey denklemleri, sonlu elemanlar ağına bağlı birleştirilerek genel dizey denklemi oluşturulmalıdır. Oluşturulan genel dizey denklemi çözülerek düğüm noktalarındaki gerilimler hesaplanır.

Denklem (2.4.23) sonlu elemanlar ağındaki bütün elemanlar için türetilebilir. Sonlu elemanlarda amaç bütün elemanların katsayı dizeylerini toplayarak, tüm yapının katsayı dizeyine dönüştürmektir. Bunu göstermek için Şekil 2.4.5 daki gibi (3×3) boyutunda bir sonlu elemanlar ağı ele alınabilir.



Şekil 2.4.5. Sekiz doğrusal üçgen eleman ve dokuz düğüm noktası olan sonlu elemanlar ağı.

Burada ağın 8 elemanı ve yukardan aşağıya doğru numaralandırılmış 9 düğüm noktası vardır. Yukardaki sonlu elemanlar ağında bütün elemanlar için (2.4.23) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & k_{13}^1 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 & k_{23}^1 \\ k_{31}^1 & k_{32}^1 & k_{33}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^1 \\ \tilde{\phi}_2^1 \\ \tilde{\phi}_3^1 \end{bmatrix} = I_{\Delta} \begin{bmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ a_3^1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} k_{11}^2 & k_{12}^2 & k_{13}^2 \\ k_{21}^2 & k_{22}^2 & k_{23}^2 \\ k_{31}^2 & k_{32}^2 & k_{33}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^2 \\ \tilde{\phi}_2^2 \\ \tilde{\phi}_3^2 \end{bmatrix} = I_{\Delta} \begin{bmatrix} a_1^2 \\ a_2^2 \\ a_3^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} k_{11}^3 & k_{12}^3 & k_{13}^3 \\ k_{21}^3 & k_{22}^3 & k_{23}^3 \\ k_{31}^3 & k_{32}^3 & k_{33}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^3 \\ \tilde{\phi}_2^3 \\ \tilde{\phi}_3^3 \end{bmatrix} = I_{\Delta} \begin{bmatrix} a_1^3 \\ a_2^3 \\ a_3^3 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} k_{11}^4 & k_{12}^4 & k_{13}^4 \\ k_{21}^4 & k_{22}^4 & k_{23}^4 \\ k_{31}^4 & k_{32}^4 & k_{33}^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^4 \\ \tilde{\phi}_2^4 \\ \tilde{\phi}_3^4 \end{bmatrix} = I_{\Delta} \begin{bmatrix} a_1^4 \\ a_2^4 \\ a_3^4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} k_{11}^5 & k_{12}^5 & k_{13}^5 \\ k_{21}^5 & k_{22}^5 & k_{23}^5 \\ k_{31}^5 & k_{32}^5 & k_{33}^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^5 \\ \tilde{\phi}_2^5 \\ \tilde{\phi}_3^5 \end{bmatrix} = I_{\Delta} \begin{bmatrix} a_1^5 \\ a_2^5 \\ a_3^5 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} k_{11}^6 & k_{12}^6 & k_{13}^6 \\ k_{21}^6 & k_{22}^6 & k_{23}^6 \\ k_{31}^6 & k_{32}^6 & k_{33}^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^6 \\ \tilde{\phi}_2^6 \\ \tilde{\phi}_3^6 \end{bmatrix} = I_{\Delta} \begin{bmatrix} a_1^6 \\ a_2^6 \\ a_3^6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} k_{11}^7 & k_{12}^7 & k_{13}^7 \\ k_{21}^7 & k_{22}^7 & k_{23}^7 \\ k_{31}^7 & k_{32}^7 & k_{33}^7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^7 \\ \tilde{\phi}_2^7 \\ \tilde{\phi}_3^7 \end{bmatrix} = I_{\Delta} \begin{bmatrix} a_1^7 \\ a_2^7 \\ a_3^7 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} k_{11}^8 & k_{12}^8 & k_{13}^8 \\ k_{21}^8 & k_{22}^8 & k_{23}^8 \\ k_{31}^8 & k_{32}^8 & k_{33}^8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1^8 \\ \tilde{\phi}_2^8 \\ \tilde{\phi}_3^8 \end{bmatrix} = I_{\Delta} \begin{bmatrix} a_1^8 \\ a_2^8 \\ a_3^8 \end{bmatrix}$$

Yukardaki dizey denklemlerinde görüldüğü gibi, bir eleman üzerinde üç düğüm noktası olduğundan katsayı dizeyleride (3×3) boyutundadır. Bu dizeyleri birleştirerek tüm ağın katsayı dizeyi haline getirmek için düğüm noktası sayısı boyutunda (9×9) bir kare dizeye gereksinim vardır. Katsayı dizeyini oluşturarak genel dizey denklemini elde etme işlemine "Doğrudan Rijitlik Yöntemi" denir. Burada bir elemana ait dizey denkleminde dizey ve vektörün satır ve sütun numarası (sonlu elemanlar ağında elemanın düğüm noktalarının numarası), dizey ve vektörün kenarlarına yazılır. Sonra sonlu elemanlar ağındaki düğüm noktası sayısı boyutunda bir kare dizey (katsayı dizeyi, coefficient- stiffness matrix) oluşturulur ve dizeyin bütün elemanlarına sıfır değeri atanır. Bundan sonra, her eleman için yazılmış denklemlerde dizeyin kenarına yazılan düğüm noktası numarası, katsayı dizeyinin satır ve sütun numarası olacak şekilde değerler yerleştirilir. Aynı satır ve sütun numarasına denk gelen değerler toplanır. Bu işlem bütün elemanlar için yapılır. Numaralandırma işlemi 1 numaralı eleman için yazılan dizey denkleminde görülmektedir. Sırasıyla 1, 2, 3, ..., 8 elemanlarının sonlu elemanlar ağı için yazılacak dizey denkleminde nasıl katıldığı Ek-D de verilmiştir. İlk üç elemanın sonlu elemanlar ağı için yazılan denkleme katkısı aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix}
 k_{11}^1 & k_{12}^1 & 0 & k_{13}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 k_{21}^1 & k_{22}^1 + k_{11}^2 + k_{11}^3 & k_{12}^3 & k_{23}^1 + k_{13}^2 & k_{12}^2 + k_{13}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{21}^3 & k_{22}^3 & 0 & k_{23}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 k_{31}^1 & k_{32}^1 + k_{31}^2 & 0 & k_{33}^1 + k_{33}^2 & k_{32}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{21}^2 + k_{31}^3 & k_{32}^3 & k_{23}^2 & k_{33}^3 + k_{22}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \phi_1^1 \\
 \phi_2^1 + \phi_1^2 \\
 \phi_2^2 + \phi_1^3 \\
 \phi_3^1 + \phi_3^2 + \phi_2^3 \\
 \phi_3^3 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 s_1^1 \\
 s_2^1 + s_1^2 \\
 s_2^2 + s_1^3 \\
 s_3^1 + s_3^2 + s_2^3 \\
 s_3^3 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

Yukardaki dizey denklemini bütün elemanların katkısı toplanarak,

$$\begin{bmatrix}
 K_{11} & K_{12} & 0 & K_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & K_{32} & K_{33} & 0 & K_{35} & K_{36} & 0 & 0 & 0 \\
 K_{41} & K_{42} & 0 & K_{44} & K_{45} & 0 & K_{47} & 0 & 0 \\
 0 & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} & K_{47} & K_{58} & 0 \\
 0 & 0 & K_{63} & 0 & K_{65} & K_{66} & 0 & K_{68} & K_{69} \\
 0 & 0 & 0 & K_{74} & K_{75} & 0 & K_{77} & K_{78} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & K_{85} & K_{86} & K_{87} & K_{88} & K_{89} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{96} & 0 & K_{98} & K_{99}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \phi_1 \\
 \phi_2 \\
 \phi_3 \\
 \phi_4 \\
 \phi_5 \\
 \phi_6 \\
 \phi_7 \\
 \phi_8 \\
 \phi_9
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 S_1 \\
 S_2 \\
 S_3 \\
 S_4 \\
 S_5 \\
 S_6 \\
 S_7 \\
 S_8 \\
 S_9
 \end{bmatrix}
 \quad (2.4.25)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; $K_{11} = k_{11}^1$, $K_{12} = k_{12}^1$, $K_{13} = 0, \dots$, $K_{21} = k_{21}^1$, $K_{22} = k_{22}^1 + k_{11}^2 + k_{11}^3$, \dots , $\phi_1 = \phi_1^1$, $\phi_2 = \phi_2^1 + \phi_1^2$, \dots , $S_1 = S_1^1$, $S_2 = S_2^1 + S_1^2$, \dots e eşittir. Buna göre (2.4.25) dizey denklemini genel olarak tanımlanan bir sonlu elemanlar ağı için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$K_{(N \times N)} \cdot U_{(N \times 1)} = S_{(N \times 1)} \quad (2.4.26)$$

Burada N ağ üzerindeki düğüm noktası sayısı olmak üzere, (2.4.26) denkleminde K ($N \times N$) boyutlu, pozitif değerli, simetrik-band dizeydir. Bu dizey sonlu elemanlar ağındaki tüm elemanların geometrisine ve öziletkenliğine bağlıdır. Dizeyin köşegen (diagonal) elemanları sıfırdan ($K_{i,i} > 0$) ve aynı sıradaki köşegen dışı terimlerden

büyükür. Dizeyde sıfır olmayan terimler köşegene yakındır ve bandın dışındaki bütün terimler sıfırdır.

U sütun vektör bütün düğüm noktalarındaki bilinmeyen gerilim değerlerini içerir. S sütun vektör ise bütün düğüm noktalarındaki nokta akım kaynağının değerini içermektedir.

Denklem (2.4.24) de görüldüğü gibi tek bir eleman için düğüm noktasında hesaplanan gerilim sadece o elemanın katkısıyla bulunur. Fakat sonlu elemanlar ağı üzerindeki bir düğüm noktasının gerilimi, denklem (2.4.25) ile o düğüm noktasına komşu tüm elemanların katkısıyla hesaplanır. Bu nedenle sonlu elemanlar ağındaki elemanların şekli ve düğüm noktası sayısı önemlidir. Sonlu elemanlar ağı üzerinde düğüm noktası sayısı ne kadar çok ise hesaplanan gerilimler modeli o kadar iyi temsil eder.

Şekil 2.4.6' da görüldüğü gibi 4 numaralı düğüm noktasında nokta akım kaynağı varsa (2.4.25) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 & K_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{32} & K_{33} & 0 & K_{35} & K_{36} & 0 & 0 & 0 \\ K_{41} & K_{42} & 0 & K_{44} & K_{45} & 0 & K_{47} & 0 & 0 \\ 0 & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} & K_{47} & K_{58} & 0 \\ 0 & 0 & K_{63} & 0 & K_{65} & K_{66} & 0 & K_{68} & K_{69} \\ 0 & 0 & 0 & K_{74} & K_{75} & 0 & K_{77} & K_{78} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{85} & K_{86} & K_{87} & K_{88} & K_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{96} & 0 & K_{98} & K_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \\ \phi_7 \\ \phi_8 \\ \phi_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.4.27)$$

Yukarda görüldüğü gibi S vektöründe sadece dördüncü düğüm noktasını temsil eden elemanda değer vardır. Böylece kaynağın olduğu yerde Poisson denklemi sağlanmış olur. Diğer elemanlara sıfır değeri atayarak kaynağın olmadığı noktalarda Laplace denklemi sağlanmış olur. Ayrıca her düğüm noktası için yazılan denklemlerde düğüm noktasının komşu olmadığı noktalar için sıfır değeri atayarak sınırlarda Dirichlet sınır koşulu uygulanmış olur.

2.5. Gerilim Alanın Çözümü

(2.3.14) ve (2.4.26) dizey denklemlerinde kaynak terimini içeren sütun vektörlerin sıfırdan farklı elemanları olduğundan homojen olmayan denklem takımındırlar. Homojen olmayan denklem takımlarının çözümü dolaysız (direct) ve dolaylı (indirect, iterative) yöntemler olarak ikiye ayrılabilir. Bu yöntemler için Aktaş ve diğ.' ne (1981) bakılabilir.

Dolaylı yöntemler hem algoritmalarının kolayca programlanabilir olması hem de yuvarlatma hatalarının az ve yineleme (iterasyon) yapıldıkça birikme olmaması bakımından çok kullanılır. Fakat bu yöntemlerde daima bir yakınsama (convergence) problemi vardır. Dolaysız yöntemler verilen katsayı dizeyinin elemanlarını işlemler sırasında değiştirirler ve başlangıçta çok sıfırlı (sparse) olan katsayı dizeyi sıfır elemanları daha az olan bir yoğun (dense) dizeye dönüştür. Buna karşılık dolaylı yöntemler katsayı dizeyini değiştirmez. Bu nedenle büyük ($N > 100$) ve çok sıfırlı katsayı dizeyi olan denklem takımlarının çözümü için dolaylı yöntemlerin kullanılması önerilir. Fakat bu yöntemler çözüme yakınsamazsa dolaysız yöntemlerin kullanılması zorunludur.

Aslında (2.3.14) ve (2.4.26) denklemlerinde, doğrudan katsayı dizeyinin tersi alınarak diğer tarafa çarpan olarak geçirilebilir ve çözüm daha hassas şekilde doğrudan bulunabilir. Fakat bu yöntem diğer dolaylı ve dolaysız çözüm yöntemlerinden daha fazla zaman alır. Yine de hızlı bir bilgisayar varsa bu yöntem ile çözüm tercih edilebilir.

Doğrusal cebirsel denklem takımının çözümünde kullanılacak yöntemin seçiminde; çözüm sırasında gereken işlem sayısı, çarpma ve bölme işlemleri sayısı, kolay programlanabilir olması, mümkün olduğu kadar az yuvarlatma hatası olması ve çözüm hızı özellikleri gözönünde tutulur.

Temsili bir ağ için kurulan (2.3.14) ve (2.4.26) dizey denklemlerinde genel olarak $(n \times m)$ düğüm noktası olan bir model için incelenirse, öz direnç dizeyi $(N \times N)$ elemanlı olur ($N = n \times m$). Bu durumda dizey denklemleri,

$$\sum_{j=1}^N r_{i,j} \phi_{i,j} = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.5.1)$$

şeklinde gösterilebilir.

Özdirenç dizeyinin, aşağıdaki dört özelliği bulunmaktadır .

$$(i) r_{i,i} > 0, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$(ii) r_{i,i} \geq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{MN} |r_{i,j}|, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

(iii) R , dizeyi indirgenemez ve elemanları kuvvetli bir biçimde birbiriyle ilişkilidir (Varga 1962).

(iv) R , Young' in (1952) A tipi özelliğini bulundurmalıdır (Dey ve Morrison 1979).

Varga (1962) fark denklemlerinin keyfi hücre aralıklarında yazılması sonucu, R dizeyinin özelliklerini göstermiştir. (2.3.14) denklemini yukardaki (i) ve (ii) koşullarının sağlanması durumunda "succesive overrelaxiation" yaklaşımı ile çözülebilir (Young, 1962). Bu denklemin çözümünde ağ içinde elemanlarda tanımlanan özdirençler fiziksel olabilirlik şartını ($0 < \rho_{i,j} < \infty, (i, j) \in G \cup \Gamma$) sağlamalıdır. Analitik yaklaşımlarda basitlik açısından kullanılan $\rho_{i,j} = 0$ veya $\rho_{i,j} = \infty$ yaklaşımları burada kullanılamaz. Çünkü jeolojik yapı hiçbir zaman sonsuz iletken ya da sonsuz yalıtkan değildir.

Özdirenç dizeyinin özelliklerine göre farklı kişiler, farklı çözüm yöntemleri kullanarak (2.3.14) ve (2.4.26) dizey denklemlerini çözmüştür.

Denklem (2.4.26) yı, Coggon (1971) ikincil alan yaklaşımı ile çözmüştür. Pridmore ve diğ. (1981) dolaylı yöntemlerden olan SOR (Successive Over Relaxation) yöntemini kullanmışlardır. Uchida (1992), Molano ve diğ. (1990) dolaylı yöntemlerden olan Cholesky Decomposition yöntemini kullanmışlardır.

Sonlu fark işleci kullanılarak elde edilen (2.3.14) dizey denklemini Dey ve Morrison (1979) dolaysız yöntemlerden olan Cholesky decomposition yöntemi ile çözmüştür.

SFY de; katsayı dizeyi noktalarla ayrıklaştırma sonucu, $\pm x$ ve $\pm z$ yönlerinde eşit olmayan aralıklarda kullanılırsa, katsayı dizeyinin simetrik olmadığı herhangi bir $\sigma(x, z)$ dağılımı için görülmüştür. Eğer dizey alanda ayrıklaştırma ile oluşturulur ve x, z yönlerinde genişleyen aralıklarda seçilirse, dizeyin elemanları pozitif ve simetriktir (Dey ve Morrison 1979). Dizey elemanları dx, dz ve iletkenliğin fonksiyonudur. Bu nedenle elemanların pozitif olması fiziksel olarak olabilirlik şartını sağlamaktadır.

Katsayı dizeyi simetrik ve sınırlı değilse, sonlu farklarda $R.\phi = b$ (veya sonlu elemanlarda $K_{(N \times N)}.U_{(N \times 1)} = S_{(N \times 1)}$) denklem sistemi en iyi Gauss eliminasyonu yöntemi ile çözülebilir. Katsayı dizeyi alanda ayrıklaştırma ile oluşturulduğunda simetrik ve bütün elemanları pozitif olduğundan, en iyi "Cholesky decomposition" yöntemi ile çözülmektedir (Martin and Wilkinson 1965).

Bu tez çalışmasında Sonlu Farklar ile modelleme için Dey' in (1976) programı, sonlu elemanlar ile modelleme için ise Uchida' nın (1995) 2-B ters çözüm programından modelleme yapan bölüm ayrılarak kullanılmıştır. Her iki program, gerilim değerlerinin hesaplanmasında Cholesky Decomposition yöntemini kullanmaktadır.

"Cholesky decomposition" yöntemine göre, herhangi bir A dizeyinin elemanları, pozitif ve simetrik ise bu dizey

$$LL^T = A \quad (2.5.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada L dizeyi alt üçgen dizeyi, L^T ise L dizeyinin devriğini göstermektedir. L dizeyinin köşegen elemanları 1 dir. Burada,

$$L_{i,j} = 0 \quad (i - j > m)$$

$$L_{i,j}^T = L_{i,j}$$

dir. Buna göre $Ax=b$ denklemini aşağıdaki şekilde adım adım

$$Ly = b \quad (2.5.3)$$

$$L^T x = y \quad (2.5.4)$$

çözülür. (2.5.3) denkleminde ilk önce y çözülür ve daha sonra (2.5.4) de yerine konularak x bilinmeyen yöneyi bulunabilir. Bu yöntem özellikle n veri sayısı m parametre sayısından büyük olduğu ($n \gg m$) durumlarda (alt üçgenlere bölme yöntemi) etkilidir. Burada ele alınan problem için veri sayısı parametre sayısından fazladır. Bu yöntem Gauss eliminasyon yönteminden çok daha çabuk çözüme ulaşmaktadır (Dey ve Morrison 1979).

2.6. Gerilimin (x, k_y, z) Uzayından (x, y, z) Uzayına Dönüştürülmesi

(x, k_y, z) uzayından, (x, y, z) uzayına dönüşüm ile 2-B iletkenlik dağılımı nedeni ile oluşan üç boyutlu gerilim dağılımı hesaplanabilir. Dönüşüm işlemi Fourier cosinus dönüşümü ile gerçekleştirilebilir. (2.3.14) ve (2.4.26) düzey denklemlerinden hesaplanan gerilimler $(\tilde{\phi}(x, k_y, z))$; (x, k_y, z) uzayında çözülmüştür. Bu değerlerin (x, y, z) uzayına dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşüm işleminde kullanılan k_y nin seçimi deneme yanılma yolu ile yapılmaktadır. Bu değerler sıfır ile dört arasında seçilerek gerçekleştirilebilir. Fakat herhangi bir yer modeli için ağ boyutunun değişmesi (dx ve dz aralıklarının değişmesi) yeni k_y değerlerinin bulunmasını gerektirmektedir. Ayrıca aynı model için her farklı $AB/2$ değeri içinde k_y değerlerinin yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Eğer modelin sadece iletkenlik değerleri değişirse aynı k_y değerleri ile anomali hesabı yapılabilir. k_y değerleri deneme yanılma yöntemi ile bulunarak homojen bir model için doğru olup olmadığı bütün $AB/2$ değerlerinde kontrol edilmelidir. k_y değerlerinin kaç adet olması bir kurala bağlı değildir. Örneğin, Dey ve Morrison (1979) yaptıkları programda beş adet, Rodi(1976) yedi adet, Uchida (1995) ise ondört adet k_y değeri kullanmıştır. Uchide k_y değerlerini ağ boyutuna bağlı olarak tanımlamıştır. Her modelde $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ genel davranışı $k_y = 0$ için asimptotik olarak düz bir tepki fonksiyonuna, k_y nin en büyük değeri için düzgün

azalarak sifira asimptot olmaktadır. Dönüşüm işlemi $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ yi uygun bir üstel fonksiyona yaklaştırılarak $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ nin zarfını k_y ' nin değerleri için ($k_{y1} \leq k_y \leq k_{y2}$) analitik olarak

$$\int_{k_{y1}}^{k_{y2}} e^{-ak_y} \cos(k_y b) dk_y = \frac{e^{-ak_y}}{a^2 + b^2} [b \sin(bk_y) - a \cos(bk_y)] \Big|_{k_{y1}}^{k_{y2}}$$

ile yapılabilir. Çözülen $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ ler $\phi(x, y, z)$ ye dönüştürüldükten sonra görünür öz direnç değerleri hesap edilebilir. Gerilim değerleri hesap edilirken farklı kaynak konumları için çözülen dizeyin yüzeye karşılık gelen elemanları daha sonra kullanılmak üzere saklanır.

(2.3.14) ve (2.4.26) dizey denklemlerinde gerilimin hesaplandığı düğüm noktasıyla ilişkisi olmayan düğüm noktalarına karşılık gelen sütunlara sıfır değeri atanır. Bu durumda köşelerde Dirichlet sınır koşulu sağlanmış olur. Ayrıca nokta akım kaynağını içeren dizeyde kaynağın bulunmadığı noktalara sıfır atamakla Laplace denklemi, nokta akım kaynağında ise Poisson denklemi sağlanmış olur (Pekşen 1996).

Denklem (2.3.14) ve (2.4.26) de katsayı dizeyi bir model için bir kez kurulur. Daha sonra nokta kaynak teriminin değişik konumları için bu denklem sistemi çözülerek istenilen modelin yeryüzünde oluşturacağı gerilim değerleri hesaplanabilir.

3. GÖRÜNÜR ÖZDİRENÇ HESABI

Ohm kanunu (2.2.9) ve statik elektrik alanın konservatif olması özelliklerinden (2.2.10) yararlanarak homojen ve sonsuz izotrop ortamın herhangi bir noktasından nokta akım kaynağı uygulandığında kaynaktan R kadar uzaklıktaki akım yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$J = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial R} \quad (3.1)$$

Akım yoğunluğu; akımın, geçtiği alana oranı olarak,

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada A nokta kaynağının etki alanıdır (metrekare). Kaynaktan R uzaklıktaki noktaların bir küre yüzeyi oluşturduğu düşünülürse ve (3.1) ile (3.2) eşitlenirse

$$\frac{I}{A} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial R} \quad (3.3)$$

elde edilir. ϕ gerilimi (3.3) denkleminin integrali alınarak,

$$\phi = \frac{\rho I}{4\pi R} + C \quad (3.4)$$

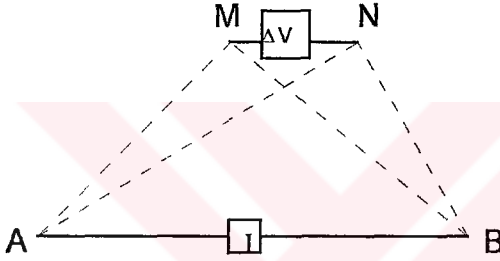
şeklinde çözülebilir. Kaynaktan çok uzak noktalarda gerilim sıfır olması gerektiğinden (3.4) denklemindeki C integrasyon sabitinin değeri sıfır olmalıdır. Yeryuvarı hava ile sınırlandırıldığından, ortamın yarısonsuz olması gerekir (Başokur, 1984). Denklem (3.4), yarısonsuz ortam için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi R} \quad (3.5)$$

Pratikte, akım yeryüzünden I (source) ve $-I$ (sink) olmak üzere iki elektrodla uygulanır ve gerilim bütün noktalarda bu iki kutuplu (bipolar) düzenele ölçülür (Bhattacharya ve Patra, 1968).

I akımı homojen ve izotrop yarısonsuz bir ortama, yeryüzünden A ve B noktalarındaki elektrodlar ile verilsin. Bu durumda M ve N noktalarındaki gerilim elektrodları arasındaki gerilim farkı aşağıdaki gibi hesaplanır (Şekil 3.1).

$$\Delta\phi = \phi_M - \phi_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (3.6)$$



Şekil 3.1. Elektrod dizilimlerinin genel gösterimi.

Denklem (3.6) dan homojen ortamın öz direnci

$$\rho = K \frac{\Delta\phi}{I} \quad (3.7)$$

şeklinde çözülebilir. Burada

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (3.8)$$

olduğu görülmektedir. K geometrik faktör olarak isimlendirilir ve uzaklık boyutundadır. Denklem (3.6) da hesaplanan gerilim farkı elektrodlar arasındaki uzaklığa, yere uygulanan akıma ve homojen ortamın öz direncine bağlıdır. Fakat gerçekte yer homojen değildir ve arazide ölçülen gerilim farkı ($\Delta\phi$) kullanılarak (3.7) denkleminde hesaplanan öz direnç; Görünür Öz direnç (GÖ) olarak adlandırılır. GÖ, jeolojik yapının

şekline, öz direncine ve kullanılan elektrod dizilimine bağlıdır. GÖ tanımlamasına göre; ortam homojen ve izotrop ise ölçülen GÖ ortamın öz direncine eşit olmalıdır. Tabakalı bir ortamda GÖ eğrisi AB/2' nin küçük değerleri için birinci tabakanın öz direncine, AB/2' nin büyük değerleri için son tabakanın öz direncine asimtot olmalıdır. Ayrıca GÖ, AB/2 nin ara değerlerinde de ara tabakaların öz direncine yakın olmalıdır (Başokur 1994).

Arazide ölçülen gerilim farkları, homojen ve izotrop ortama ait olmadığından bundan sonraki bölümlerde GÖ kavramı ($\rho_a = \rho$) kullanılacaktır.

3.1. Elektrod Dizilimleri

A, B akım ve M, N gerilim elektrodlarının farklı konumlarına göre farklı elektrod dizilimleri önerilmiştir. Klasik elektrod dizilimleri, simetri merkezine göre bir çizgi boyunca dizilen Schlumberger, Wenner ve Dipol-Dipol dizilimleridir. Bu dizilimler amaca yönelik seçilmektedir. Örneğin Schlumberger ve Wenner dizilimi derin amaçlı araştırmalarda kullanılmaktadır. Yanal süreksizliklerin belirlenmesinde ise Schlumberger dizilimi iyi sonuç vermektedir.

Arkeolojik amaçlı çalışmalarda ise yarım-Wenner, yarım-Schlumberger, twin probe (Aspinall ve Lynam, 1970), Gradient (Schlutz, 1985), odaklanmış (focused) dizilimler (Grveinetti, 1967), üç gerilim elektrod (Wenner α , Wenner β ve Wenner γ) (Carpenter ve Haberjam, 1956) dizilimleri kullanılmaktadır. Bu dizilimler birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve arkeolojik araştırmalarda geleneksel dizilimlerden daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir (Brizzollari ve Bernabini 1979, Orveo ve diğ., 1987).

DAÖ yönteminde, profil ölçüsü (profilling) ve yerelektrik sondajı (geoelectric sounding) olmak üzere çeşitli veri sunum ve toplama yöntemleri kullanılmaktadır. Profilleme yönteminde, elektrod dizilimine bağlı olarak elektrodlar arası uzaklık sabit tutularak (geometrik faktör sabit) bir doğru boyunca her ölçü sonucu elektrodlar belli örneklem aralıklarında kaydırılır. Bu yöntemle yerinde belli bir derinlikte (AB/2) yanıl yönde öz direnç değişimi araştırılmaya çalışılır. Yerelektrik sondajında ise sabit bir nokta simetri merkezi olacak şekilde, her ölçüm sonucunda bu noktanın iki tarafında elektrodların bir çizgi boyunca açılmasıyla uygulanır. Böylece yerinde düşey yöndeki

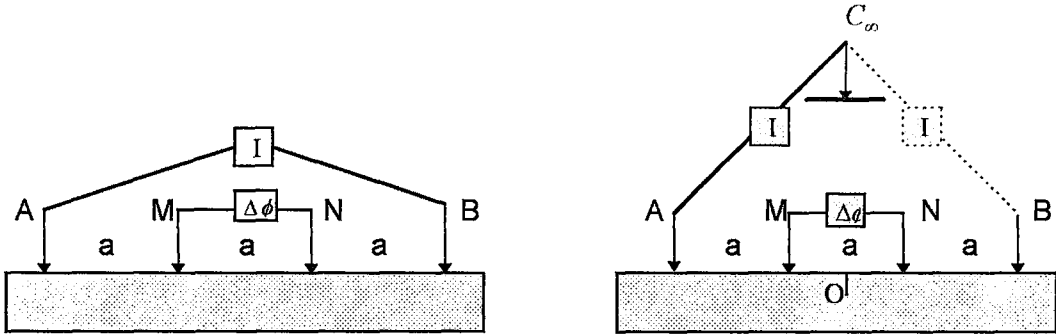
özdirenç değişimi incelenmeye çalışılır. Bu nedenle yöntem, "Düşey Elektrik Sondajı" (DES) (vertical electrical drilling) olarak da isimlendirilmektedir (Bhattacharya ve Patra, 1968).

DAÖ yöntemini arazide uygulamak zahmetli ve pahalı olduğundan eskiden amaca yönelik, profil ya da DES yöntemi ile ölçü alınırdı. Günümüzde geliştirilen çok-kanallı (multi-electrod) düzenekler sayesinde ölçü alımı kolay ve hızlı hale getirildiğinden (van Overmeeren ve Ritsema, 1988; Griffiths ve all.,1996; Dahlin,1996) sondaj-profil ölçüleri alınabilmekte ve ölçüler 2-B değerlendirilebilmektedir. Arkeolojik yapıların aranmasında özellikle 2-B uygulamalar başarılı olmaktadır.

Bu çalışmada sadece Wenner, iki yönlü yarım-Wenner (İYYW) ve iki-yönlü üç elektrod (two-sided three elektrod) dizilimi (İYÜE) kullanılmış ve arkeolojik araştırmalarda İYÜE diziliminin, incelenen diğer elektrod dizilimlerine göre daha kullanışlı olduğu gösterilmeye çalışılmıştır.

3.1.1. Wenner ve İki Yönlü Yarım-Wenner dizilimi

Wenner dizilimi Şekil 3.2 de görülmektedir. Bu dizilimde A ve B den akım uygulaveığında M ve N gerilim elektrodları arasındaki $\Delta\phi$ ölçülür.



Şekil 3.2. Wenner Dizilimi (a), iki yönlü yarım-Wenner dizilimi

Şekil 3.2' de görüldüğü gibi, $\overline{AB} = \overline{MN} = a$ için k_w denklem (3.8) kullanılarak

$$k_w = 2\pi a \quad (3.9)$$

şeklinde bulunur. ρ_{aW} ise denklem (3.7) kullanılarak

$$\rho_{aW} = k_W \frac{\Delta\phi}{I} \quad (3.10.a)$$

şeklinde hesaplanır.

İki yönlü yarım-Wenner dizilimi Şekil 3.2.b de görülmektedir. Burada A,B ve C noktalarında akım elektrodu, M ve N noktalarında ise gerilim elektrodları vardır. Uygulamada A ve C noktalarından akım uygulanır ve M, N arasındaki $\Delta\phi$ ölçülür. Daha sonra A noktasındaki akım elektrodunun, O merkezine göre simetriği olan B ile C den akım verilerek ölçü alımı tekrarlanır. Ölçüler iki yönden ayrı ayrı akım verilerek alındığından iki yönlü olarak adlandırılır. A ve B noktalarındaki elektrodların nokta akım kaynağı gibi davranabilmesi için $\overline{CO} \geq 5\overline{AO} = 5\overline{BO}$ olmalıdır (Bhattacharya ve Patra, 1968, s.35).

A ve C akım elektrodlarından yere akım uygulandığında, k_A ve ρ_{aA} sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_A = 4\pi a \quad (3.11)$$

$$\rho_{aA} = k_A \frac{\Delta\phi}{I} \quad (3.12)$$

B ve C den akım verildiğinde ise k_B ve ρ_{aB} ise

$$k_B = 4\pi a \quad (3.13)$$

$$\rho_{aB} = k_B \frac{\Delta\phi}{I} \quad (3.14)$$

şeklinde hesaplanır. Burada,

$$k_A = k_B = 2k_W$$

olduğu görülmektedir. Homojen ve izotrop bir ortam için

$$\rho_{aA} = \rho_{aB} = \rho_{aW}$$

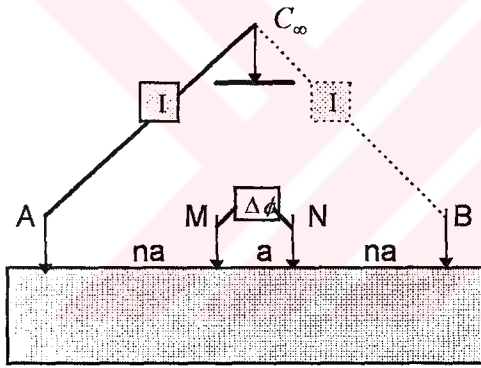
dir. Ayrıca Wenner elektrod dizilimi ile elde edilen GÖ süperpozisyon (superposition) ilkesine göre (Karous ve Pernu 1985),

$$\rho_{aW} = \frac{\rho_{aA} + \rho_{aB}}{2} \quad (10.b)$$

şeklinde de hesaplanabilir.

3.1.2. İki-yönlü üç elektrod dizilimi (two-sided three electrode configuration)

İki-yönlü üç elektrod diziliminde elektrodlar bir doğru boyunca dizilir (Şekil 3.3). Burada A, B ve C noktalarında akım elektrodu, M ve N noktalarında ise gerilim elektrodu vardır.



Şekil 3.3. İki-yönlü üç elektrod dizilimi.

Uygulamada A ve C noktalarından akım uygulanır ve M, N arasındaki $\Delta\phi$ ölçülür. Daha sonra B ve C noktaları için ölçü alımı tekrarlanır. $n=2$ için aynı işlemler uygulanır. n sayısı araştırılmak istenen araştırma derinliğine göre belirlenir. Ölçüler iki yönde ayrı ayrı akım verilerek alındığından iki yönlü olarak adlandırılır. Bu dizilimde de İYYW diziliminde olduğu gibi A ve B noktalarındaki elektrodların nokta akım kaynağı gibi davranabilmesi için $\overline{CO} \geq 5\overline{AO} = 5\overline{BO}$ olmalıdır.

C elektrodu profil doğrultusuna dik uzak bir noktaya yerleştirilirse bir profil ölçüsü boyunca yerinde sabit tutulabilir. Bu dizilimle bir noktada "Düşey Elektrik Sondajı" yapmak için sadece A (veya B) elektrodu her ölçü alımı sonucu 'a' mesafesi kadar kaydırılır. Profil ölçüsü alabilmek için her ölçüm sonunda A,B,M ve N noktalarındaki

elektrodlar 'a' mesafesi kadar profil doğrultusu boyunca kaydırılır. C elektrodu profil doğrultusuna dik ve kullanılacak en büyük AB/2 değerinde en az on kat uzak bir noktaya konursa, bütün profil ölçüsü boyunca yerinde sabit kalabilir.

İYÜE dizilimi için geometrik faktör ve GÖ hesabı izleyen şekilde yapılabilir. A ve C noktasından yere akım uygulaveığında (3.7) bağıntısından öz direnç, ρ_{aA} ;

$$\rho_{aA} = k_A \frac{\Delta \phi}{I} \quad (3.15)$$

ile bulunur. Burada (3.8)' den k_A

$$k_A = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{CM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{CN}} \quad (3.16)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada $CM=CN=\infty$ ve $1/CM=1/CN=0$ dir. $MN=a$, $AM=na$ için k_A yukardaki bağıntıdan

$$k_A = 2\pi an(n+1), \quad n=1,2,3, \dots \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Benzer şekilde B ve C elektrodları ile yere akım uygulaveığında ρ_{aB}

$$\rho_{aB} = k_B \frac{\Delta \phi}{I} \quad (3.18)$$

bağıntısı ile hesaplanır. A ve B den akım verildiğinde sırasıyla k_{AB} ve ρ_{aAB} ,

$$k_{AB} = \pi an(n+1), \quad n=1,2,3, \dots \quad (3.19)$$

$$\rho_{aAB} = k_{AB} \frac{\Delta \phi}{I} \quad (3.20.a)$$

şeklinde bulunur. Burada k_A ve k_B birbirine eşit ve k_{AB} ile

$$k_A = k_B = 2k_{AB}$$

ilişkisi bulunmaktadır. Ayrıca süperpozisyon ilkesine göre

$$\rho_{aAB} = \frac{\rho_{aA} + \rho_{aB}}{2}$$

şeklinde hesaplanabilir (Karous ve Pernu 1985).

$n \geq 3$ olması durumunda yukardaki elektrod dizilimi "İki Yönlü Yarım-Schlumberger Dizilimi" olarak isimlendirilebilir.

3.2. Homojen ve İzotrop Ortam için Sinyal Katkı Kesiti

Yeryüzünde herhangi bir elektrod dizilimi için ölçülen toplam $\Delta\phi$, homojen yarısonsuz ortam için yarım küre hacmi içindeki tüm noktaların gerilim farklarının toplamıdır. Roy ve Apparao (1971) yarısonsuz, homojen bir ortamda ölçülen toplam $\Delta\phi$ na katkısı olan yarım küre hacmi içindeki herhangi bir noktanın $\Delta\phi(x,y,z)$ nın,

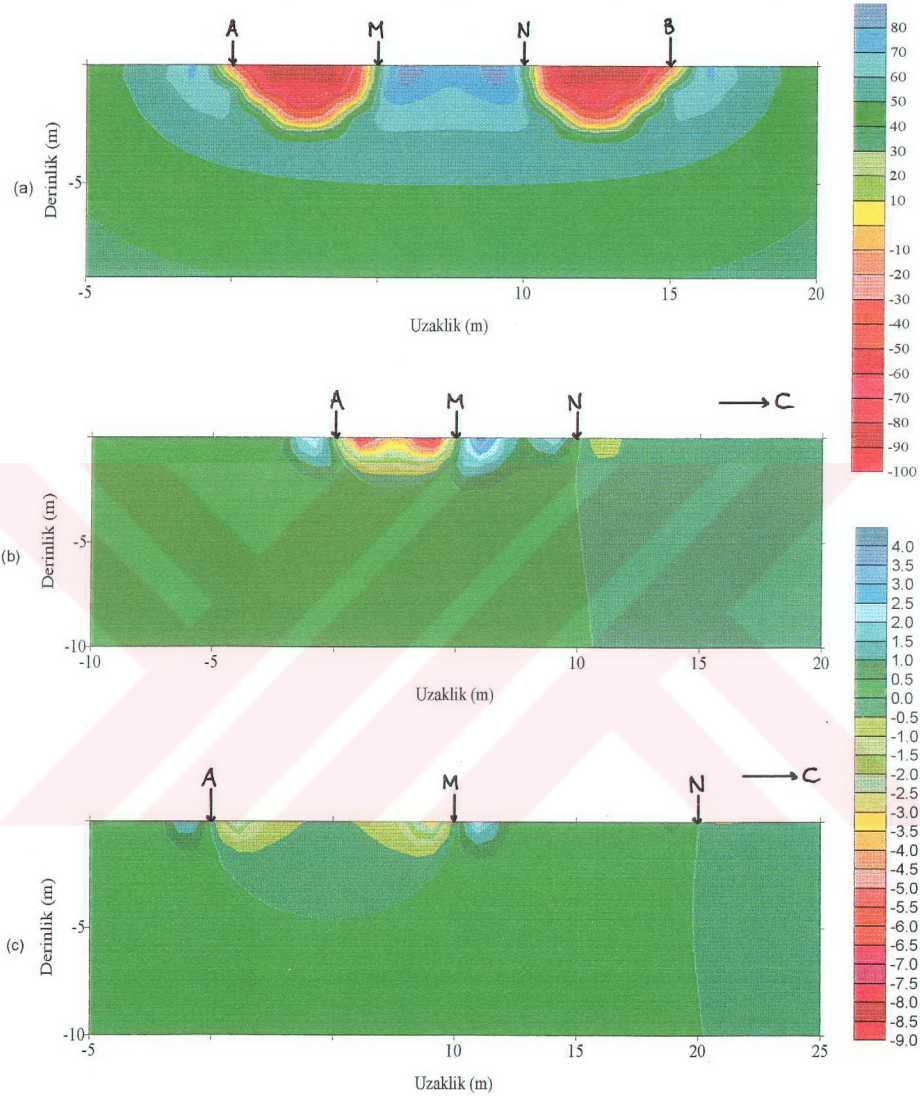
$$\Delta\phi(x,y,z) = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} \{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{3/2}} - \frac{(x-a)(x-a-b-c) + y^2 + z^2}{\{(x-a)^2 + y^2 + z^2\}^{3/2} \{(x-a-b-c)^2 + y^2 + z^2\}^{3/2}} \right. \\ \left. - \frac{x(x-a-b) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} \{(x-a-b)^2 + y^2 + z^2\}^{3/2}} + \frac{(x-a-b)(x-a-b-c) + y^2 + z^2}{\{(x-a-b)^2 + y^2 + z^2\}^{3/2} \{(x-a-b-c)^2 + y^2 + z^2\}^{3/2}} \right] dx dy dz \quad (3.21)$$

bağıntısı ile hesaplanacağını göstermiştir. Burada ρ yarısonsuz ortamın özdirenci ve I yere uygulanan akımdır. Bu bağıntı (x,y,z) kartezyen koordinatlarda yazılmıştır. Burada (x,y) yeryüzü düzlemini ve z -ekseni ise yeriçi doğrultusunu göstermektedir. Elektrodlar x -doğrultusu boyunca dizilmiş olsun. Bu durumda A, B akım elektrodu ve M, N gerilim elektrodu olmak üzere; A elektrodu $(0,0,0)$ noktasında, M elektrodu $(a,0,0)$ noktasında, N elektrodu $(a+b,0,0)$ noktasında, B elektrodu ise $(a+b+c,0,0)$ noktasındadır. (x,y,z) noktalarındaki $\Delta\phi(x,y,z)$ larını istenen elektrod diziliminde hesaplamak için a,b ve c katsayılarını değiştirmek yeterlidir. Örneğin $a=b=c$ alınırsa, $\Delta\phi(x,y,z)$ ları Wenner elektrod dizilimi için hesaplanır. Denklem (3.21) ile herhangi bir (x,y,z) noktasında hesaplanan $\Delta\phi(x,y,z)$, yarısonsuz ortamın cevabı olan toplam $\Delta\phi$ na bölünür (Roy ve Apparao, 1971).

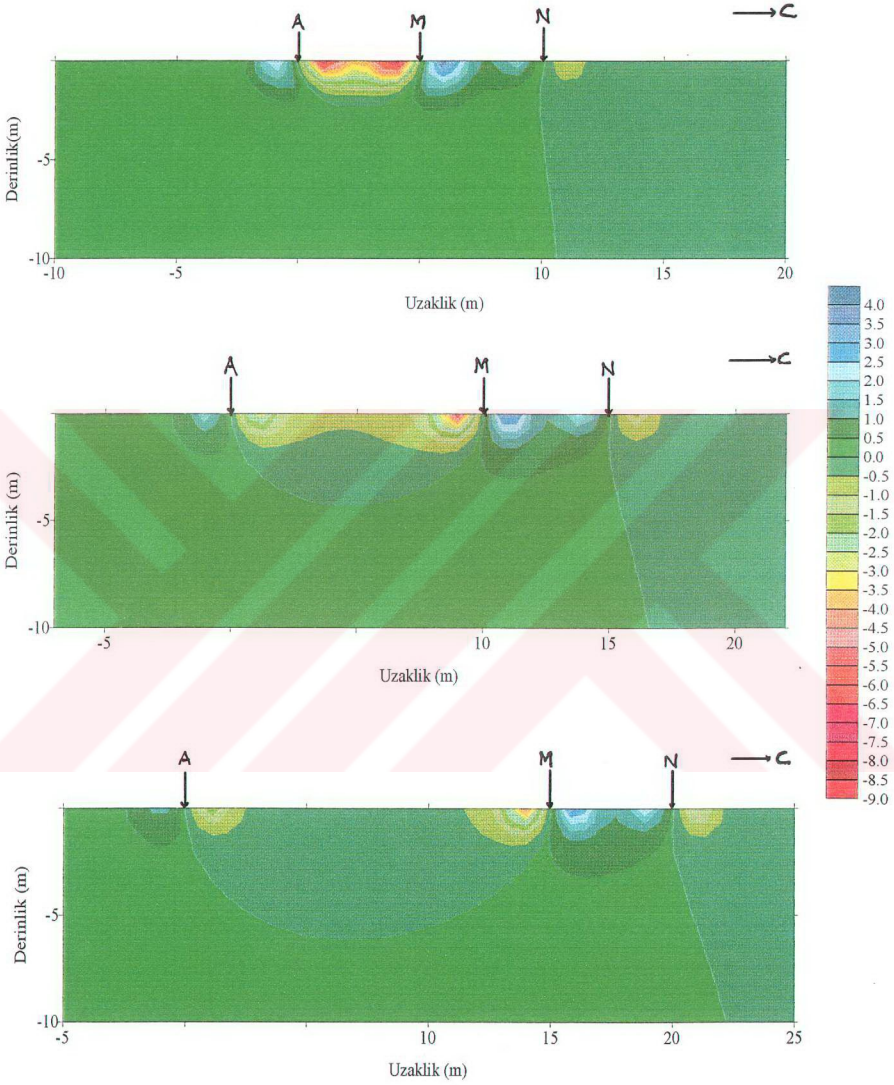
Barker (1979) (3.21) denklemini kullanarak x-z düzlemi üzerinde yeryüzünde ölçülen toplam $\Delta\phi$ na katkısı olan noktaların $\Delta\phi(x,y,z)$ nı hesaplayarak Schlumberger, Wenner, Dipol-Dipol ve Üç gerilim elektrod dizilimleri (Wenner α , Wenner β , Wenner γ) için kontur haritası çizmiştir. Çizdiği bu kontur haritalarına genel olarak " Sinyal Katkı Kesiti " (Signal Contribution Section) demiştir. Sinyal katkı kesiti, bir elektrod dizilimi için elektrodların belli bir konumunda, ölçülen toplam gerilim farkına ($\Delta\phi$) katkısı olan bütün noktalardaki gerilim farklarının ($\Delta\phi(x,y,z)$) elektrod dizilimi doğrultusuna dik düşey yönde bir düzlem üzerinde işaretlenerek çizilen kontur haritası olarak tanımlanabilir.

Şekil 3.4 de Wenner ve İYYW ve Şekil 3.5 de ise İYÜE dizilimi için sinyal katkı kesitleri görülmektedir. Elektrod dizilimleri için çizilen bütün sinyal katkı kesitlerinde, akım ve gerilim elektrodları arasında kalan bölgede $\Delta\phi(x,y,z)$ değerleri negatif değerli, gerilim elektrodları arasında kalan bölgede $\Delta\phi(x,y,z)$ ise pozitif değerli hesaplanmıştır. Bunun anlamı ortamın öz direncine bağlı olarak yeryüzüne yakın ve elektrodlar arasında kalan bir cismin öz direnci ortamın öz direncinden büyük ise, yeryüzünde ölçülen toplam gerilim farkına; cisim bir akım elektrodu ve ona en yakın gerilim elektrodu arasında kalan bölgede ise azalan değerde, cisim birbirine yakın iki gerilim elektrodu veya dipol-dipol elektrod dizilimi için özel durum olan iki akım elektrodu arasında kalan bölgede ise artan değerli katkısı vardır. Yüzeğe yakın ve elektrodlar arasında kalan cismin öz direnci çevre jeolojisinin öz direncinden küçük ise bu olayın tam tersi görülür. Bu nedenle birbirine yakın bir akım ve bir gerilim elektrodu arasında kalan bölge " Negatif Katkı Bölgesi ", iki gerilim veya iki akım elektrodu arasında kalan bölge ise " Pozitif Katkı Bölgesi " olarak isimlendirilir.

Şekil 4.4.c deki gibi bir model ele alınsın. Burada 100 ohm-m öz direncinde homojen bir ortam içinde yeryüzünden 0.25 m. derinlikte 0.5×0.75 m boyutunda, ve 10 ohm-m öz dirençli bir cisim konsun. Bu model için Wenner, yarım-Wenner ve İYÜE dizilimine göre 2-B modelleme yapıldığında GÖ profil eğrilerinde cisim negatif katkı bölgesinde iken ortamdaki öz dirençten büyük GÖ lerin hesaplanması, pozitif katkı bölgesinde iken ortamdaki öz dirençten küçük öz direnç değerinin hesaplanması görülmektedir (Şekil 4.4.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4). Yine aynı model için homojen ortamın öz direnci 10 ohm-m cismin öz direnci ise 100 ohm-m alındığında ise bu olayın tam tersi gözlenmektedir (Şekil 4.9.c). Bu modele göre elektrodlar arasındaki mesafeden küçük



Şekil 3.4. Wenner dizilimi (a) ve yarım-Wenner dizilimi (b),(c) sinyal katkı kesitleri ($a=5$ ve $n=1,2$ için).



Şekil 3.5. İki-yönlü üç elektrod diziliminde; $a=5$ ve $n=1,2$ ve 3 için AMN sinyal katkı kesitleri (a),(b),(c).

ve yüzeye yakın bir kütlelinin, negatif veya pozitif katkı bölgesinde olmasına göre ölçülen $\Delta\phi$ na, negatif veya pozitif değerli bir katkısı olur.

DAÖ yönteminin başlıca sorunu elektrodlar ile çevre jeolojisi arasındaki kontak sorunudur. Bu sorun Şekil 3.4 ve 5 deki sinyal katkı kesitlerinde görülmektedir. Sinyal katkı kesitlerinde, ölçülen toplam $\Delta\phi$ na en çok elektrodların yakınındaki noktaların katkısı olmaktadır. Bu nedenle yüzeye yakın ve küçük cisimler eğer elektrodlara yakın ise ölçülen toplam $\Delta\phi$ farkına büyük orvea bu cismin katkısı olacaktır. Eğer amaç derin araştırmalar ise yüzeye yakın gömülü kütlelerin sinyale katkısı gürültü olarak değerlendirilecektir ve bu etki giderilmeye çalışılacaktır. Bu amaç için Barker (1981) offset-Wenner elektrod dizilimini önermiştir. Fakat arkeolojik amaçlı jeofizik çalışmalarda amaç daha çok yüzeye yakın gömülü kütlelerin araştırılması olduğundan, bu kütlelerin ölçülen toplam $\Delta\phi$ na katkısı sinyal olarak değerlendirilir. Bu nedenle bu kütleleri en iyi temsil eden belirtiyi verecek elektrod dizilimi araştırılmalıdır.

3.2.1. Wenner ve yarım Wenner elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti

Şekil 3.5 de Wenner ve yarım-Wenner elektrod dizilimi sinyal katkı kesitleri görülmektedir. Burada sinyale en çok elektrodlara yakın noktaların katkısı vardır. Pozitif katkı bölgesi ve negatif katkı bölgesinin ise yaklaşık eşit değerlerde sinyale katkısı vardır. Şekil 4.4.c de görülen model için Wenner elektrod dizilimine göre 2-B modelleme yapıldığında, cisim negatif ve pozitif katkı bölgesinde iken, genel olarak bütün AB/3 seviyelerinde ortamın öz direncinden küçük GÖ değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.4.b4). Yarım-Wenner dizilimi için ise cisim negatif katkı bölgesinde iken ortamın öz direncinden az büyük GÖ değerleri hesaplanmış, cisim pozitif katkı bölgesinde iken ise ortamın öz direncinden az küçük GÖ değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.4.b1, b2). Genel olarak GÖ seviye eğrilerinde cisimden dolayı ani bir sıçrama görülmemektedir. Cismin etkisi tüm eğrilerde; genel bir azalma (veya artma) şeklinde görülmektedir. Buna göre, Wenner ve yarım-Wenner elektrod dizilimi ile yanal ayrımlılığın iyi incelenemeyeceği söylenebilir. Tabakalı bir ortamda (1-B) ise bu dizilimin düşey ayrımlılığı büyüktür (Barker, 1981).

3.2.2. İki-yönlü üç elektrod dizilimi sinyal katkı kesiti

İYÜE dizilim için sinyal katkı kesiti Şekil 3.4 de görülmektedir. Burada, sinyale en çok pozitif katkı bölgesindeki noktaların katkısı olduğu görülmektedir. Derin amaçlı DES ölçüsü alınıyorsa pozitif katkı bölgesindeki yüzeye yakın gömülü bir kütlelin sinyale katkısı çok büyük (veya küçük) değerli gürültü olacaktır (Şekil 4.4.a1,a2). Fakat yüzeye yakın gömülü kütlelerin araştırılması amaçlı profil ölçüsü alınıyorsa, aynı cisim negatif katkı bölgesinde ise sinyale katkısı az görülecektir. Cisim pozitif katkı bölgesinde iken ise sinyale katkısı çok büyük olacaktır. İYÜE diziliminde ölçülen GÖ değeri M ve N elektrodlarının orta noktasının altına yerleştirilmektedir. Buna göre pozitif katkı bölgesindeki bir cismin yeri doğru olarak belirlenmiş olacaktır. Ayrıca cisim negatif katkı bölgesinde iken sinyale katkısı az olmaktadır ve bu etki İYÜE dizilimi ile ölçülen GÖ değerlerine uygulanan gradyen dönüşümü (Karous ve Pernu 1985) ve iki yönlü gradyen dönüşümü ile giderilebilir.

Genel olarak İYÜE diziliminin sıg araştırmalar için kullanışlı olduğu söylenebilir.

3.3. Uygulanan Veri İşlem Teknikleri

İYÜE dizilimi ile ölçülen ρ_{a1} ve ρ_{aB} değerleri ile çizilen eğriler homojen ve izotrop katmanlardan oluşan yeraltı yapılarında üst üste çakışır (bkz Şekil 4.28). Yeraltındaki yanal süreksizliklerden dolayı bu eğriler farklı davranış gösterebilirler. Eğrilerin birbirlerine göre davranışları yeraltı hakkında daha fazla bilgi edinmemizi sağlar. ρ_{a1} ve ρ_{aB} değerlerini kullanarak yeraltının yanal yöndeki değişimi Karous ve Pernu (1984) nun "Gradyen Dönüşümü" (Gradient Transformation) olarak isimlendirdikleri aşağıdaki bağıntı ile incelenebilir.

$$G(a) = \frac{\rho_{a1}(a)}{\rho_{a1}(a + \Delta a)} + \frac{\rho_{aB}(a)}{\rho_{aB}(a - \Delta a)} - 2 \quad (3.22)$$

Bu bağıntıda; Δa profildeki ölçü noktaları arasındaki uzaklık ve N adet profil ölçüsü için $a = 2, 3, \dots, N-1$ değerlerine eşittir. Örneğin 5 numaralı ölçü noktası için G değeri aşağıdaki gibi yazılabilir (Bkz. Şekil 4.4.c).

$$G(5) = \frac{\rho_{aA}(5)}{\rho_{aA}(6)} + \frac{\rho_{aB}(5)}{\rho_{aB}(4)} - 2$$

Bu denklem pozitif katkı bölgesi ve negatif katkı bölgesi kavramları kullanılarak şu şekilde açıklanabilir: Şekil 4.10.c deki gibi, 10 ohm-m özdirençli homojen bir ortamda beş numaralı ölçü noktası altında 100 ohm-m özdirençli küçük bir cisim olsun. Beş numaralı ölçü noktasında cisim pozitif katkı bölgesinde (MN arasında) olduğundan ortamda olmayan yüksek bir özdirenç değeri ölçülecektir. Dört ve üç numaralı ölçü noktalarında ise cisim negatif katkı bölgesinde (sırasıyla A, M ve M, B arasında) kalacak ve buralarda ortamda olmayan küçük değerler ölçülecektir (Bkz. Şekil 4.1.a1,a2,a3,a4,b1,b2,b3,b4). Bu durumda $\rho_{aA}(5)/\rho_{aA}(6)$, $\rho_{aB}(5)/\rho_{aB}(4)$ oranları birden büyük olacak G(5) değeri sıfırdan büyük hesaplanacaktır.

Denklem (3.22) ye benzer aşağıdaki gibi bir denklem yazılabilir.

$$TSG(a) = \frac{\rho_{aA}(a)}{\rho_{aA}(a + \Delta a)} + \frac{\rho_{aA}(a)}{\rho_{aA}(a - \Delta a)} + \frac{\rho_{aB}(a)}{\rho_{aB}(a + \Delta a)} + \frac{\rho_{aB}(a)}{\rho_{aB}(a - \Delta a)} - 4 \quad (3.23)$$

Yukardaki bağıntıda gradyen 'i hesaplanacak noktanın her iki tarafındaki ρ_{aA} ve ρ_{aB} değerleride kullanıldığından "İki-Yönlü Gradyen" (Two-Sided Gradient -TSG) dönüşümü olarak isimlendirmiştir. Yine Şekil 4.3.c deki model gözönüne alınırsa, Beş numaralı ölçü noktası için (3.23) bağıntısı

$$TSG(5) = \frac{\rho_{aA}(5)}{\rho_{aA}(4)} + \frac{\rho_{aA}(5)}{\rho_{aA}(6)} + \frac{\rho_{aB}(5)}{\rho_{aB}(4)} + \frac{\rho_{aB}(5)}{\rho_{aB}(6)} - 4$$

şeklinde yazılabilir. Burada (3.22) deki $\rho_{aA}(5)/\rho_{aA}(6)$, $\rho_{aB}(5)/\rho_{aB}(4)$ oranlarından ayrı $\rho_{aA}(5)/\rho_{aA}(4)$, $\rho_{aB}(5)/\rho_{aB}(6)$ oranlarında eklenmiş ve bu oranların hepside (4.22) bağıntısı için anlatılan sebeplerden dolayı birden büyük olacaktır.

Sıfır ve bir arasındaki bir sayının karesi kendisinden küçük olur. Bir' den büyük bir sayının karesi ise kendisinden büyük olur. Buna göre (3.22) ve (3.23) bağıntıları Sinyal/ Gürültü oranını artırmak için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$G^2(a) = \left(\frac{\rho_{ai}(a)}{\rho_{ai}(a + \Delta a)} \right)^2 + \left(\frac{\rho_{ab}(a)}{\rho_{ab}(a - \Delta a)} \right)^2 - 2 \quad (3.24)$$

$$TSG^2(a) = \left(\frac{\rho_{ai}(a)}{\rho_{ai}(a + \Delta a)} \right)^2 + \left(\frac{\rho_{ai}(a)}{\rho_{ai}(a - \Delta a)} \right)^2 + \left(\frac{\rho_{ab}(a)}{\rho_{ab}(a + \Delta a)} \right)^2 + \left(\frac{\rho_{ab}(a)}{\rho_{ab}(a - \Delta a)} \right)^2 - 4 \quad (3.25)$$

Denklem (3.22), (3.23), (3.24) ve (3.25) ile, örneğin N adet profil verisi için (N-2) adet G, G^2 , TSG ve TSG^2 değeri hesaplanır ve bu değerler kullanılarak profil eğrileri çizilebilir. Yine aynı profil için ölçü noktalarında farklı AB/2 değerleri için de bu değerler hesaplanarak G, G^2 , TSG ve TSG^2 yapma-kesitleri çizilebilir.

Bu çalışmada G, G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri, 2-B modelleme ile hesaplanan GÖ değerlerinden bulunmuş ve yanal süreksizliklerin belirlenmesinde bu dönüşümlerin kullanılabilirliği, bu değerler ile profil eğrileri ve yapma-kesitler çizilerek incelenmiştir.

4. MODELLEMELER

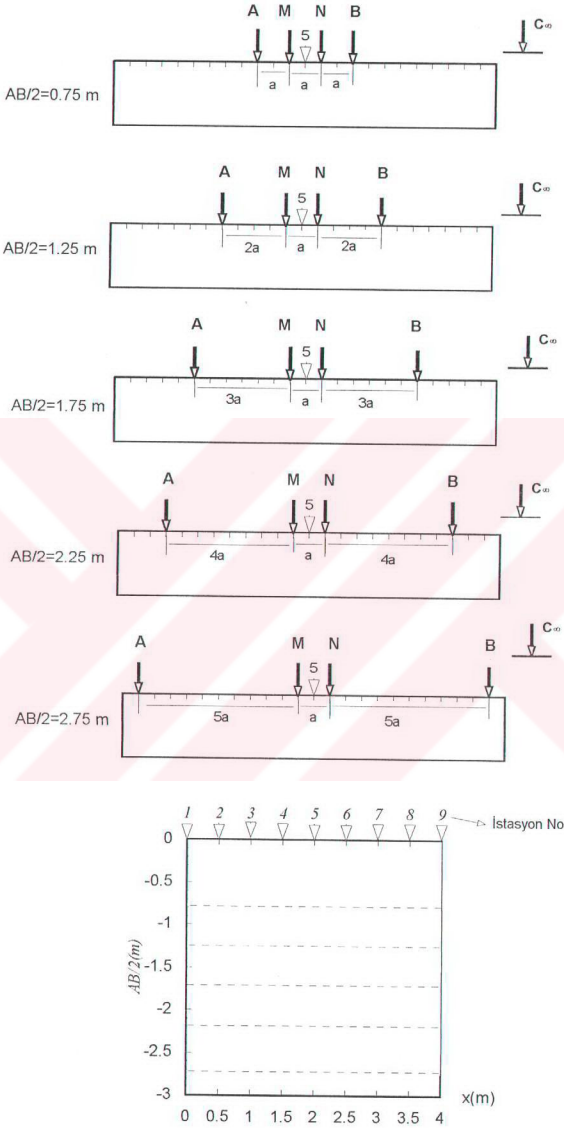
Bu çalışmada modellemeler, iki-yönlü üç elektrod dizilimi (İYÜE), iki yönlü yarım-Wenner (İYYW) dizilimi ve Wenner dizilimine göre yapılmıştır.

İYÜE dizilimi ile yapılan modellemelerde Uchida' nın (1990) sonlu elemanlar yöntemi ile 2-B ters çözüm yapan programı kullanılmıştır. Bu programda düz çözüm sadece Schlumberger dizilimine göre yapılmaktadır. Bu nedenle programın düz çözüm bölümü İYÜE dizilimine göre de modelleme yapılacak şekilde düzenlenmiştir.

İYYW ve Wenner dizilimi ile yapılan modellemelerde ise Dey' in (1976) sonlu farklar yöntemine göre 2-B modelleme yapan programı kullanılmıştır. Bu program Schlumberger dizilimi, Wenner dizilimi ve dipol-dipol dizilimine göre modelleme yapmaktadır. Bu programda İYYW dizilimine göre modelleme yapacak şekilde düzenlenmiştir.

Modellemelerde bir profil boyunca toplam 9 istasyonda GÖ değerleri hesaplanmıştır. İYÜE diziliminde; her istasyonda toplam altı seviyede olacak şekilde $\overline{MN} = 0.5$ m için $\overline{AB}/2 = 0.75, 1.25, 1.75, 2.25, 2.75$ ve 3.25 m seviyelerinde GÖ hesaplanmıştır. İYYW dizilimi ve Wenner diziliminde ise; her istasyonda toplam beş seviyede olacak şekilde $\overline{AB}/3 = 0.75, 1.50, 2.25, 3.00$ ve 3.75 m seviyelerinde GÖ hesaplanmıştır. Şekil 4.1 de şematik olarak İYÜE dizilimi için ölçü istasyonları ile A, B, C, M ve N elektrodlarının her seviye için konumları gösterilmektedir.

İYÜE ve İYYW dizilimi için; A ve C den akım verip M ve N arasındaki $\Delta\phi$ ile hesaplanan GÖ değerlerine AMN (profil eğrilerinde ρ_{aA}), B ve C den akım verip M ve N arasındaki $\Delta\phi$ ile hesaplanan GÖ değerlerine MNB (profil eğrilerinde ρ_{aB}) ve AMN ile MNB nin aritmetik ortalamasından hesaplanan GÖ değerlerine ise $(AMN+MNB)/2$ (profil eğrilerinde ρ'_{aAB}) denilmiştir. Yine A ve B den akım verip M ve N arasındaki $\Delta\phi$ ile hesaplanan GÖ değerlerine ρ_{aAB} (profil eğrilerinde AMNB) denmiştir. Wenner dizilimine göre hesaplanan GÖ değerlerine ise ρ_{aW} denilmiştir. İYÜE diziliminde ρ'_{aAB} nin ρ_{aAB} ye eşit olması gerekmektedir ve bu iki değer yapılan modellemelerde eşit olduğu gözlenmiştir. İYYW diziliminde hesaplanan ρ_{aA} ve ρ_{aB} nin aritmetik



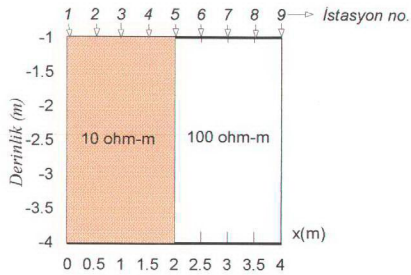
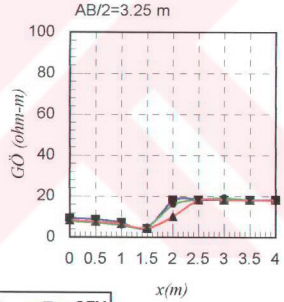
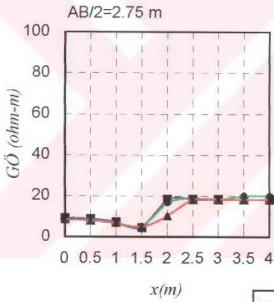
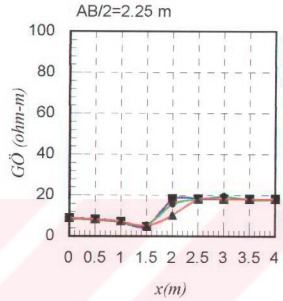
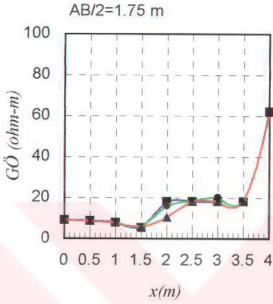
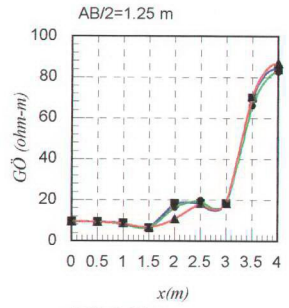
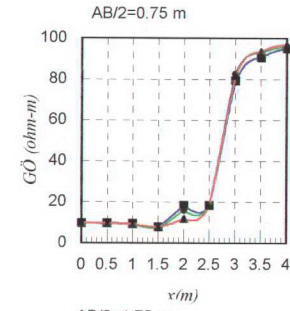
Şekil 4.1. Şematik olarak 2-B yer modeli üzerinde dokuz adet istasyon ve A,B ve C akım elektrodları ile M ve N gerilim elektrodlarının İYÜE dizilimi için farklı $AB/2$ seviyelerinde profil üzerindeki konumları ($a=0.5$ m için).

ortalamasından hesaplanan ρ'_{a1B} nin ρ_{a1B} ye eşit olması gerekmektedir. Fakat iki değer in yapılan modellemelerde birbirine eşit olmadığı gözlenmiştir. Aradaki fark in, kullanılan 2-B modelleme programında, uygulanan sonlu farklar sayısal çözüm yöntemindeki bazı kabullerden kaynaklı veği söylenebilir.

Uchida(1995), programında hesaplanan $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ değerlerini Fourier cosinüs dönüşümü ile $\phi(x, y, z)$ değerlerine dönüştürmek için 14 adet k_y katsayısı kullanılmaktadır. Bu katsayılar, kullanılan AB/2 değerleri ile ağ üzerindeki elemanların boyutlarına bağıli otomatik olarak hesaplanmaktadır. Dey' in (1976) programında ise yedi adet k_y katsayısı kullanılmaktadır. Bu katsayılar ise giriş (input) dosyasında sabit değer olarak yazılmakta ve bütün AB/2 değerleri için aynı katsayılar kullanılmaktadır. Dey' in (1976) programı ile homojen ortam için farklı AB/2 değerleri ile yapılan modellemelerde aynı k_y katsayıları için hesaplanan GÖ değerleri birbirinden çok farklı olmaktadır. Bu nedenle her farklı AB/2 (veya AB/3) seviyesi için k_y katsayıları, hesaplanan GÖ in homojen ortamın öz direncine eşit olacak şekilde deneme yanılma yolu ile yeniden hesaplanmıştır. Yapılan tüm modellemelerde ise bulunan bu k_y katsayıları kullanılmıştır.

Fay modelinin analitik hesabını yapan bir bilgisayar programı yazılmıştır (Bkz. Ek-E) Bu program kullanılarak fay modeline göre analitik çözüm yapılmış ve aynı model için sonlu elemanlar ve sonlu farklar sayısal çözüm yöntemleri ile 2-B modelleme yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.2). Ayrıca GÖ tanımına göre; homojen ve izotrop ortam için hesaplanan GÖ in ortamın öz direncine eşit olması gerekmektedir. Her iki sayısal çözüm yöntemi de kullanılarak homojen ortam için belirlenen AB/2 (veya İYYW ve Wenner diziliminde AB/3) değerlerinde 2-B modellemeler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan GÖ değerleri %3.27 toplam hata ile ortamın öz direncine eşit hesaplanmıştır. Sonlu farklar yöntemi ile hesaplanan GÖ değerleri ise %2-4 toplam hata ile ortamın öz direncine eşit hesaplanmıştır. Sonlu farklar yöntemine göre 2-B modelleme yapan program bir profil boyunca sabit AB/2 seviyesi için çalıştırılmaktadır. Bu nedenle her AB/2 seviyesi için toplam hata farklı çıkmıştır.

Bu çalışmanın amacı arkeolojik amaçlı yapıların aranmasında kullanılacak en uygun elektrod dizilimini belirlemek olduğundan, yapılan modellemelerde daha çok arkeolojik



Şekil 4.2. İYÜE dizilimine göre Analitik çözüm, SEY ile 2-B modelleme ve SFY ile 2-B modelleme ile hesaplanan $G\ddot{O}$ profil eğrileri (MN=0.5 için AB/2=0.75, 1.25, 1.75, 2.25, 2.75 ve 3.25 m seviyelerinde) ve yer modeli.

yapılara benzer modeller seçilmiştir. Modelleme sonucunda hesaplanan GÖ değerleri ile GÖ yapma-kesitleri, GÖ profil eğrileri ve GÖ düşey elektrik sondajı (DES) eğrileri çizilmiştir. Ayrıca Karous ve Pernu' nun (1985) önerdiği ve yanal yöndeki öz direnç değişimini belirlemede kullanılan gradyen (G) dönüşümü ve yine aynı amaç için bu çalışma kapsamında içinde önerilen iki-yönlü gradyen (TSG) dönüşümü ile G^2 ve TSG^2 değerleri, modelleme ile hesaplanan GÖ değerlerinden hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerle çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler de incelenmiştir.

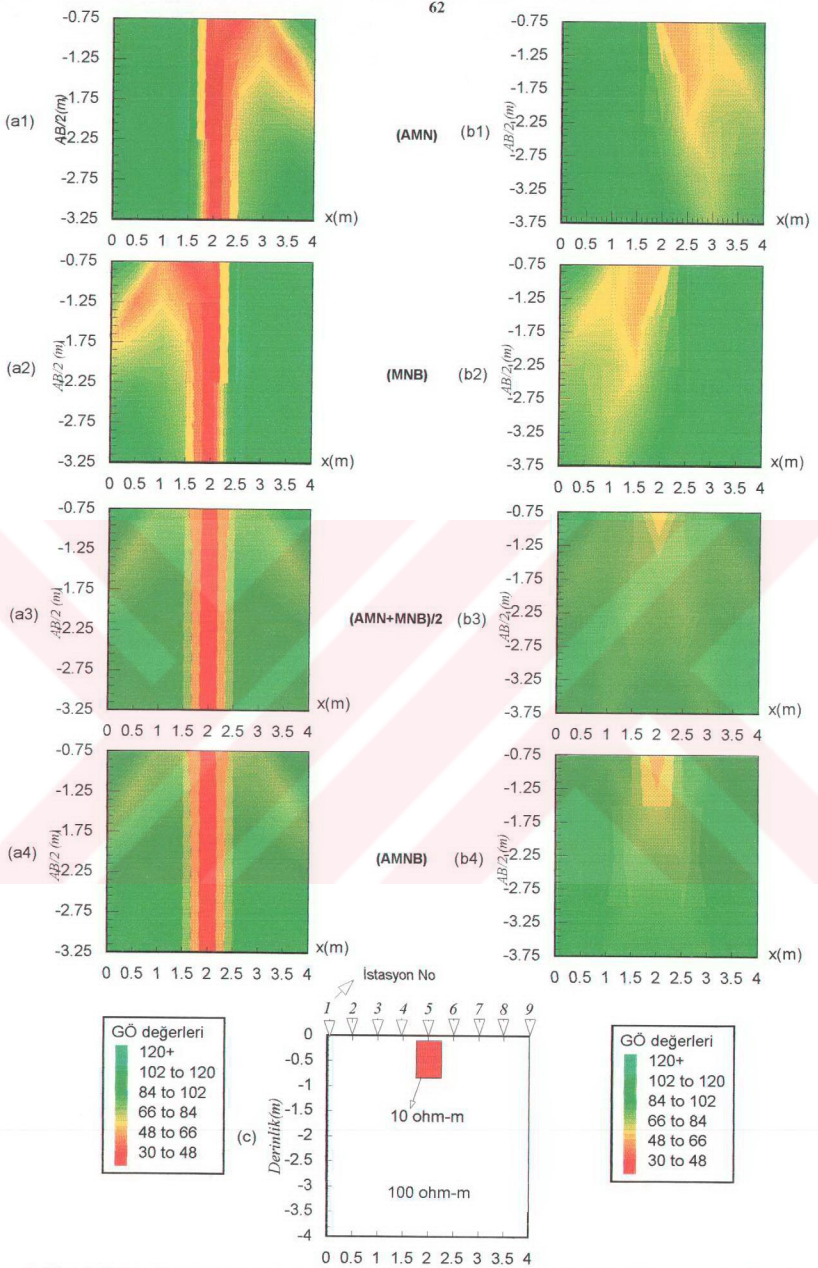
Birbiri ile karşılaştırılan İYÜE ve İYYW dizilimleri ile elde edilen GÖ değerleri için çizilen grafiklerde maximum ve minimum değerler eşit alınmıştır. Yine birbiri ile karşılaştırılan G ve TSG ile G^2 ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitlerde de maximum ve minimum değerler eşit alınmıştır.

Ölçülen veya modelleme ile hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesitler, profil eğrileri ve DES eğrileri nitel yorumlamada kullanılan grafiklerdir. Bu grafiklere bakılarak jeolojik modelin ne olduğu tam olarak yorumlanamaz. Fakat bu grafikler nicel yorumlamada bir ön bilgi (a priori information) verir. Bu çalışmada, modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen grafiklere bakılırken yukardaki açıklama gözönünde bulundurulmalıdır.

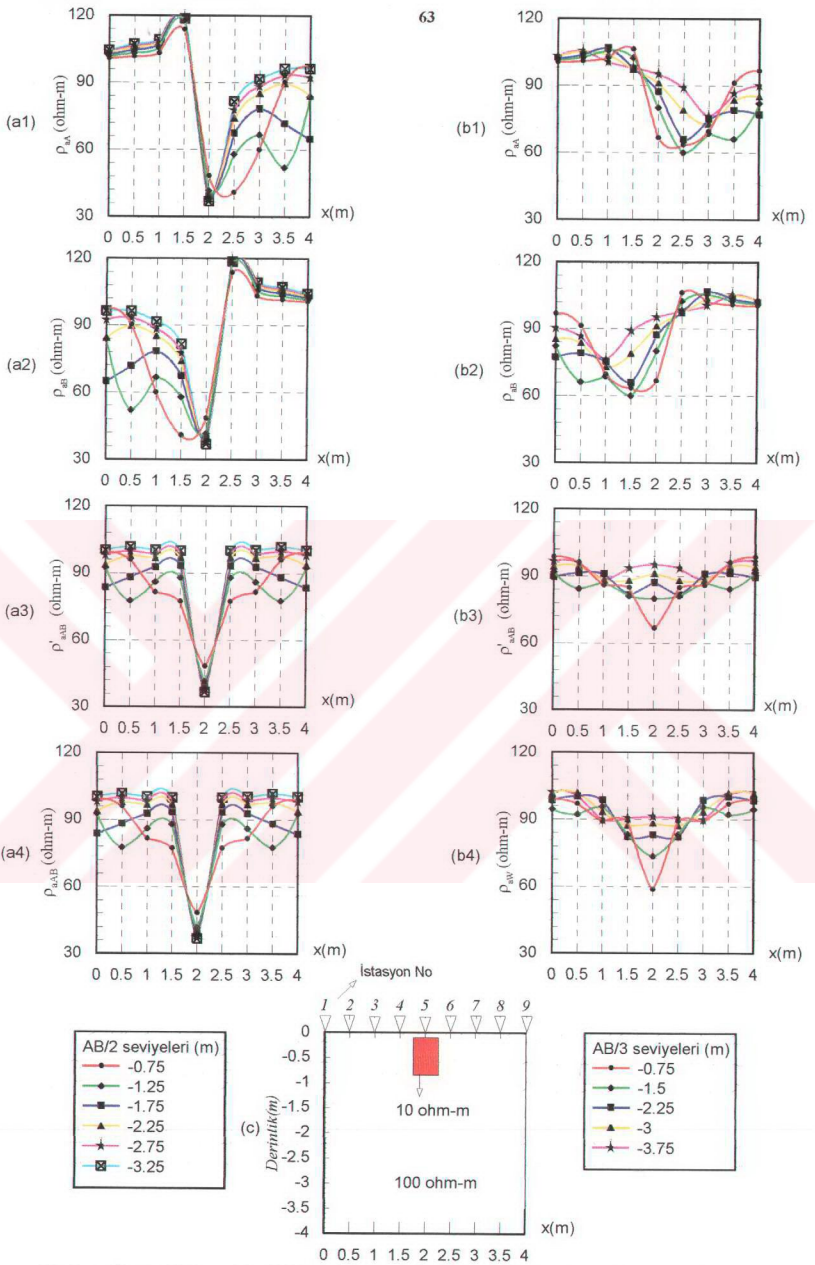
4.1. Model 1

Birinci modelde 100 ohm-m öz dirençli homojen bir ortam içine, 0,25 m derinlikte $0,5 \times 0,75$ m boyutunda 10 ohm-m öz dirençli bir cisim konmuştur (Şekil 4.3.c). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.3.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.4.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' da görülmektedir.

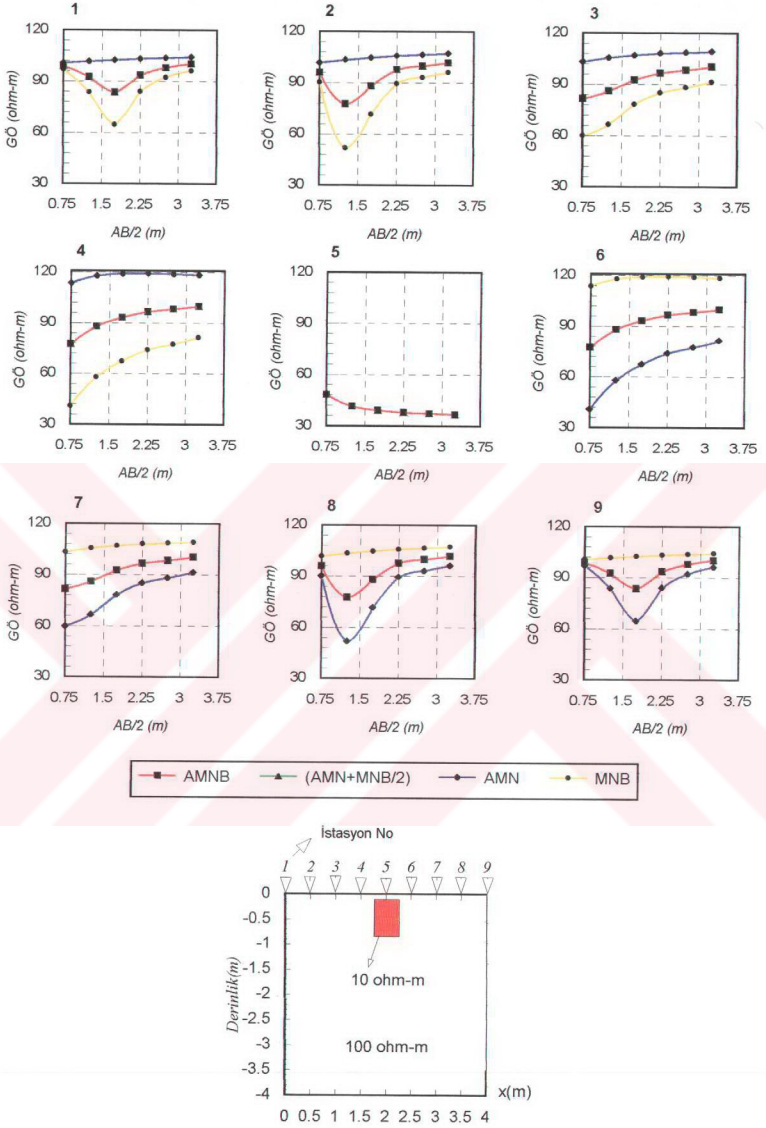
Bütün elektrod dizilimleri için cismin üstündeki 5 numaralı ölçü noktasında GÖ değerleri homojen ortamın öz direncinden küçük hesaplanmıştır. Fakat gömülü kütlelin etkisi; İYÜE dizilimi için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde, İYYW dizilimi için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinden daha belirgin gözlenmektedir (Şekil 4.3.a1, a2, b1, b2, Şekil 4.4.a1, a2, b1, b2). Her iki elektrod diziliminde de ρ_{a1} GÖ değerleri için çizilen yapma-kesitlerde cismin olduğu yerin sağ tarafında bir gölge belirtir gözlenmektedir. Bu gölge belirtir, ρ_{ab} GÖ değerleri için çizilen yapma-kesitlerde ise sol



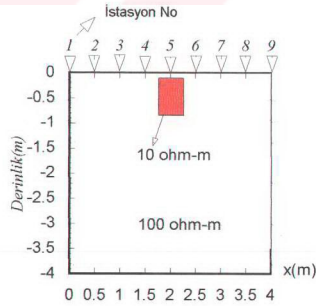
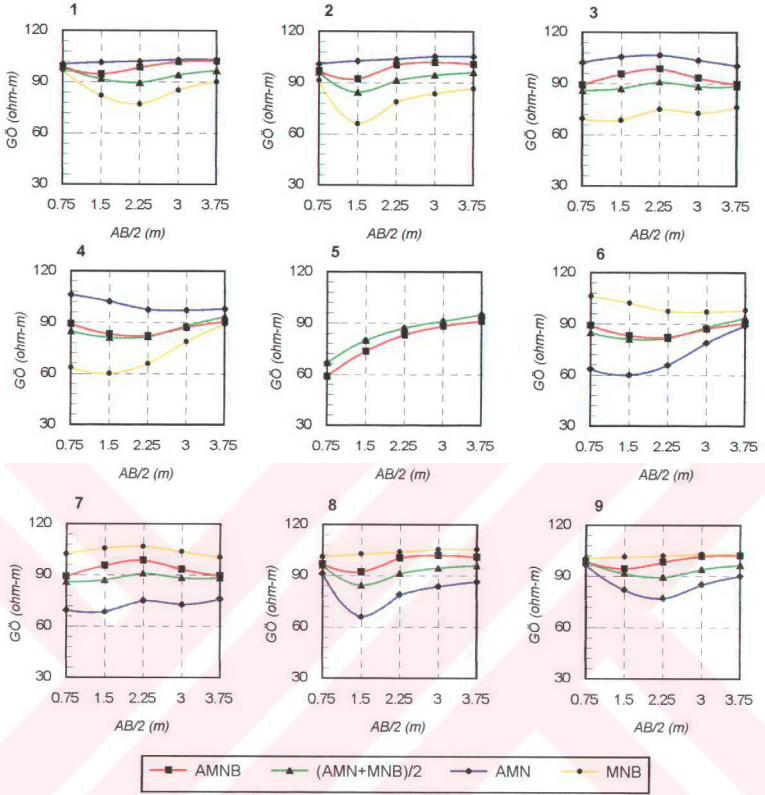
Şekil 4.3. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma kesiti (a1), MNB GÖ yapma kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma kesiti (a3), AMNB GÖ yapma kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma kesiti (b1), MNB GÖ yapma kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma kesiti (b4) ve yer modeli (c).



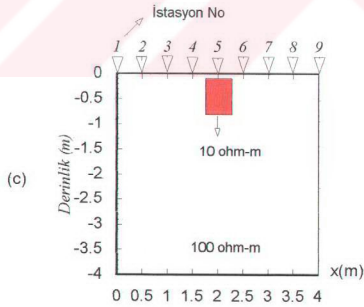
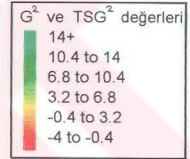
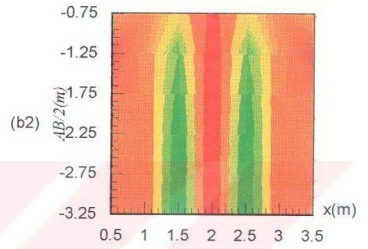
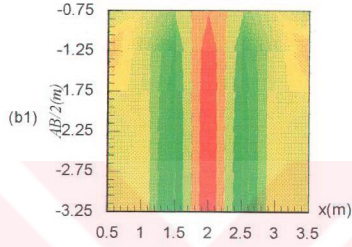
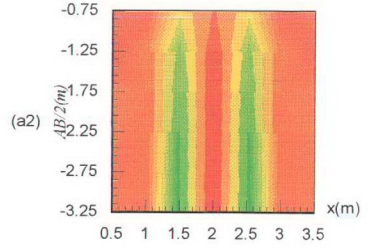
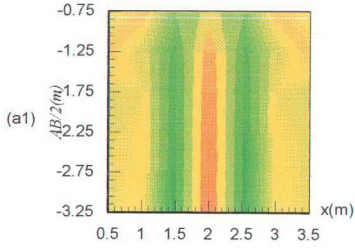
Şekil 4.4. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için; ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için; ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1) ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2) ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{aW} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



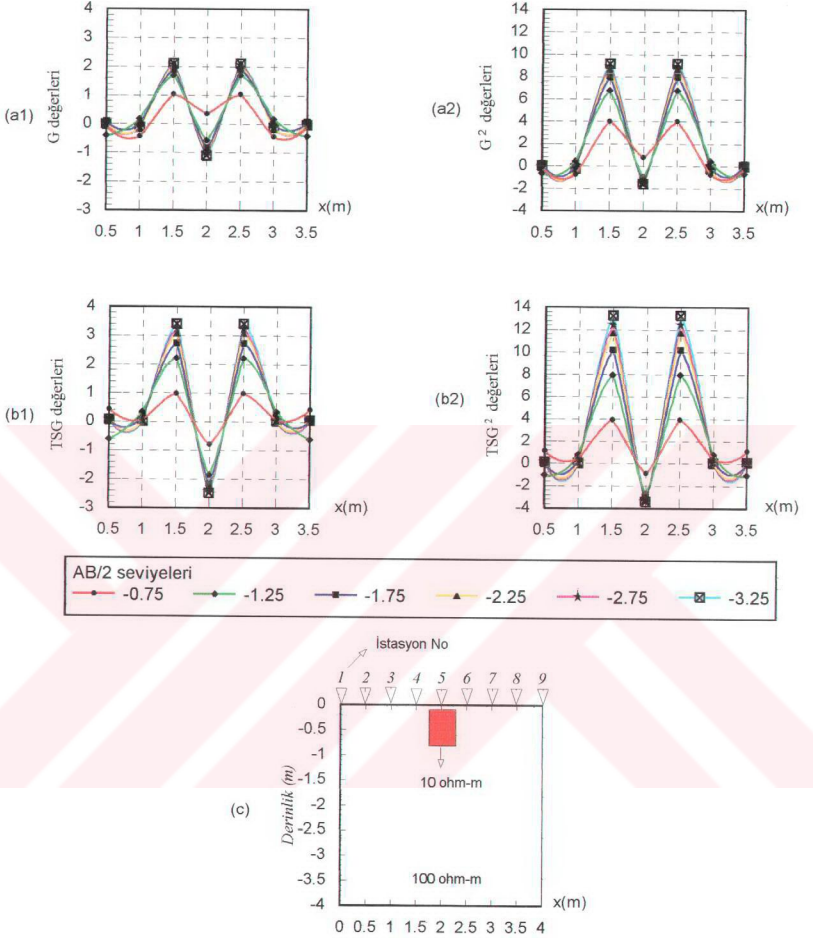
Şekil 4.5. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2 ve AMNB düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.6. İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN, MNB, $(AMN+MNB)/2$, Wenner dizilimi düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.7. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c).



Şekil 4.8. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G² değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG² değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

tarafına gözlenmektedir. İYÜE ve İYYW dizilimi için ayrı ayrı hesaplanan ρ_{aA} ve ρ_{aB} GÖ değerlerinin aritmetik ortalamasından bulunan ρ'_{aAB} GÖ yapma-kesitinde ise bu gölge belirtiler yok olmaktadır Şekil (4.3.a3,b3). İYÜE diziliminde, ρ'_{aAB} GÖ değerleri için çizilen profil eğrilerinde cismin olduğu yerde bir pik görülmektedir (Şekil 4.4.a3). Bu pik, İYYW dizilimi verilerinden hesaplanan, ρ'_{aAB} GÖ değerlerinde ise belirgin olarak gözlenmemektedir.

Şekil 4.5 de İYÜE dizilimi için ρ_{aA} , ρ_{aB} , ρ_{aAB} ve ρ'_{aAB} GÖ DES eğrileri görülmektedir. 2-B gömülü cismin tam üstü olan 5 numaralı ölçü noktasında bütün dizimler için çizilen DES eğrileri azalan tiptedir ve üstüste çakışmışlardır. Eğrilerin bu noktada azalan tipte olmasının sebebi cismin 5 numaralı ölçü noktasında pozitif katkı bölgesinde (M ve N arasında) kalmasıdır. Yine 5 numaralı ölçü noktasının her iki tarafında bulunan 1-9, 2-8, 3-7 ve 4-6 ölçü noktaları için çizilen sondaj eğrileri birbirinin simetrisi durumundadır. 1 ve 2 numaralı istasyonda ρ_{aB} , ρ_{aAB} ve ρ'_{aAB} ölçü değerlerinde cisim AB/2=0.75,1.25 ve 1.75 m seviyeleri için B elektrodunun sağında (8 ve 9 numaralı istasyon için A'nın solunda) (pozitif katkı bölgesinde) kaldığından GÖ eğrisi azalan tipte ve AB/2=2.25,2.75 ve 3.25 m seviyelerinde ise cisim negatif katkı bölgesinde (B ve N arasında) olduğundan DES eğrisi artan tiptedir. Yine 1 ve 2 numaralı ölçü noktalarında ρ_{aA} DES eğrisinde (8 ve 9 numaralı ölçü noktalarında ρ_{aB} DES eğrisinde) cismin etkisi görülmemektedir. 3,4,5,6 ve 7 numaralı ölçü noktalarında ise cisim bütün AB/2 seviyelerinde negatif katkı bölgesinde kaldığından elektrod dizimleri için DES eğrileri artan tiptedir.

Şekil 4.6 da İYYW dizilimi için ρ_{aA} , ρ_{aB} , ρ'_{aAB} ve ρ_{aW} GÖ DES eğrileri görülmektedir. Burada da 1,2,8 ve 9 numaralı ölçü noktaları için çizilen DES eğrilerinin davranışı, İYÜE diziliminde aynı numaralı noktaların DES eğrilerinin davranışına benzemektedir ve aynı açıklamalar burada da yapılabilir. 3 ve 7 numaralı ölçü noktalarında AB/2=0.75,1.5 ve 2.25 m seviyeleri için İYYW ve ρ_{aW} DES eğrileri, negatif katkı bölgesinde kaldığından az eğimli olarak artan tiptedir. AB/2=3.0,3.75 m seviyelerinde ise cisim pozitif katkı bölgesinde kaldığından DES eğrileri azalan tiptedir. Yine 4 ve 6 numaralı ölçü noktalarında ise eğriler 3 ve 7 numaralı ölçü noktalarının tersi davranış göstermektedir. 5 numaralı ölçü noktası için çizilen bütün DES eğrileri artan tiptedir. Bunun sebebi; M ve N noktalarındaki elektrodların her ölçü sonucu açılması ve cismin

sinyale katkısının azalması olabilir. Burada eğrilerin eğimi İYÜE dizilimi için çizilen DES eğrilerine göre daha azdır.

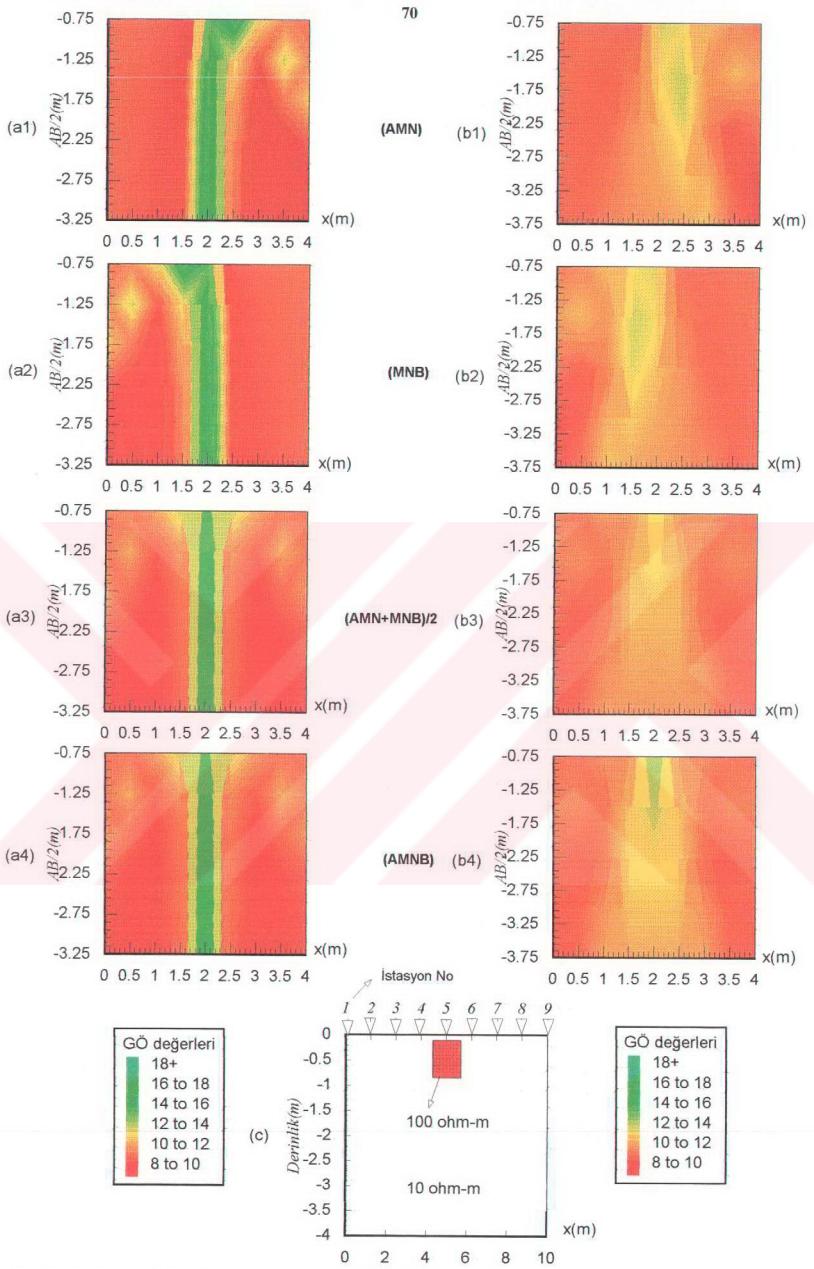
Yine aynı model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{a1} ve ρ_{aB} ile bulunun G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 de görülmektedir. Burada, cismin olduğu yerde belirti değeri; TSG ve TSG^2 çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde, G ve G^2 değerleri için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinden daha büyüktür. Fakat çizilen grafiklere bakarak cismin derinliği hakkında birşey söylenemez.

4.2. Model 2

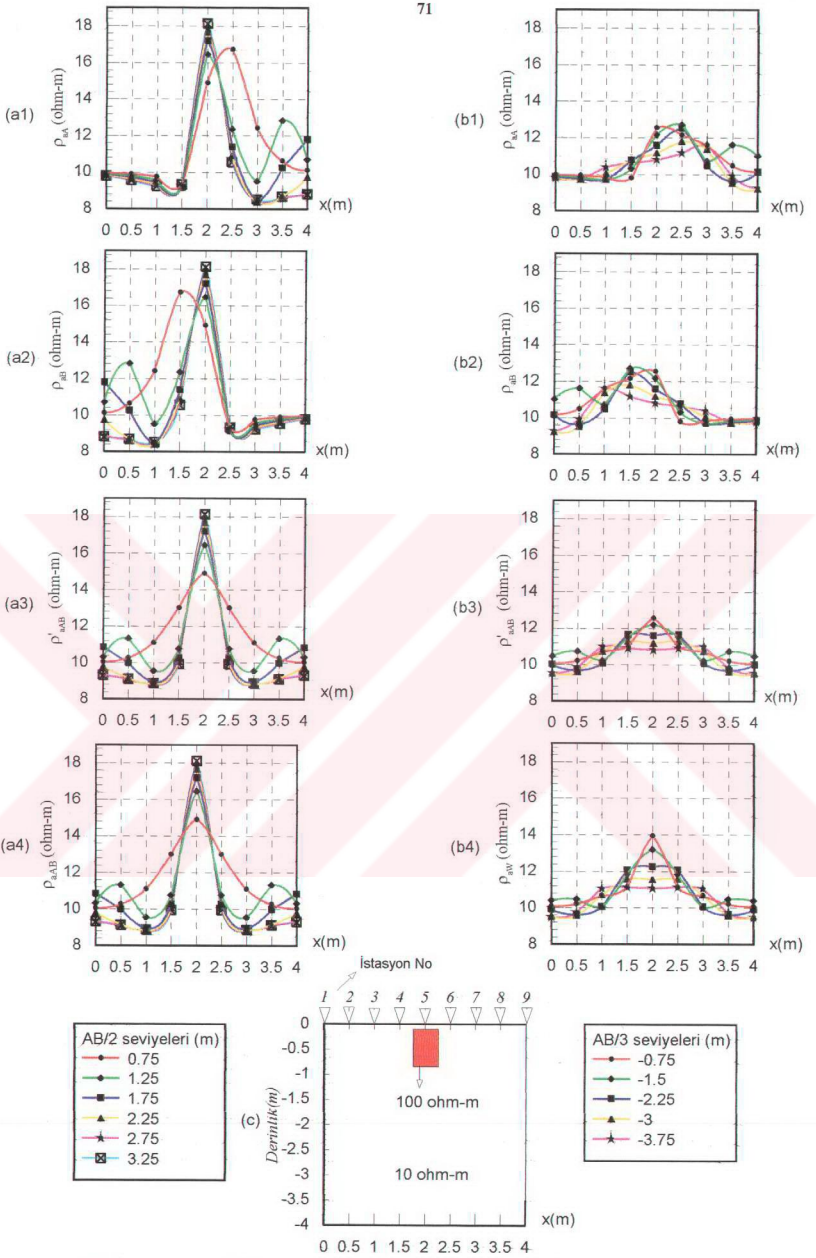
İkinci modelde 10 ohm-m özdirençli homojen bir ortam içine, 0.25 m derinlikte 0.5×0.75 m boyutunda 100 ohm-m özdirençli bir cisim konmuştur (Şekil 4.9.c). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.9.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.10.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12' da görülmektedir.

Bütün elektrod dizilimleri için cismin üstündeki 5 numaralı ölçü noktasında GÖ değerleri homojen ortamın özdirençinden büyük hesaplanmıştır. Fakat gömülü kütlelin etkisi; İYÜE dizilimi için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde, İYYW dizilimi için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinden daha belirgin gözlenmektedir (Şekil 4.9.a1, a2, b1, b2, Şekil 4.10.a1, a2, b1, b2). Her iki elektrod diziliminde de ρ_{a1} GÖ değerleri için çizilen yapma-kesitlerde cismin olduğu yerin sağ tarafında bir gölge belirti gözlenmektedir. Bu gölge belirti, ρ_{aB} GÖ değerleri için çizilen yapma-kesitlerde ise sol tarafta gözlenmektedir. İYÜE ve İYYW dizilimi için ayrı ayrı hesaplanan ρ_{a1} ve ρ_{aB} GÖ değerlerinin aritmetik ortalamasından bulunan ρ'_{a1B} GÖ yapma-kesitinde ise bu gölge belirtiler yok olmaktadır Şekil (4.9.a3,b3). İYÜE diziliminde, ρ'_{a1B} GÖ değerleri için çizilen profil eğrilerinde cismin olduğu yerde bir pik görülmektedir (Şekil 4.10.a3). Bu pik, İYYW dizilimi verilerinden hesaplanan, ρ'_{a1B} GÖ değerlerinde ise belirgin olarak gözlenmemektedir.

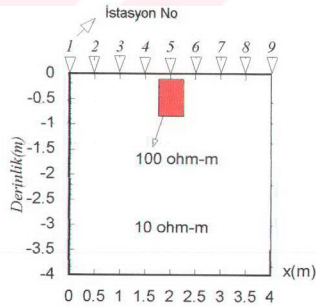
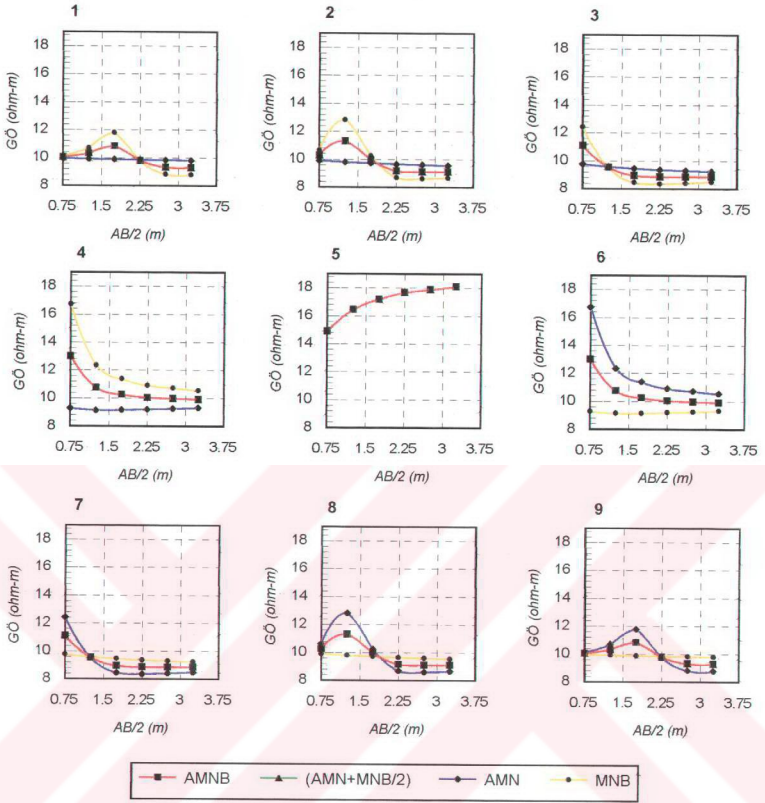
Şekil 4.11 de İYÜE dizilimi için ρ_{a1} , ρ_{aB} , ρ_{a1B} ve ρ'_{a1B} GÖ DES eğrileri görülmektedir. gömülü cismin tam üstü olan 5 numaralı ölçü noktasında bütün dizilimler için çizilen



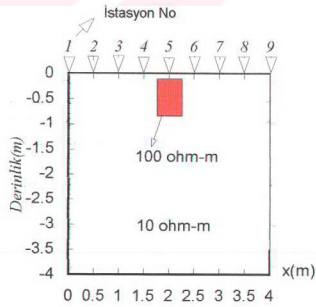
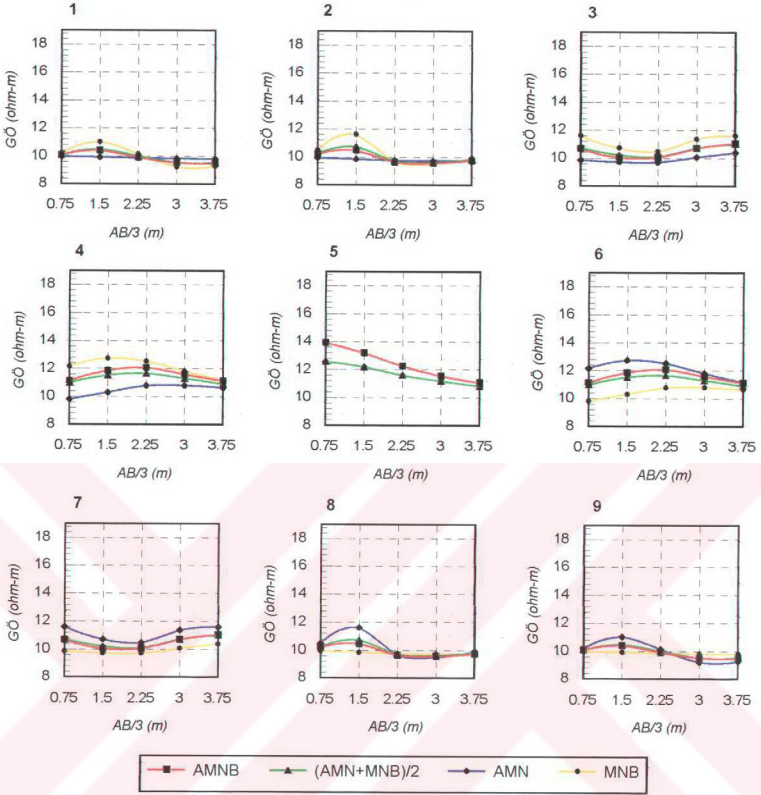
Şekil 4.9. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma-kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma kesiti (b4) ve yer modeli (c).



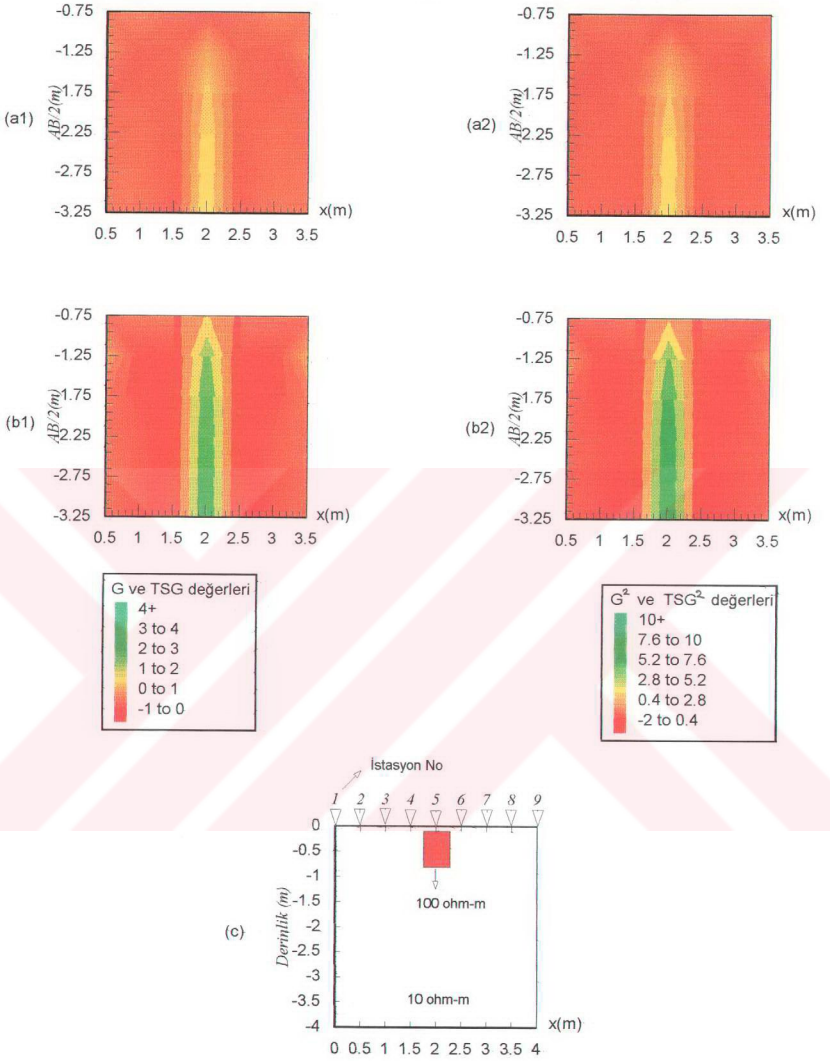
Şekil 4.10. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için; ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için; ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b1) ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b2) ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



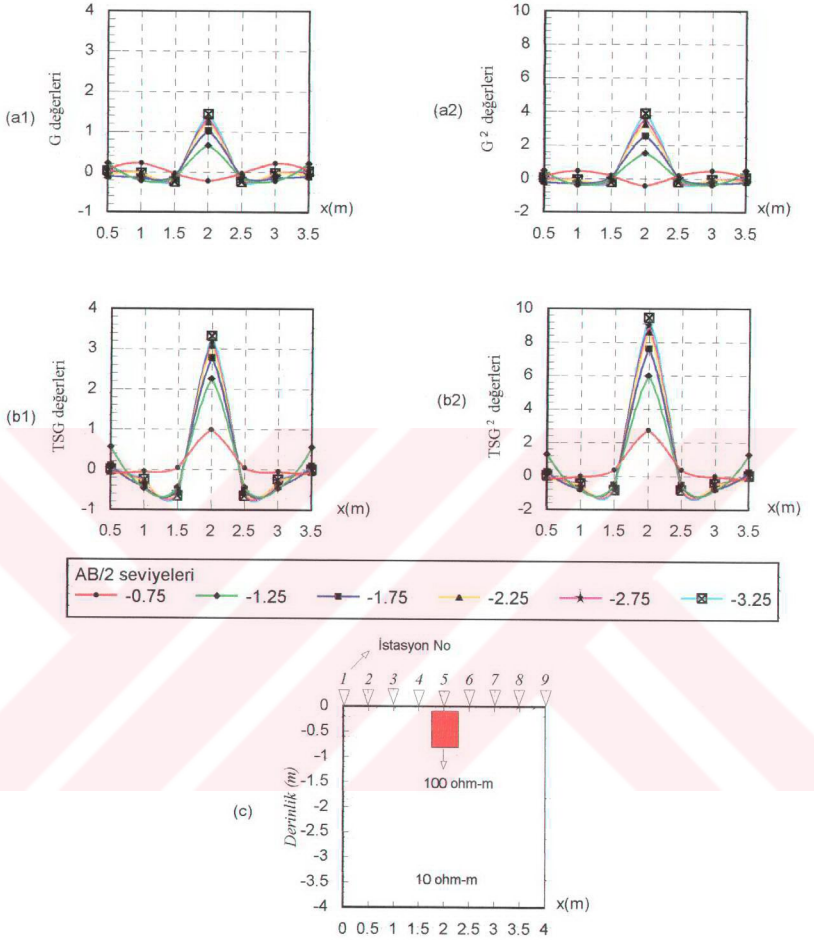
Şekil 4.11. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2 ve AMNB düzey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.12. İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN, MNB, $(AMN+MNB)/2$, Wenner dizilimi düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.13. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG² değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c).



Şekil 4.14. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

DES eğrileri artan tiptedir ve üstüste çakışmışlardır. Eğrilerin bu noktada artan tipte olmasının sebebi cismin 5 numaralı ölçü noktasında pozitif katkı bölgesinde (M ve N arasında) kalmasıdır. Yine 5 numaralı ölçü noktasının her iki tarafında bulunan 1-9, 2-8, 3-7 ve 4-6 ölçü noktaları için çizilen sondaj eğrileri birbirinin simetriği durumundadır. 1 ve 2 numaralı istasyonda ρ_{aB} , ρ_{aAB} ve ρ'_{aAB} GÖ değerlerinde cisim $AB/2=0.75, 1.25$ ve 1.75 m seviyeleri için B noktasındaki elektrodun sağında (8 ve 9 numaralı istasyon için ρ_{aA} , ρ_{aAB} ve ρ'_{aAB} GÖ değerleri A noktasındaki elektrodun solunda) (pozitif katkı bölgesinde) kaldığından GÖ eğrisi artan tipte ve $AB/2=2.25, 2.75$ ve 3.25 m seviyelerinde ise cisim negatif katkı bölgesinde (B ve N arasında) olduğundan DES eğrisi azalan tiptedir. Yine 1, 2, 3, ve 4 numaralı ölçü noktalarında ρ_{aA} DES eğrisinde (6, 7, 8 ve 9 numaralı ölçü noktalarında ρ_{aB} DES eğrisinde) cismin etkisi görülmemektedir. 3,4,6 ve 7 numaralı ölçü noktalarında ise cisim bütün $AB/2$ seviyelerinde negatif katkı bölgesinde kaldığından, DES eğrileri azalan tiptedir.

Şekil 4.12 de İYYW dizilimi için ρ_{aA} , ρ_{aB} , ρ'_{aAB} ve ρ_{aW} GÖ DES eğrileri görülmektedir. Burada da 1,2,8 ve 9 numaralı ölçü noktaları için çizilen DES eğrilerinin davranışı, İYÜE diziliminde aynı numaralı noktaların DES eğrilerinin davranışına benzemektedir ve aynı açıklamalar burada da yapılabilir. 3 ve 7 numaralı ölçü noktalarında $AB/2=0.75, 1.5$ ve 2.25 m seviyeleri için İYYW ve ρ_{aW} DES eğrileri, negatif katkı bölgesinde kaldığından az eğimli olarak azalan tiptedir. $AB/2=3.0, 3.75$ m seviyelerinde ise cisim pozitif katkı bölgesinde kaldığından DES eğrileri artan tiptedir. Yine 4 ve 6 numaralı ölçü noktalarında ise eğriler 3 ve 7 numaralı ölçü noktalarının tersi davranış göstermektedir. 5 numaralı ölçü noktası için çizilen DES eğrileri azalan tiptedir. Bunun sebebi; M ve N noktalarındaki elektrodun her ölçü sonucu açılması ve cismin sinyale katkısının azalması olabilir. Burada eğrilerin eğimi İYÜE dizilimi için çizilen DES eğrilerine göre daha azdır.

Yine aynı model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{aA} ve ρ_{aB} ile bulunun G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 de görülmektedir. Burada, cismin olduğu yerde belirti değeri; TSG ve TSG^2 çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde, G ve G^2 değerleri için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinden daha büyüktür. Fakat çizilen grafiklere bakarak cismin derinliği hakkında birşey söylenemez.

4.3. Model 3

Bu modelde 10 ohm-m özdirençli homojen bir ortam içine, 0.25 m derinlikte 0.5 m eninde ve 100 ohm-m özdirençli bir dayk konmuştur (Şekil 4.15.c). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.15.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.16.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 de görülmektedir.

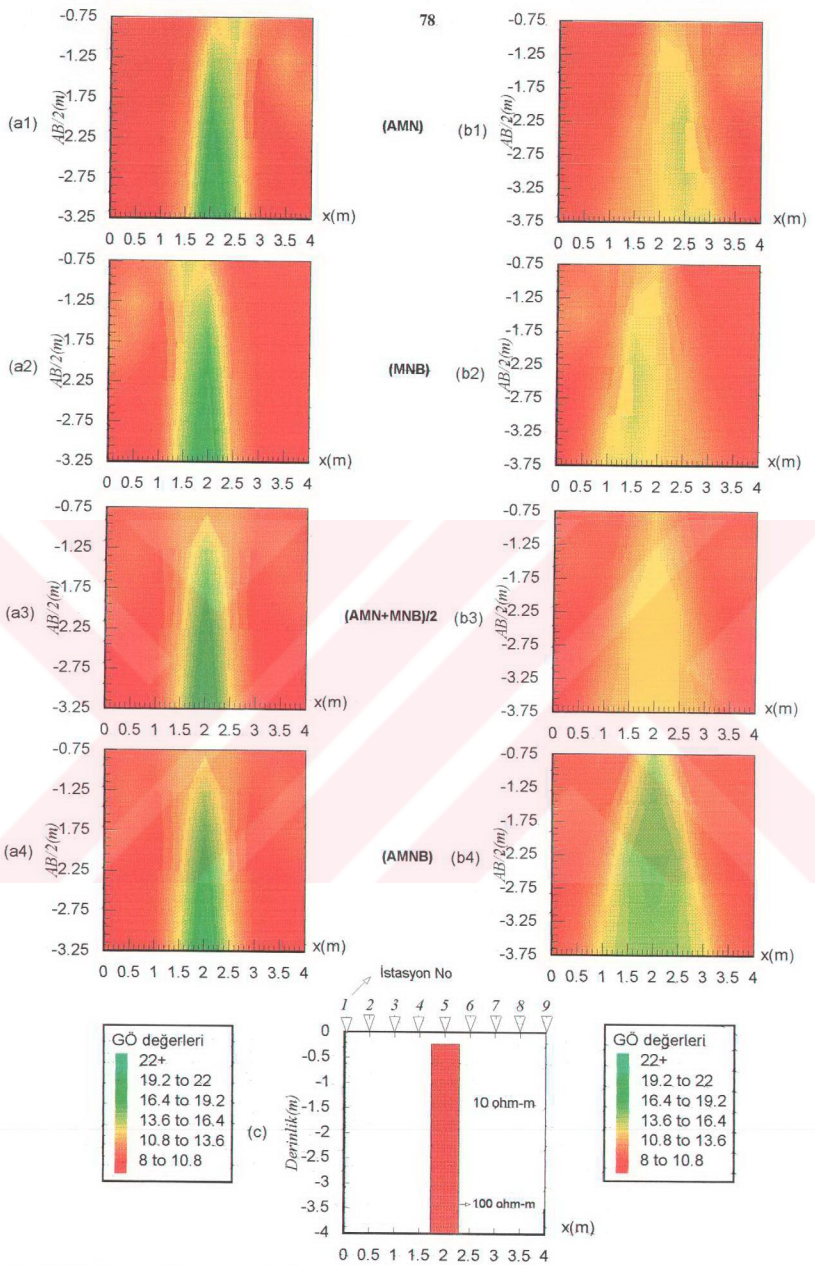
Burada bütün elektrod dizilimleri için çizilen yapma-kesitler model 2 için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerine benzemektedir. Fakat bu modelde dayk biraz derine yerleştirildiğinden 5 numaralı ölçü noktasında, bütün elektrod dizilimleri için AB/2 nin ilk değerinde dayk'ın etkisi az görülmektedir. Yinede bu model için dayk üzerinde maximum hesaplanan GÖ değeri model 2 de ölçülen maximum GÖ değerinden daha büyüktür. Bu model için çizilen yapma-kesitlerde dayk'ın bulunduğu yerdeki belirti, model 2 deki yapma-kesitlerde gömülü cismin bulunduğu yerdeki belirti değerinden daha yayvevr (Bkz. Şekil 4.9 ve Şekil 4.15).

Bu çalışmada kullanılan bütün elektrod dizilimleri için 1,2,3,7,8 ve 9 numaralı ölçü noktalarında çizilen DES eğrilerinin davranışı Model 2 de aynı numaralı DES eğrilerinin davranışına benzemektedir. Fakat bu model de 4 ve 6 numaralı ölçü noktalarında DES eğrilerinin davranışı Model 2 de aynı numaralı DES eğrilerinin davranışının tam tersidir. 4 ve 6 numaralı DES eğrileri artan tiptedir. Bunun sebebi; AB/2 değerinin artmasıyla pozitif katkı bölgesi içinde kalan Dayk parçasının hacminin artmasıdır.

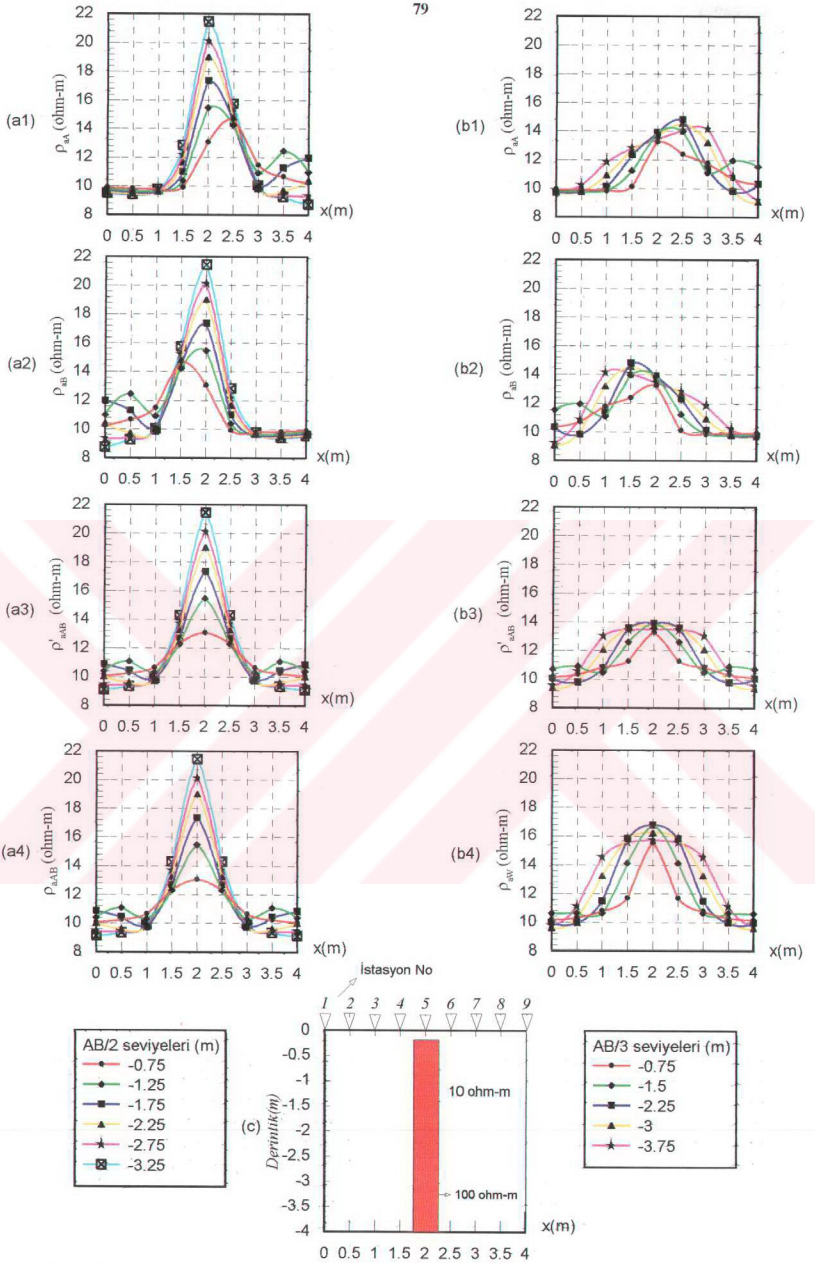
Yine bu model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{a1} ve ρ_{aB} ile bulunun G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 de görülmektedir. Burada, cismin olduğu yerde belirti değeri; TSG ve TSG^2 için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde, G ve G^2 değerleri için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinden daha büyüktür.

4.4. Model 4

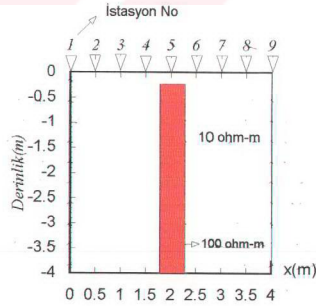
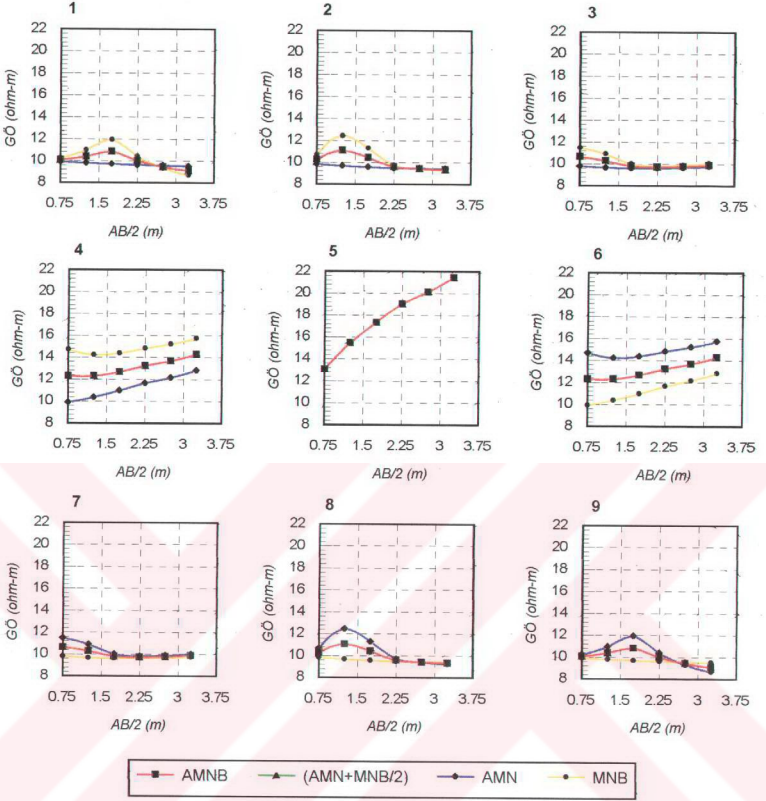
Bu modelde 10 ohm-m özdirençli homojen bir ortam içine 4 ve 6 numaralı ölçü noktalarının tam altına 0.5 m derinlikte 0.5×0.75 m boyutunda 100 ohm-m özdirençli iki cisim konmuştur (Şekil 4.21.c). Bu model bir tümülüs'ün giriş kapısının enine kesiti olarak düşünülebilir. Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri



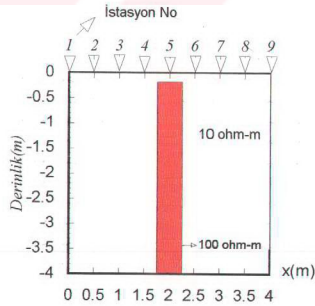
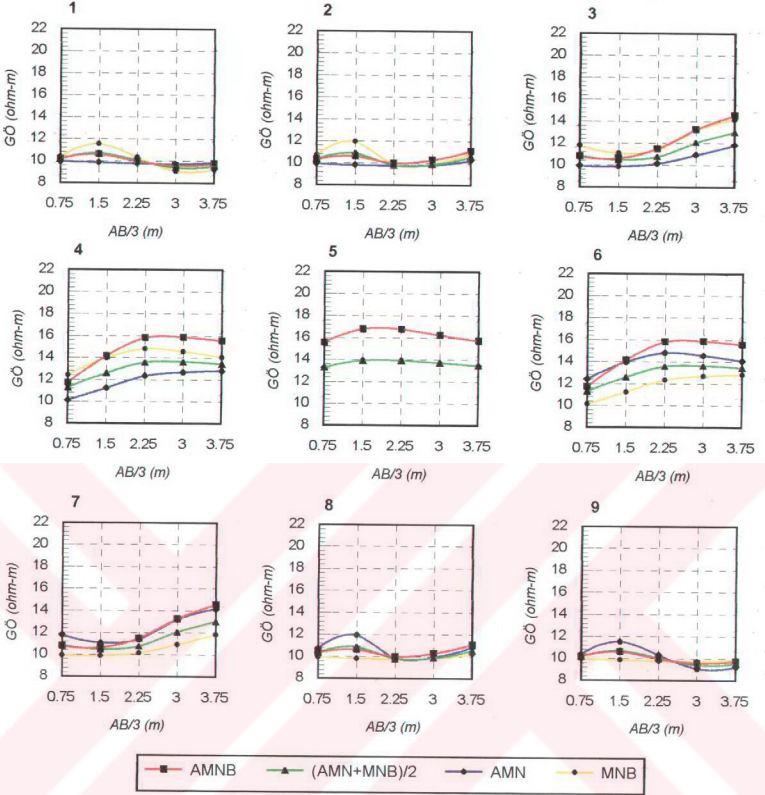
Şekil 4.15. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma-kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4), İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma kesiti (b4) ve yer modeli (c).



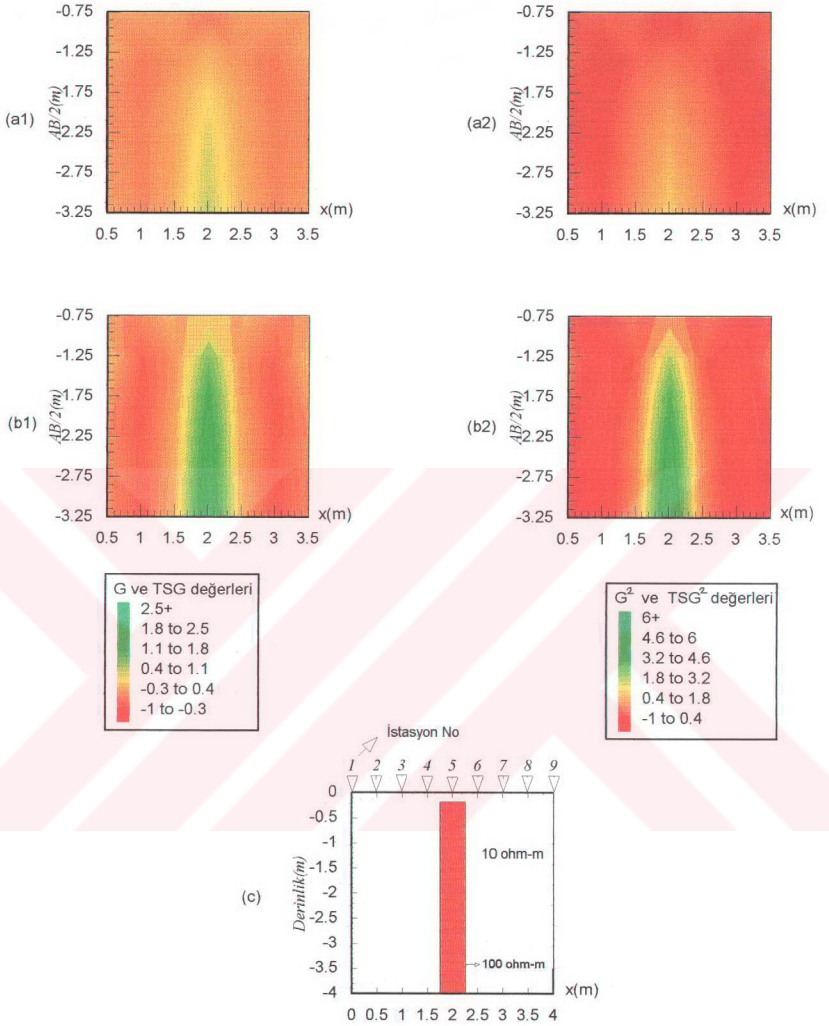
Şekil 4.16. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için ρ_{BA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için; ρ_{BA} GÖ profil eğrileri (b1) ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b2) ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{WB} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



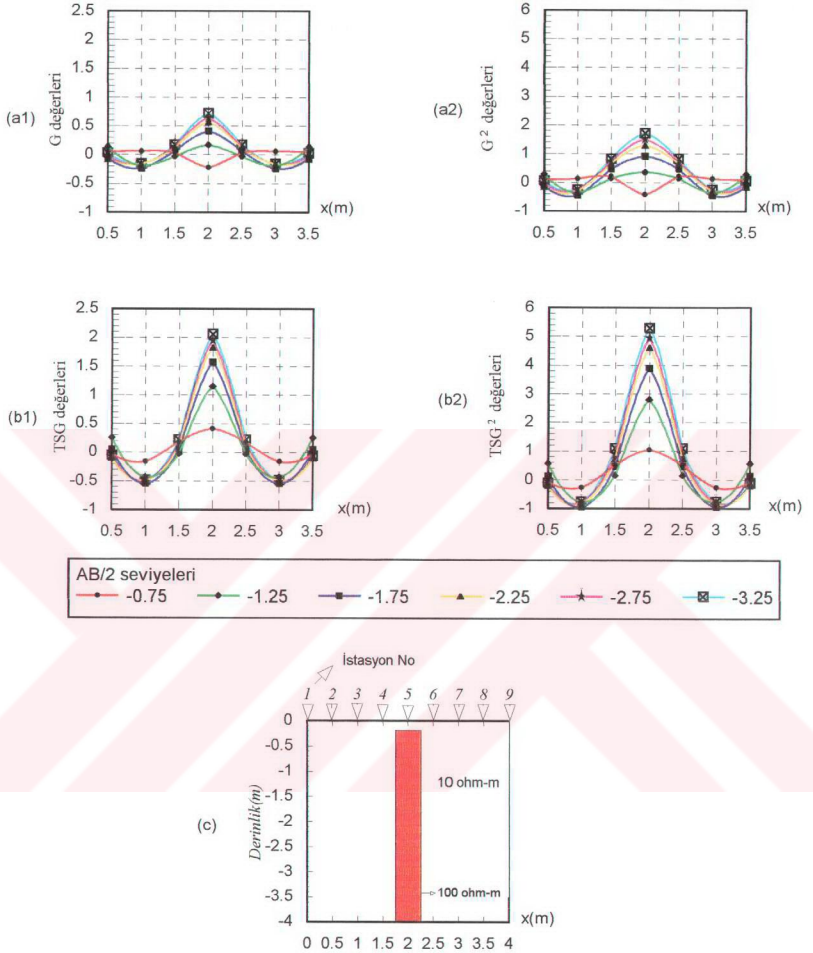
Şekil 4.17. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.18. İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN, MNB, $(AMN+MNB)/2$, Wenner dizilimi düzey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.19. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c).



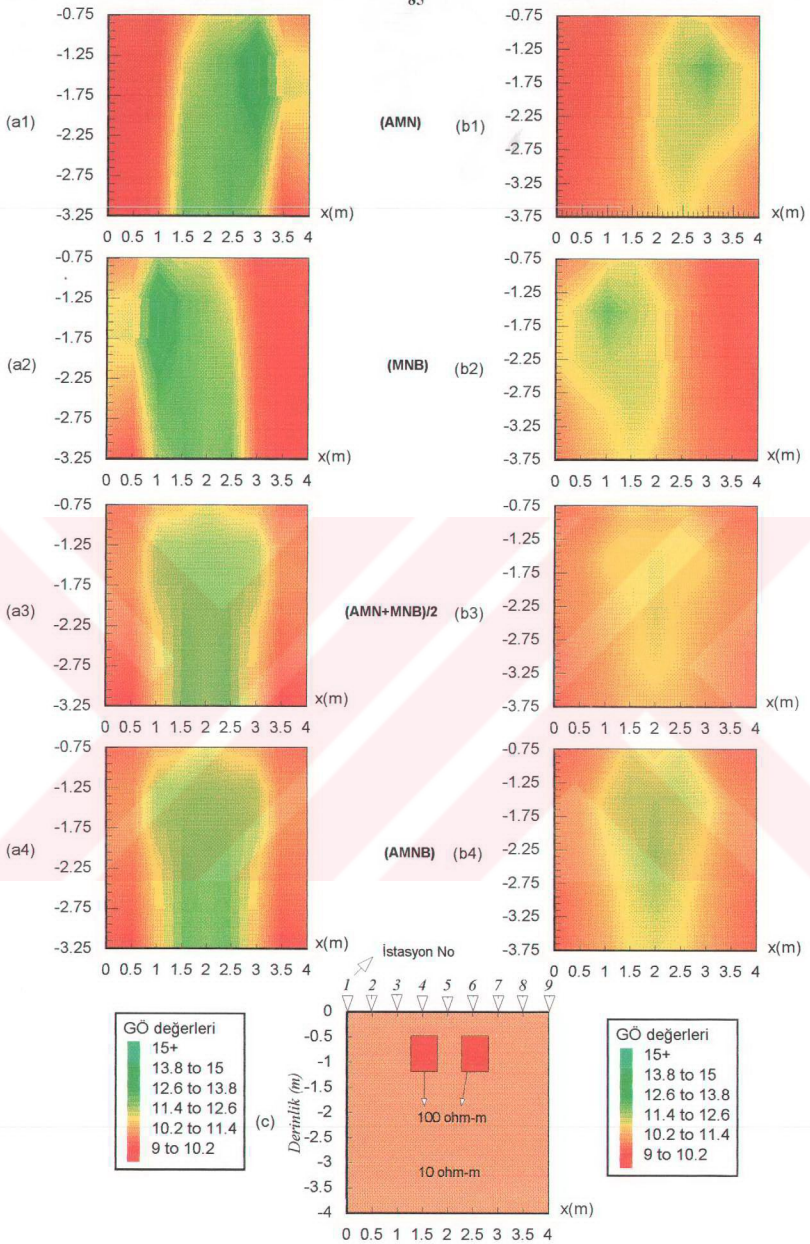
Şekil 4.20. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.21.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.21.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24' de görülmektedir.

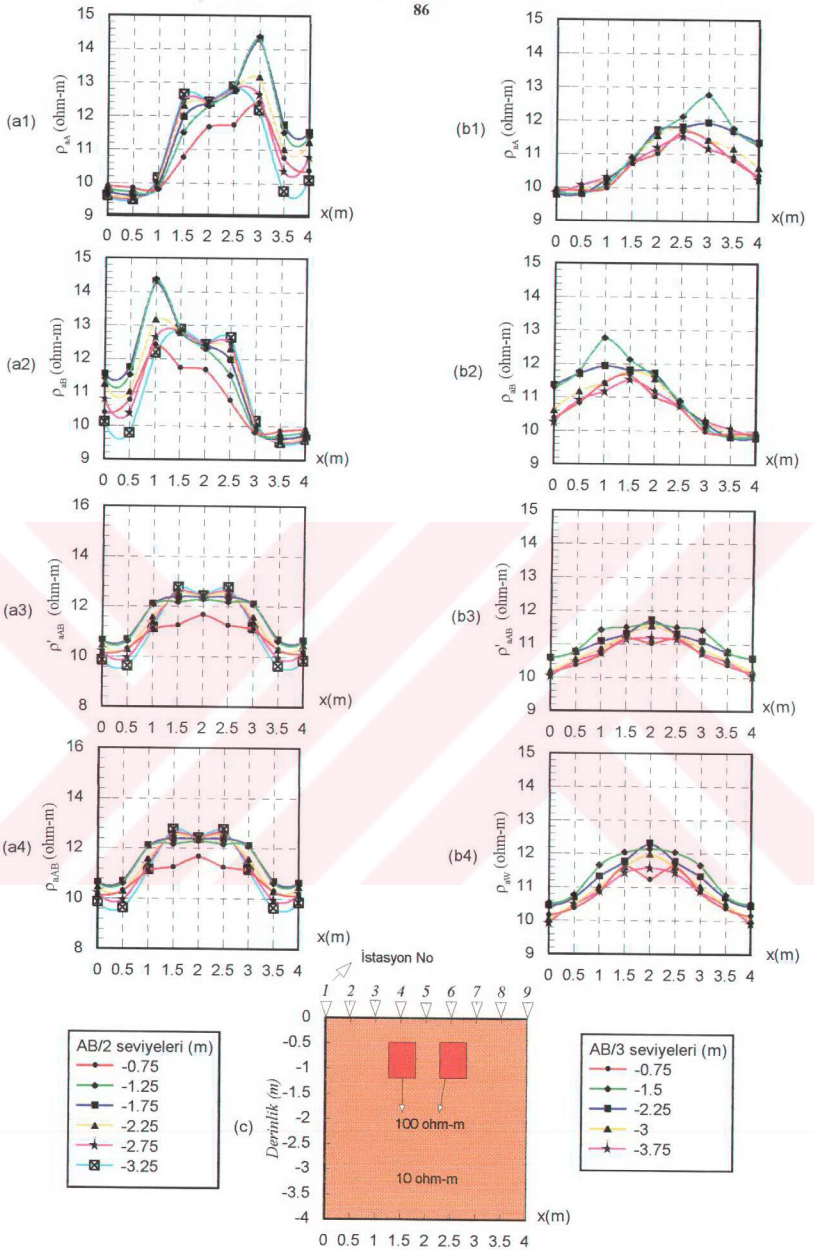
İYÜE diziliminde; hesaplanan ρ_{a1} değerleri için çizilen yapma kesitte 6 numaralı ölçü noktasının altındaki cismin etkisi görülmekte, ρ_{aB} değerleri ile çizilen yapma-kesitte ise 4 numaralı ölçü noktasının altındaki cismin etkisi görülmektedir. ρ'_{a1B} ve ρ_{a1B} değerleri ile çizilen yapma-kesitlerde ise bu iki cisim ayırt edilememektedir. İYYW dizilimi için hesaplanan GÖ değerleri ile hesaplanan yapma-kesitler için de aynı şeyler söylenebilir. Fakat İYYW dizilimi için çizilen yapma kesitlerde belirtiler, İYÜE dizilimi için çizilen yapma kesitlerdeki belirtilerden daha zayıftır. Yine her iki dizilim için çizilen profil eğrilerinde de yapma-kesitler için söylenenler geçerlidir.

Şekil 4.23 de İYÜE dizilimi için ρ_{a1} , ρ_{aB} , ρ_{a1B} ve ρ'_{a1B} GÖ DES eğrileri görülmektedir. Burada 5 numaralı ölçü noktasında bütün dizilimler için çizilen DES eğrileri $AB/2=0.75$ m seviyesi dışında aynı değerlidir ve üst üste çakışmıştır. DES eğrilerinin bu noktada sabit olmasının sebebi iki gömülü cisminde bu noktaya göre simetrik ve iki yvea olmasıdır. Yine 5 numaralı ölçü noktasının her iki tarafında bulunan 1-9, 2-8, 3-7 ve 4-6 ölçü noktaları için çizilen sondaj eğrileri birbirinin simetrisi durumundadır. 1,2 ve 3 numaralı istasyonda ρ_{aB} , ρ_{a1B} ve ρ'_{a1B} GÖ değerlerinde her iki cisimde $AB/2=0.75, 1.25$ ve 1.75 m seviyeleri için B noktasındaki elektrodun sağında (7,8 ve 9 numaralı istasyon ρ_{a1} , ρ_{a1B} ve ρ'_{a1B} GÖ değerleri A noktasındaki elektrodun solunda) (pozitif katkı bölgesinde) kaldığından GÖ eğrisi artan tipte ve $AB/2=2.25, 2.75$ ve 3.25 m seviyelerinde ise her iki cisimde negatif katkı bölgesinde (B ve N arasında) olduğundan DES eğrisi azalan tiptedir. Yine 1, 2, 3, ve 4 numaralı ölçü noktalarında ρ_{a1} DES eğrisinde (6, 7, 8 ve 9 numaralı ölçü noktalarında ρ_{aB} DES eğrisinde) cisimlerin etkisi çok az görülmektedir. 4 ve 6 numaralı ölçü noktalarının hemen altında pozitif katkı bölgesinde iki cisim olduğundan eğriler artan tiptedir.

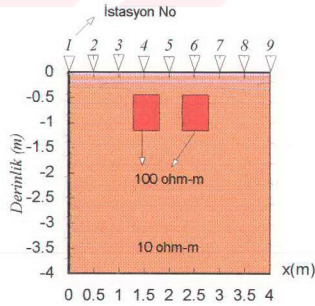
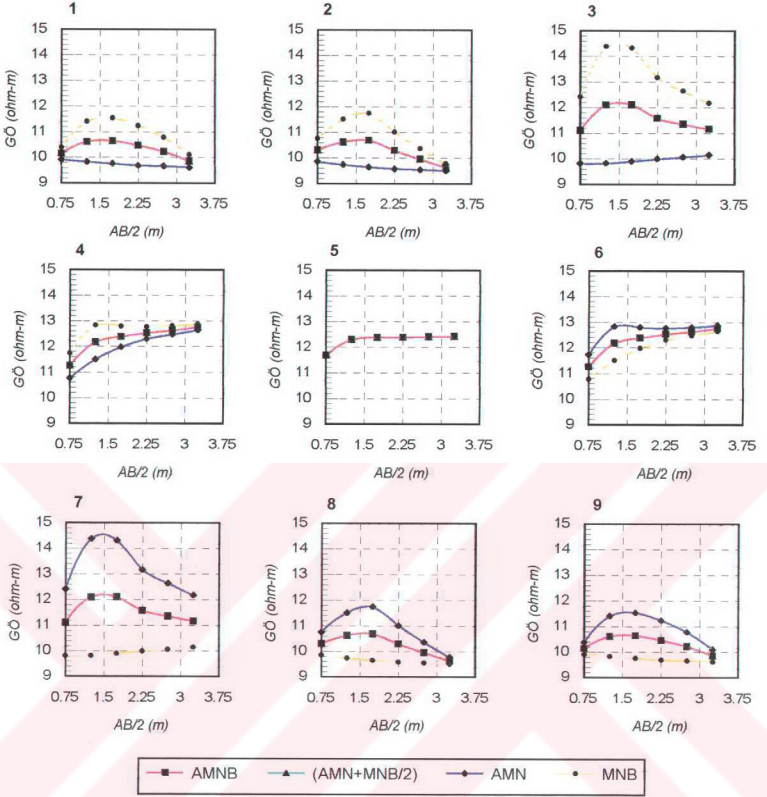
Şekil 4.24 de İYYW dizilimi için ρ_{a1} , ρ_{aB} , ρ'_{a1B} ve ρ_{a1W} GÖ DES eğrileri görülmektedir. Burada bütün DES eğrilerinde de önce bir yükselme sonrada bir düşme görülmektedir. Bunun sebebi; M ve N noktalarındaki elektrodların her ölçü sonucu açılması ve cismin sinyale katkısının azalması olabilir. Burada eğrilerin eğimi İYÜE dizilimi için çizilen DES eğrilerine göre daha azdır.



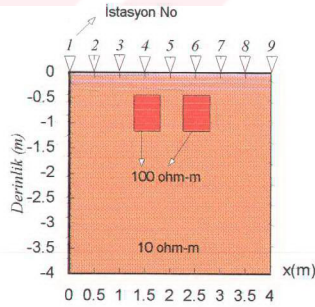
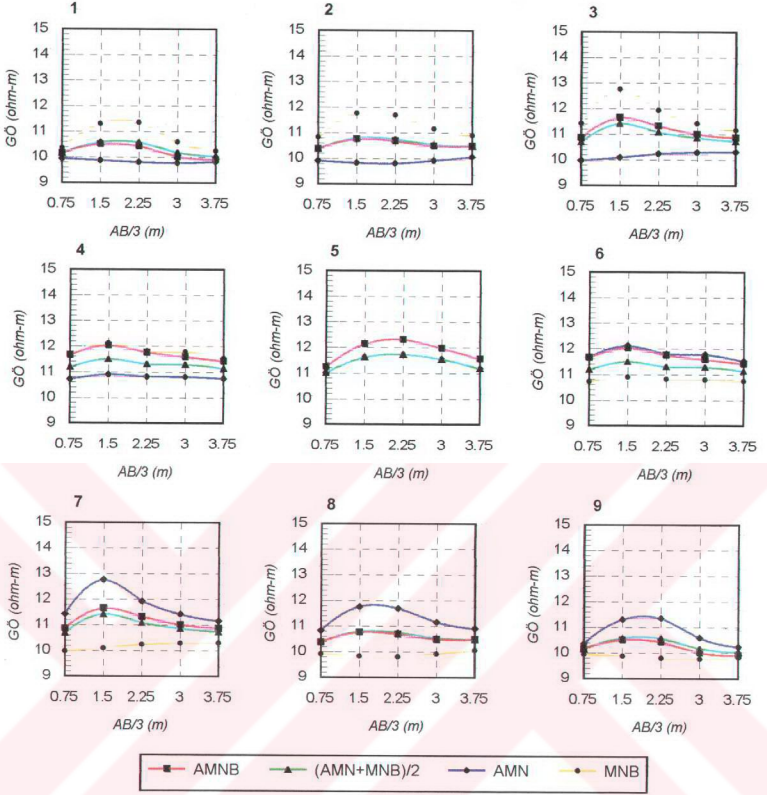
Şekil 4.21. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma-kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4), İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma kesiti (b4) ve yer modeli (c).



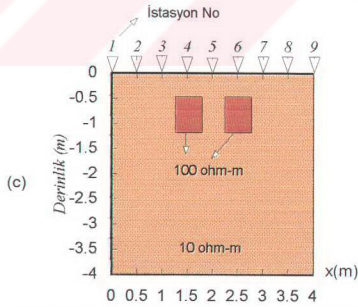
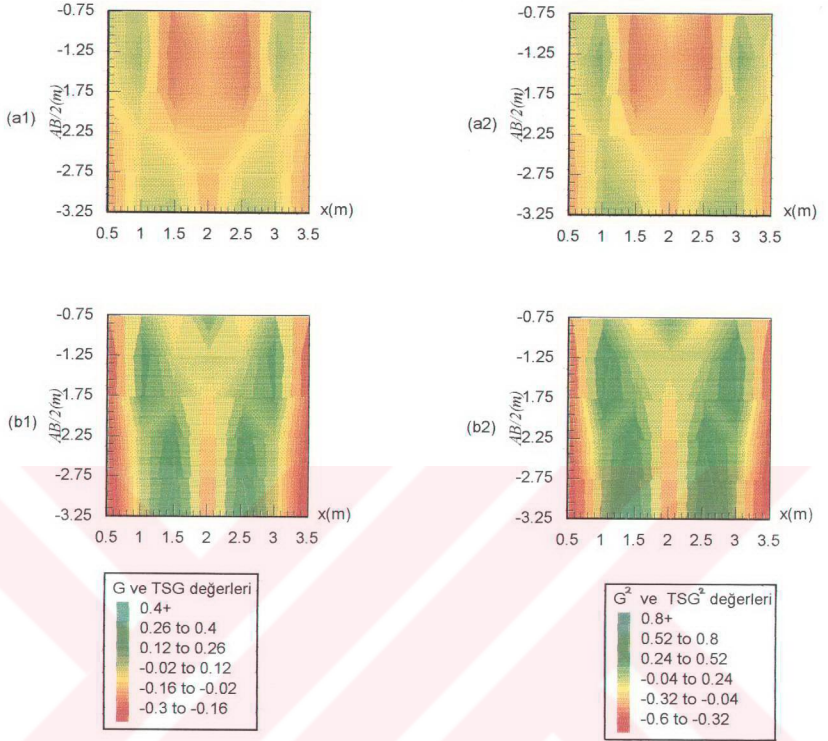
Şekil 4.22. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ_{AB}^1 GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_A GÖ profil eğrileri (b1) ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b2) ρ_{AB}^1 GÖ profil eğrileri (b3) ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



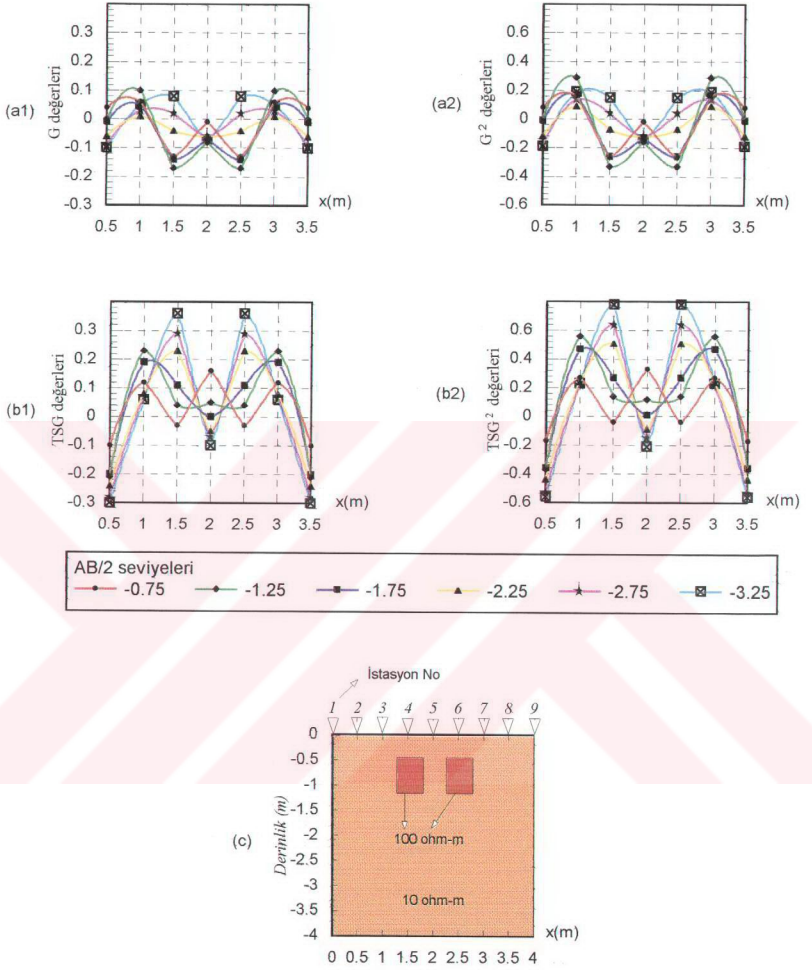
Şekil 4.23. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.24. İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN, MNB, $(AMN+MNB)/2$, Wenner dizilimi düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.25. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c).



Şekil 4.26. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

Yine aynı model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{a1} ve ρ_{aB} ile bulunan G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 de görülmektedir. Burada, gömülü cisimlerin etkisi;bütün dizimler için çizilen GÖ yapma-kesitleri ile G ve G^2 yapma-kesit ve profil eğrilerinde görülmezken, TSG ve TSG^2 çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde her iki cisimde ayırt edilebilmektedir.

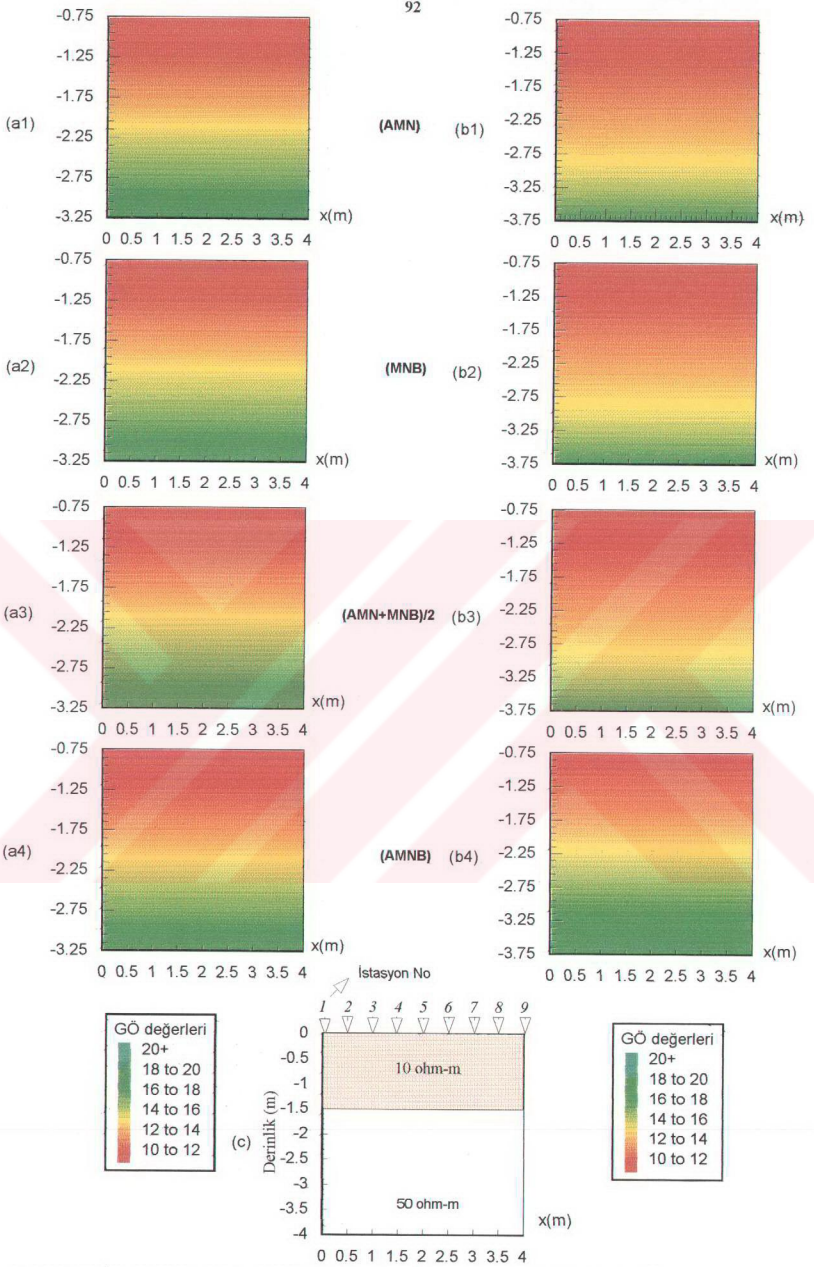
4.5. Model 5

Beşinci modelde, birinci tabakanın kalınlığı 1.5 m, özdirenci 10 ohm-m ve ikinci tabakanın kalınlığı 50 ohm-m olan iki tabakalı bir ortam ele alınmıştır (Şekil 4.27.c). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.27.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.28.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30' da görülmektedir.

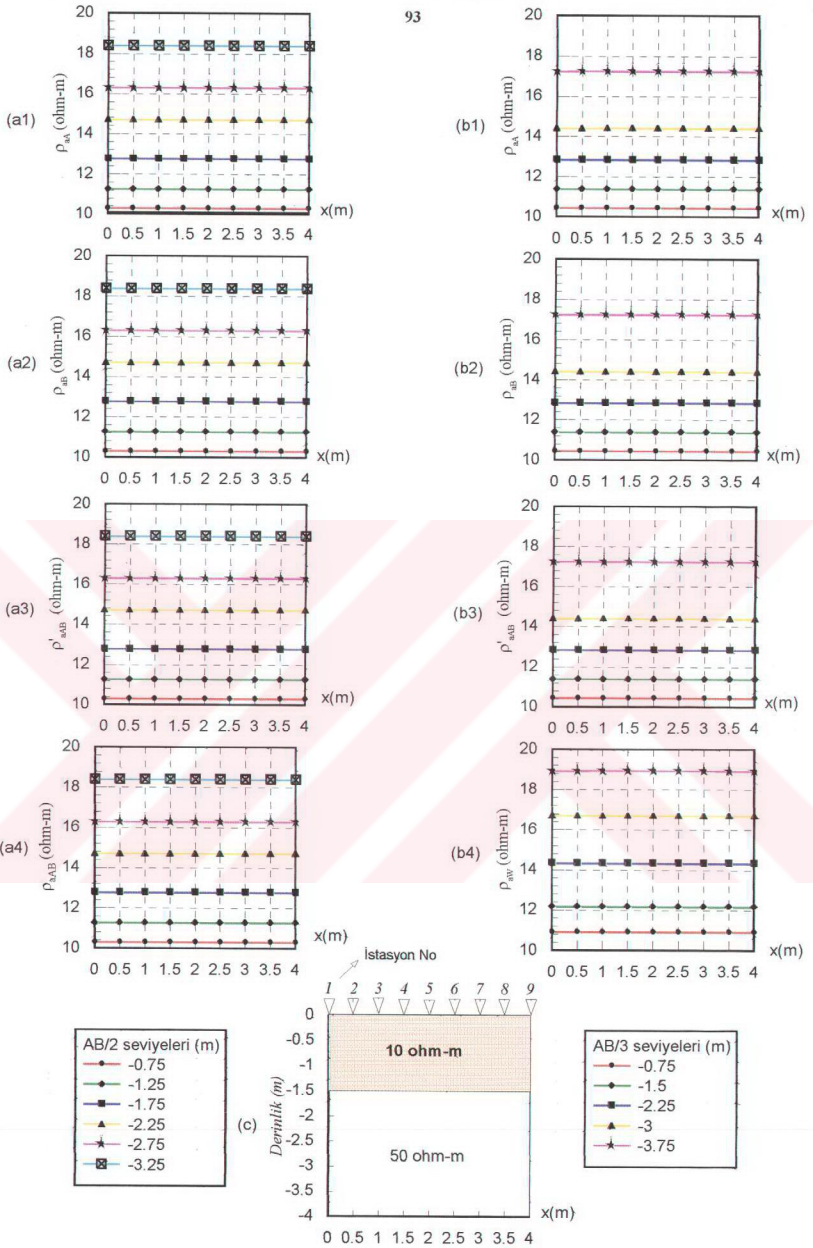
İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{a1} , ρ_{aB} , ρ'_{a1B} değerleri ile ρ_{a1B} GÖ değerleri aynı değerli hesaplanmıştır. Bu yapma-kesitler' de ve GÖ profil eğrilerinde de görülmektedir. İYYW dizilimi için hesaplanan ρ_{a1} , ρ_{aB} ve ρ'_{a1B} değerleri de birbirine eşit çıkmıştır (Şekil 4.27.a1, a2, a3, a4, Şekil 4.28.a1, a2, a3, a4). Fakat ρ_{aW} GÖ değerleri bu değerlerden biraz farklı hesaplanmıştır (Şekil 4.27.b1, b2, b3, b4, Şekil 4.28.b1, b2, b3, b4).

İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{a1} , ρ_{aB} , ρ'_{a1B} değerleri ile ρ_{a1B} GÖ değerleri için çizilen DES eğrileri artan tiptedir ve üst üste çakışmış durumdadır. İYYW dizilimi için hesaplanan ρ_{a1} , ρ_{aB} ve ρ'_{a1B} değerleri için çizilen DES eğrileri de üst üste çakışmış durumda ve artan tiptedir. Fakat ρ_{aW} GÖ değerleri ile çizilen DES eğrileri ise daha az eğimli ve yine artan tiptedir.

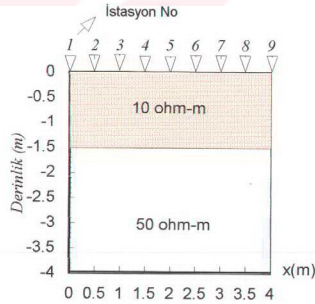
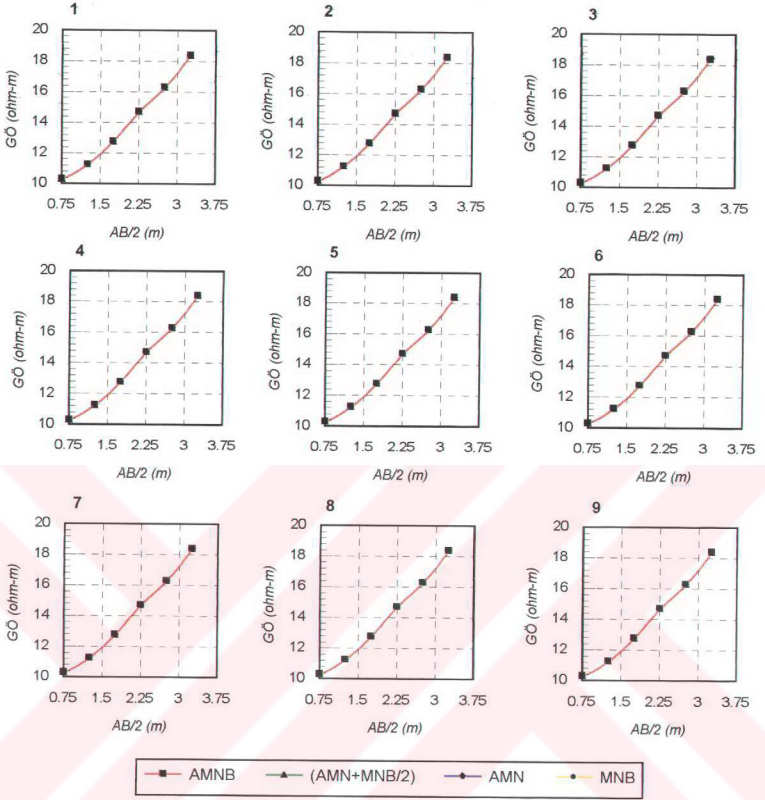
Yine aynı model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{a1} ve ρ_{aB} ile bulunun G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri Şekil 4.31 de görülmektedir. Burada, yanal yönde bir özdirenç değişimi olmadığı için bütün G , G^2 , TSG ve TSG^2 sıfır hesaplanmıştır.



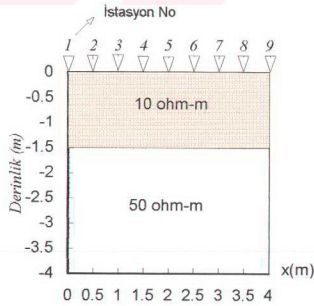
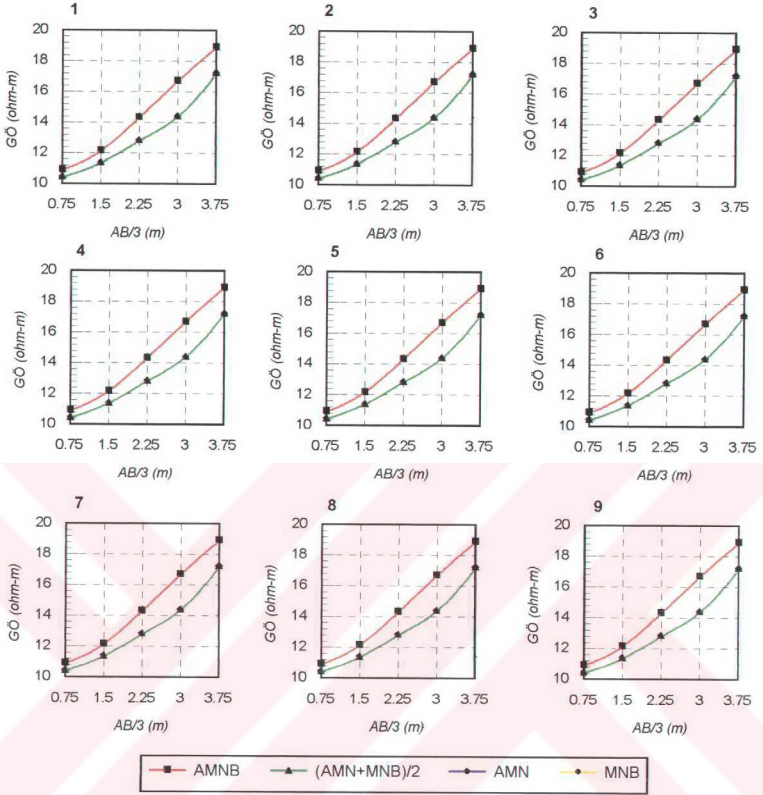
Şekil 4.27. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma-kesiti (a2), $(AMN+MNB)/2$ GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), $(AMN+MNB)/2$ GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma kesiti (b4) ve yer modeli (c).



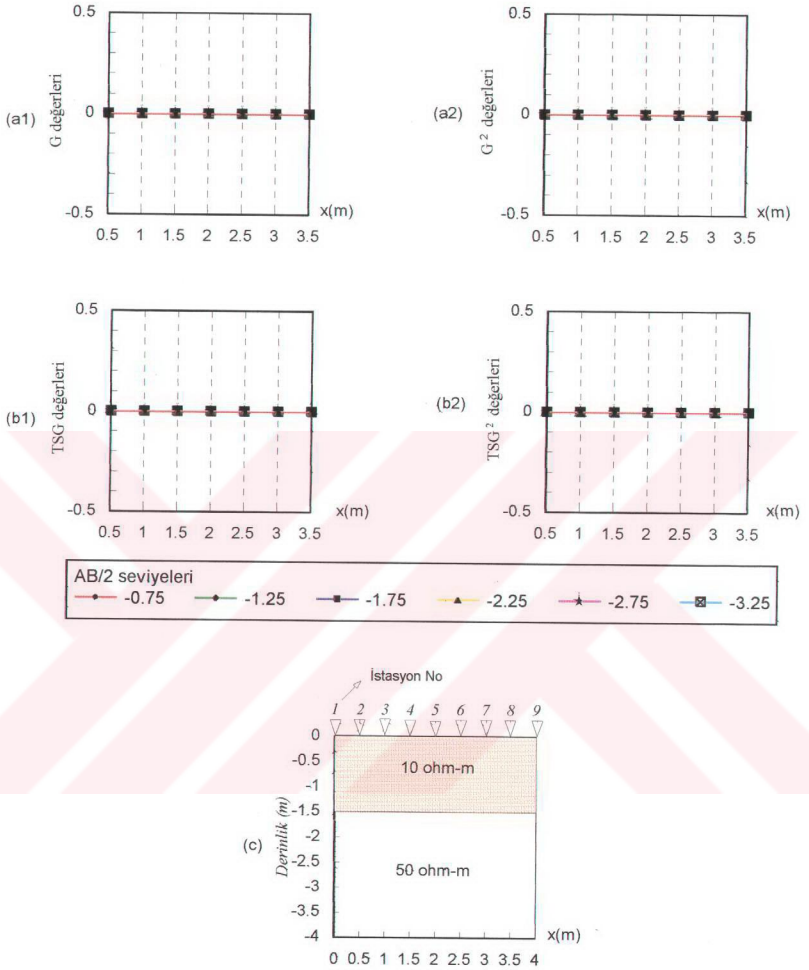
Şekil 4.28. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



Şekil 4.29. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.30. İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN, MNB, $(AMN+MNB)/2$, Wenner dizilimi düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.31. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

4.6. Model 6

Altıncı modelde, birinci tabakanın özdirenci 10 ohm-m ve ikinci tabakanın özdirenci 50 ohm-m olan eğimli arayüzeyle, iki tabakalı bir model ele alınmıştır (Şekil 4.32.c). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.32.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.33.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35' de görülmektedir.

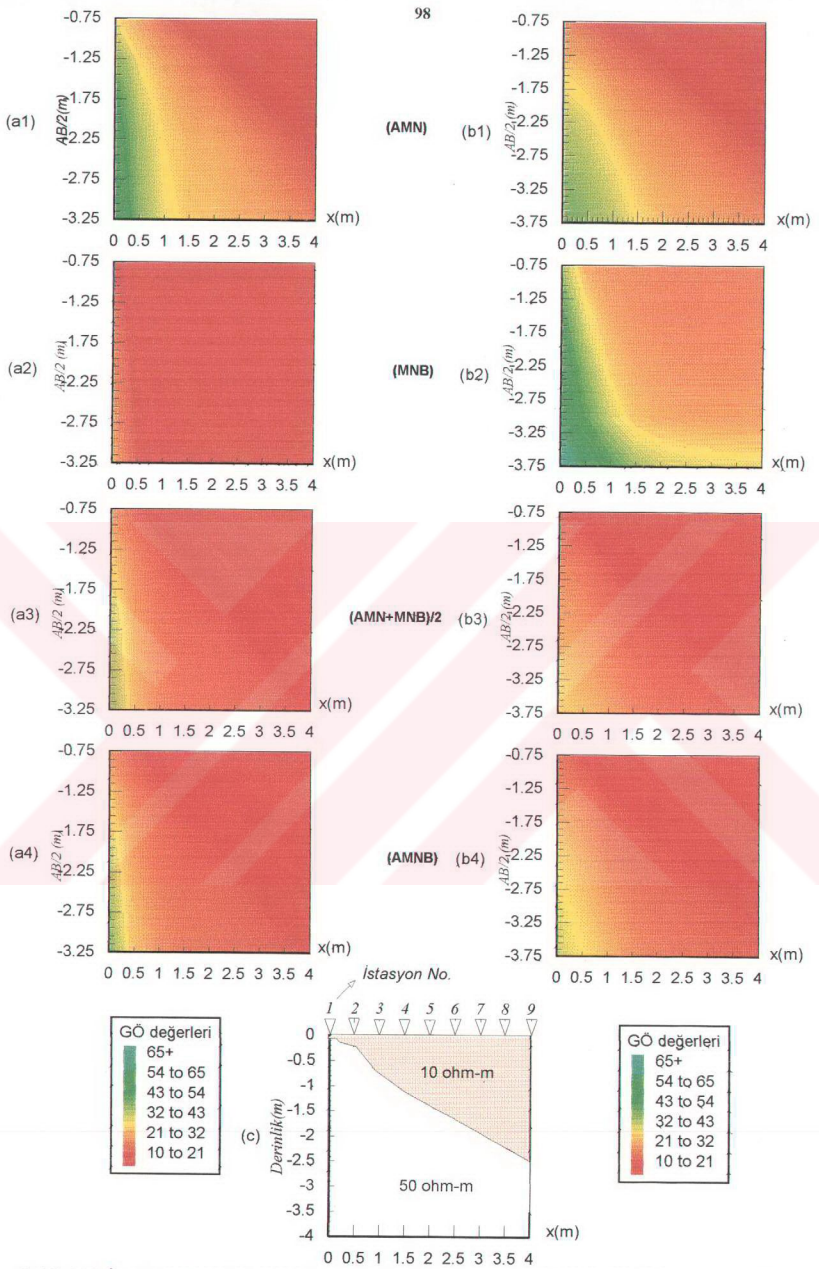
Modeli en iyi, İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{aA} değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrileri göstermektedir. Diğer hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde ise modelin etkisi belirgin olarak gözlenmemektedir.

İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{aA} , ρ_{aAB} ve ρ'_{aAB} değerleri ile İYYW dizilimi için hesaplanan ρ_{aA} , ρ_{aAB} ve ρ'_{aAB} GÖ değerleri için çizilen DES eğrileri artan tiptedir. Fakat İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{aB} GÖ değerleri ile İYYW dizilimi için hesaplanan ρ_{aB} GÖ değerleri için çizilen DES eğrileri düz bir doğru şeklindedir.

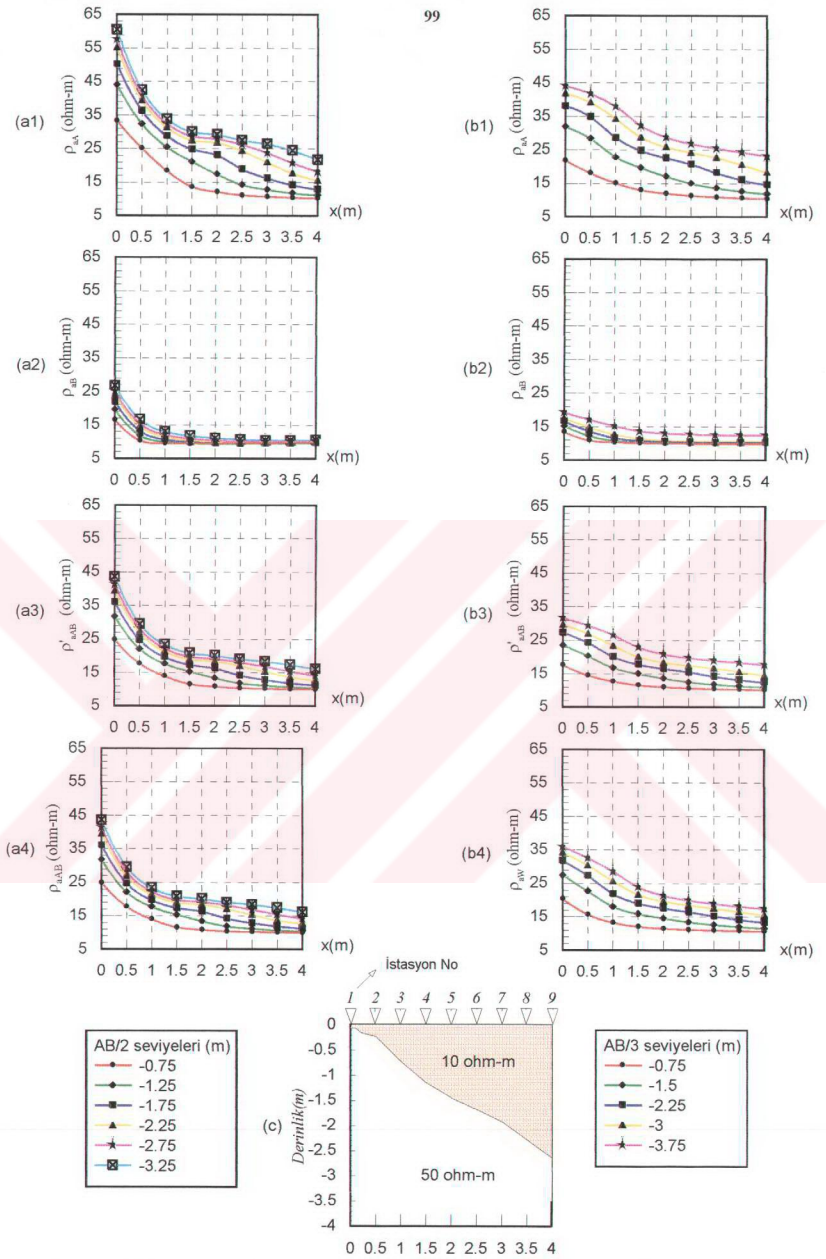
Yine aynı model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{aA} ve ρ_{aB} ile bulunun G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.36 ve Şekil 4.37 de görülmektedir. Burada, tabaka arayüzeyi ;bütün dizilimler için çizilen GÖ yapma-kesitleri ile TSG ve TSG^2 yapma-kesit ve profil eğrilerinde belirgin olarak ayırt edilemezken, G ve G^2 değerleri ile çizilen yapma-kesitlerde ara yüzey belirgin bir şekilde görülmektedir.

4.7. Model 7

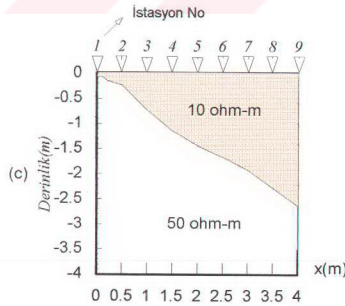
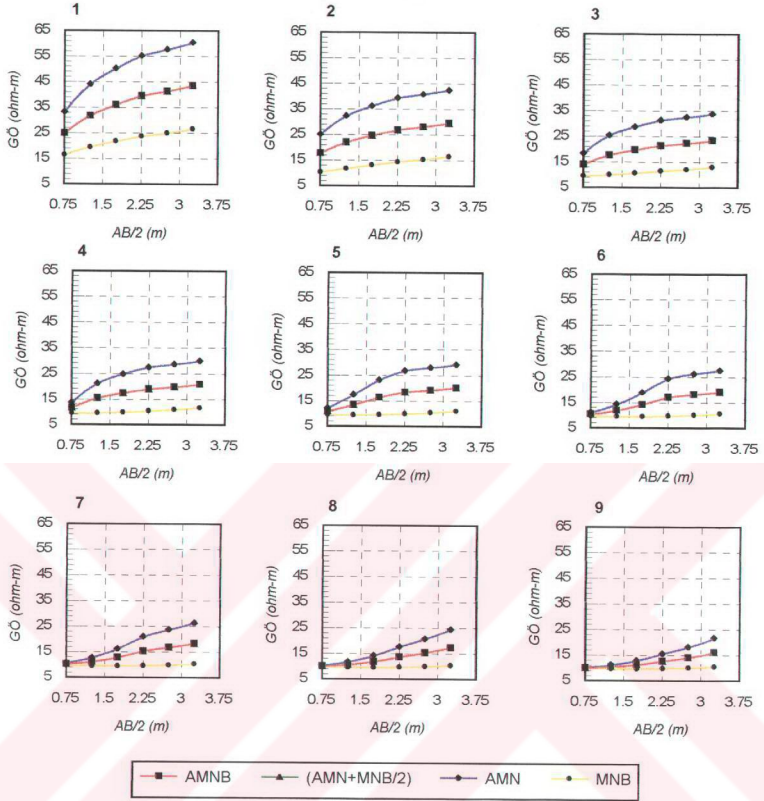
Bu modelde, birinci tabakanın kalınlığı 1.5 m ve özdirenci 10 ohm-m, ikinci tabakanın özdirenci 50 ohm-m olan iki tabakalı bir ortamda 4 ve 6 numaralı ölçü noktalarının altında 0.25 m derinlikte olan 0.5×0.75 m boyutlarında ve 100 ohm-m özdirençli iki cisim vardır (Şekil 4.38.c). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.38.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.39.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41' de görülmektedir.



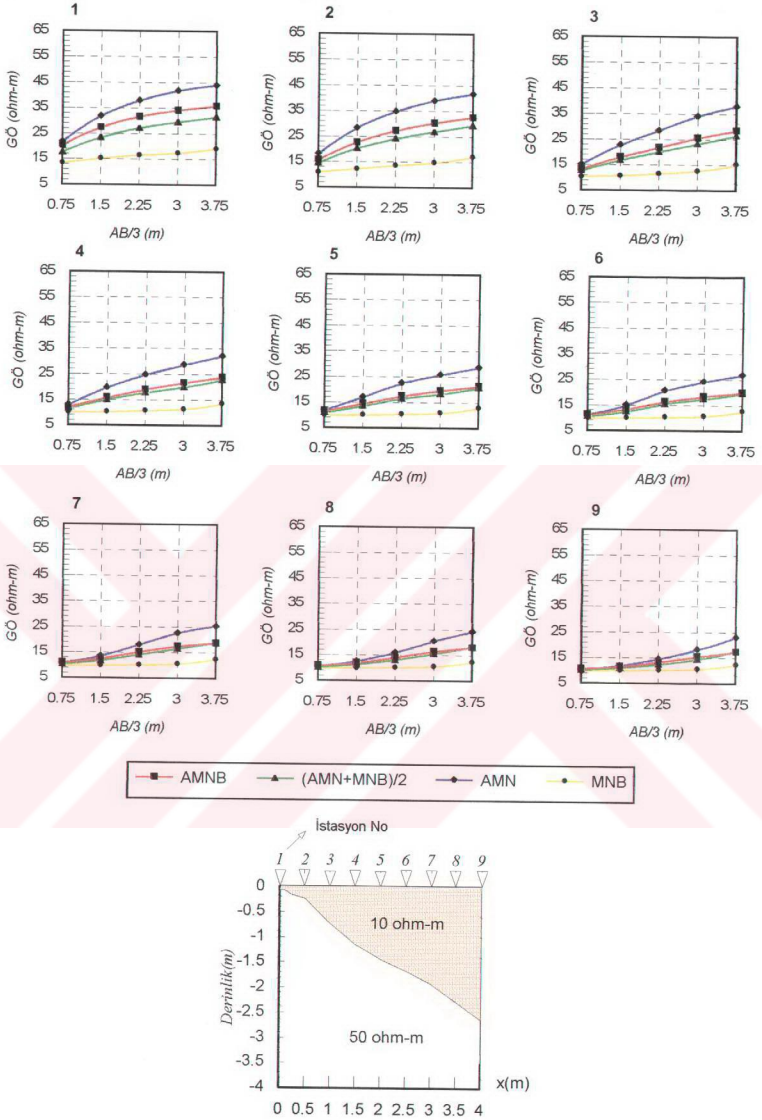
Şekil 4.32. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma kesiti (a1), MNB GÖ yapma-kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c).



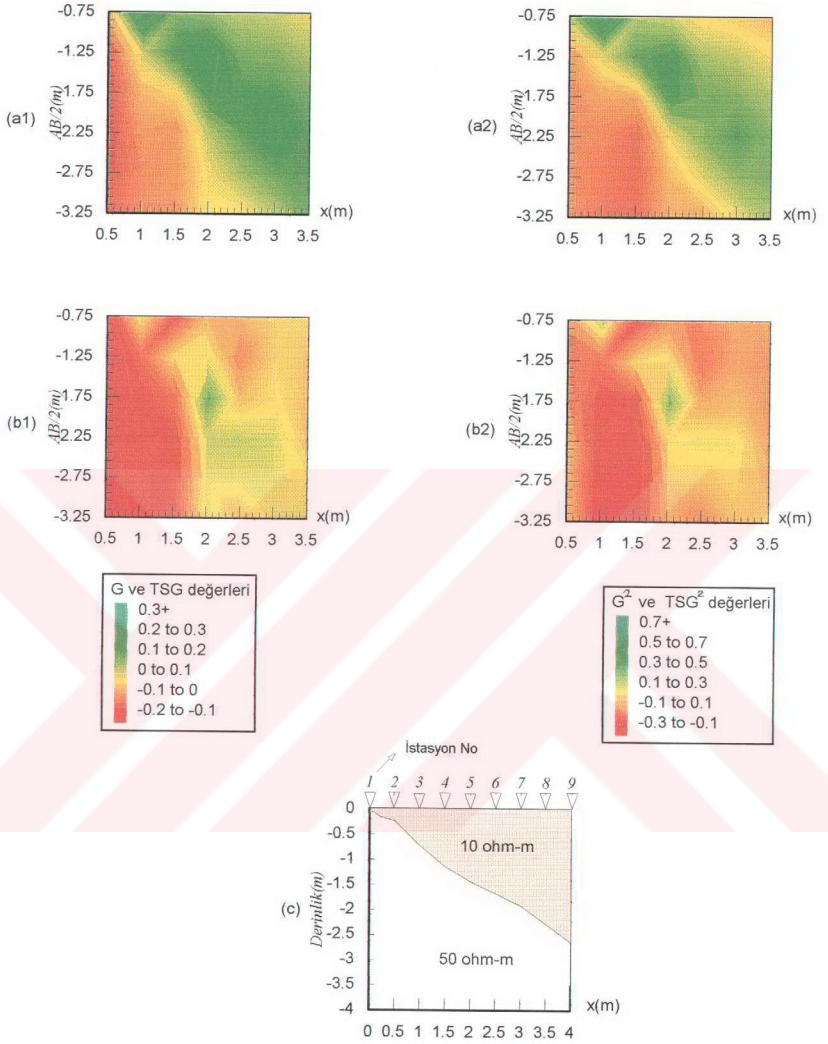
Şekil 4.33. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için ρ_{BA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{BA} GÖ profil eğrileri (b1) ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b2) ρ'_{BA} GÖ profil eğrileri (b3) ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



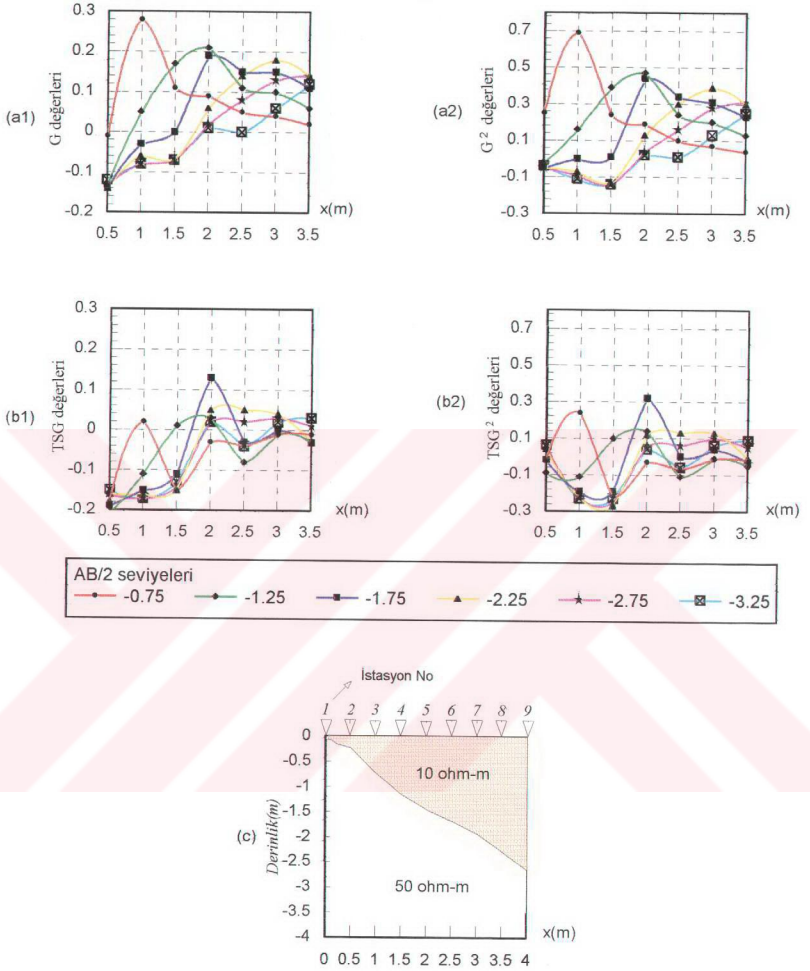
Şekil 4.34. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2 ve AMNB düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.35. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2 ve Wenner dizilimi düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.36. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c).



Şekil 4.37. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

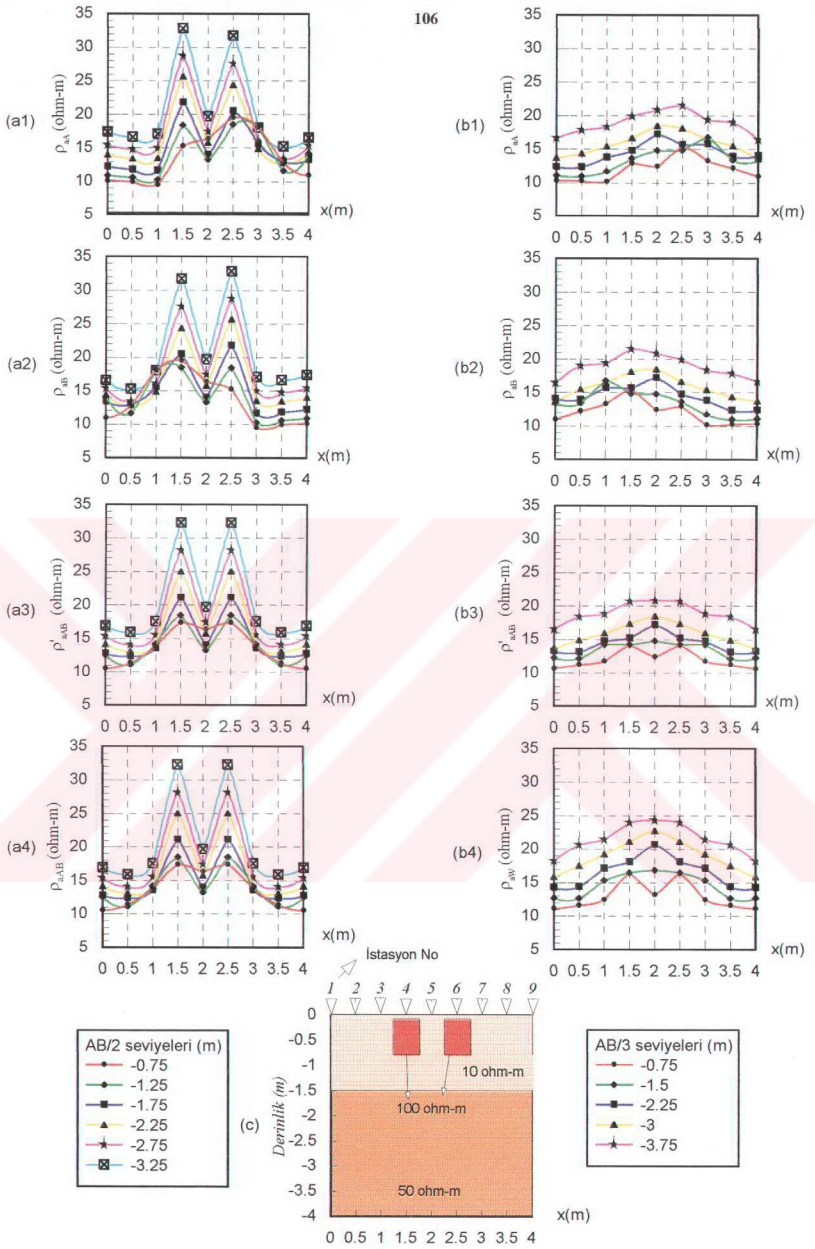
Bütün elektrod dizilimleri için de çizilen yapma kesitlerde tabaka arayüzeyi ayırt edilememektedir. İYÜE dizilimi için hesaplanan $\rho_{aA}, \rho_{aB}, \rho'_{aAB}$ değerleri ile ρ_{aAB} GÖ değerleri için çizilen yapma-kesitlerde ve profil eğrilerinde gömülü cisimlerin etkisi görülmekte ve ayırt edilmektedir. İYYW dizilimi için hesaplanan $\rho_{aA}, \rho_{aB}, \rho'_{aAB}$ değerleri ile ρ_{aW} GÖ değerleri için çizilen yapma-kesitlerde ve profil eğrilerinde ise bu iki cismin etkisi ayırt edilememekte ve sanki büyük bir cisim gibi görülmektedirler.

Şekil 4.40 de İYÜE dizilimi için $\rho_{aA}, \rho_{aB}, \rho_{aAB}$ ve ρ'_{aAB} GÖ DES eğrileri görülmektedir. Burada bütün DES eğrileri artan tiptedir. Gömülü cisimler, 4 ve 6 numaralı ölçü noktaları için pozitif katkı bölgesine düştüğünden, bu noktalar için çizilen DES eğrilerinin eğimi daha büyüktür. 3 numaralı ölçü noktasında ρ_{aB} için çizilen DES eğrisinde 6 numaralı ölçü noktası altındaki cisim pozitif katkı bölgesine düştüğünden ve 7 numaralı ölçü noktasında ρ_{aA} için çizilen DES eğrilerinde ise 4 numaralı cisim pozitif katkı bölgesine düştüğünden $AB/2=0.75$ ve 1.25 m seviyeleri için çizilen DES eğrileri artan tiptedir. Yine 3 ve 7 numaralı ölçü noktaları için aynı cisimler $AB/2=1.75$ ve 2.25 m seviyelerinde negatif katkı bölgesine düştüğünden DES eğrileri azalan tipte ve $AB/2=2.75$ ve 3.25 m seviyesinde ise ikinci tabakanın etkisinden dolayı eğriler artan tiptedir. 5 numaralı ölçü noktasında bütün DES eğrileri üstüste çakışmış ve $AB/2=1.25$ seviyesi için gömülü cisimler negatif katkı bölgesine düştüğünden azalan tiptedir. Diğer seviyelerde ise bu tabakalar pozitif katkı bölgesine düştüğünden ve ikinci tabakanın etkisinden dolayı eğriler artan tiptedir. Şekil 4.41 de İYYW dizilimi için $\rho_{aA}, \rho_{aB}, \rho_{aAB}$ ile ρ_{aW} GÖ DES eğrileri görülmektedir. Burada bütün DES eğrileri artan tiptedir. Fakat eğrilerin eğimi burada daha azdır.

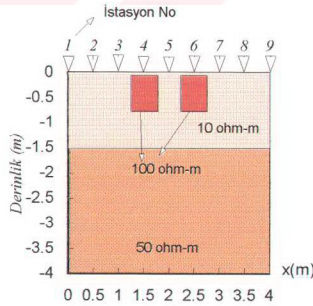
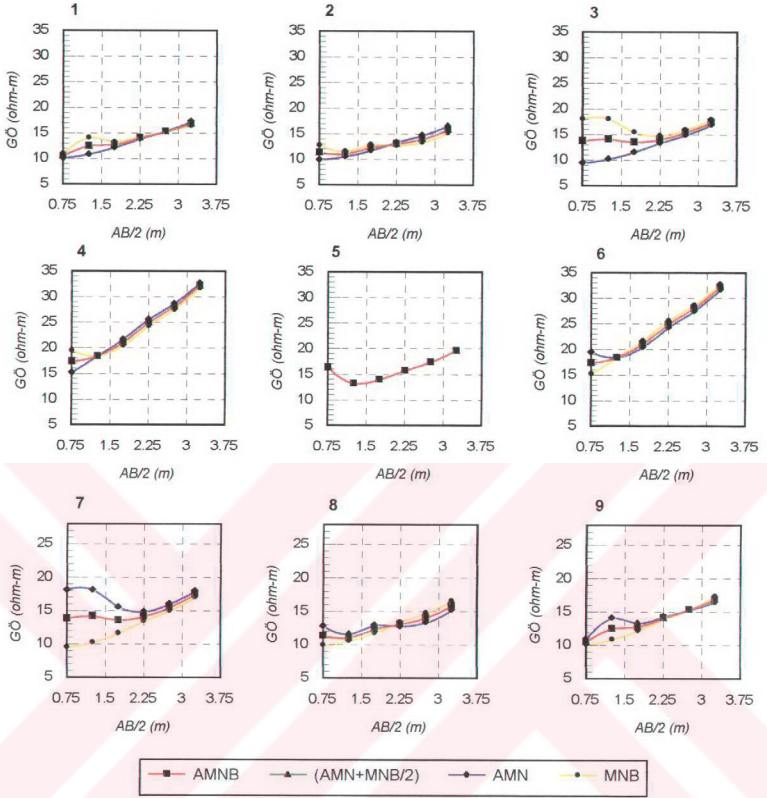
Bu model için; G, G^2, TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.42 ve Şekil 4.43 de görülmektedir. Burada, cisimlerin olduğu yerde belirti değeri G ve G^2 değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde küçüktür ve cisim derindeymiş gibi gözükmemektedir. TSG ve TSG^2 değerleri ile çizilen yapma-kesitler ve profil eğrilerinde ise bu cisimlerin olduğu yerde belirti çok daha büyüktür ve belirtinin etkisi $AB/2$ nin ilk değerinden itibaren görülmektedir.

4.8. Model 8

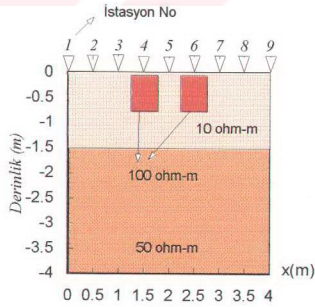
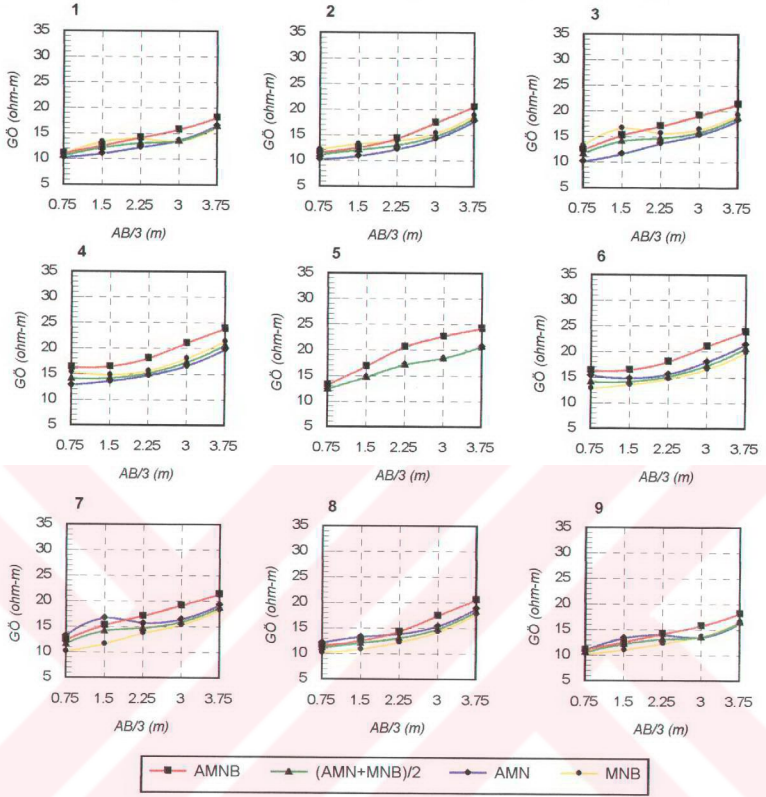
Bu modelde, birinci tabakanın özdirenci 10 ohm-m ve ikinci tabakanın özdirenci 50 ohm-m olan eğimli arayüzeyli, iki tabakalı bir ortamda, 4 ve 6 numaralı ölçü



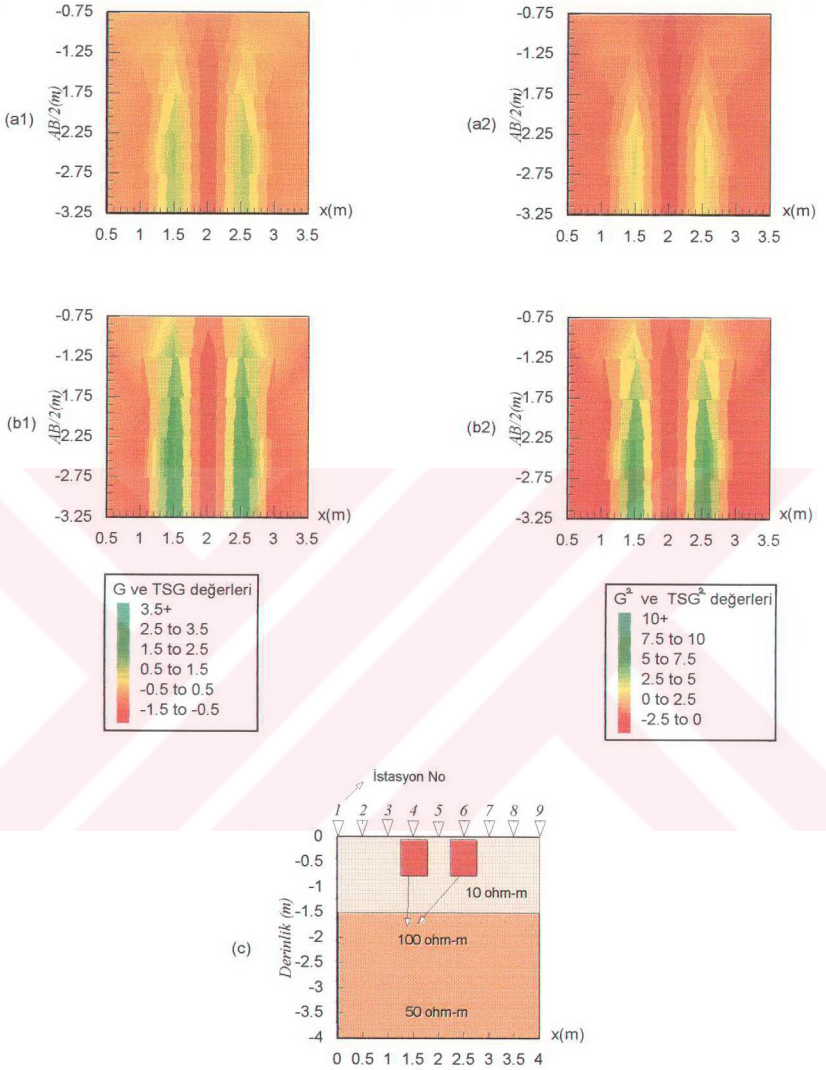
Şekil 4.39. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için ρ_{AA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a4), iki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{AA} GÖ profil eğrileri (b1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b2), ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (b3), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



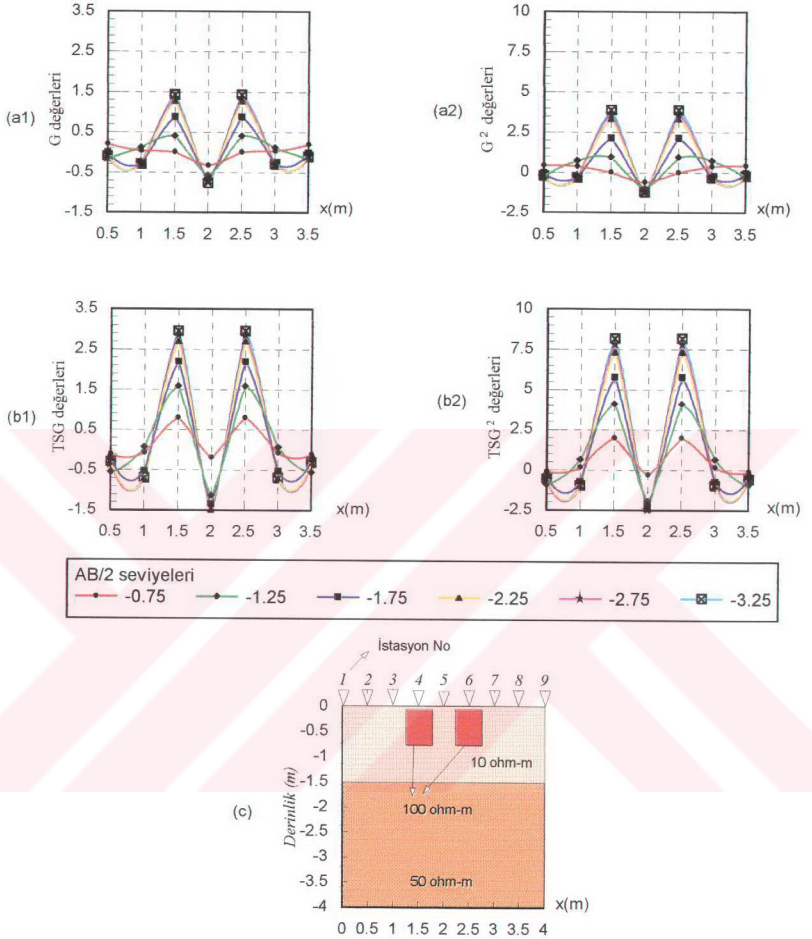
Şekil 4.40. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, AMNB düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.41. İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2, Wenner dizilimi düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.42. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c).



Şekil 4.43. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

noktalarının altında 0.25 m derinde 100 ohm-m özdirençli iki gömülü cisim ele alınmıştır (Şekil 4.44.c). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.44.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.45.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47' de görülmektedir.

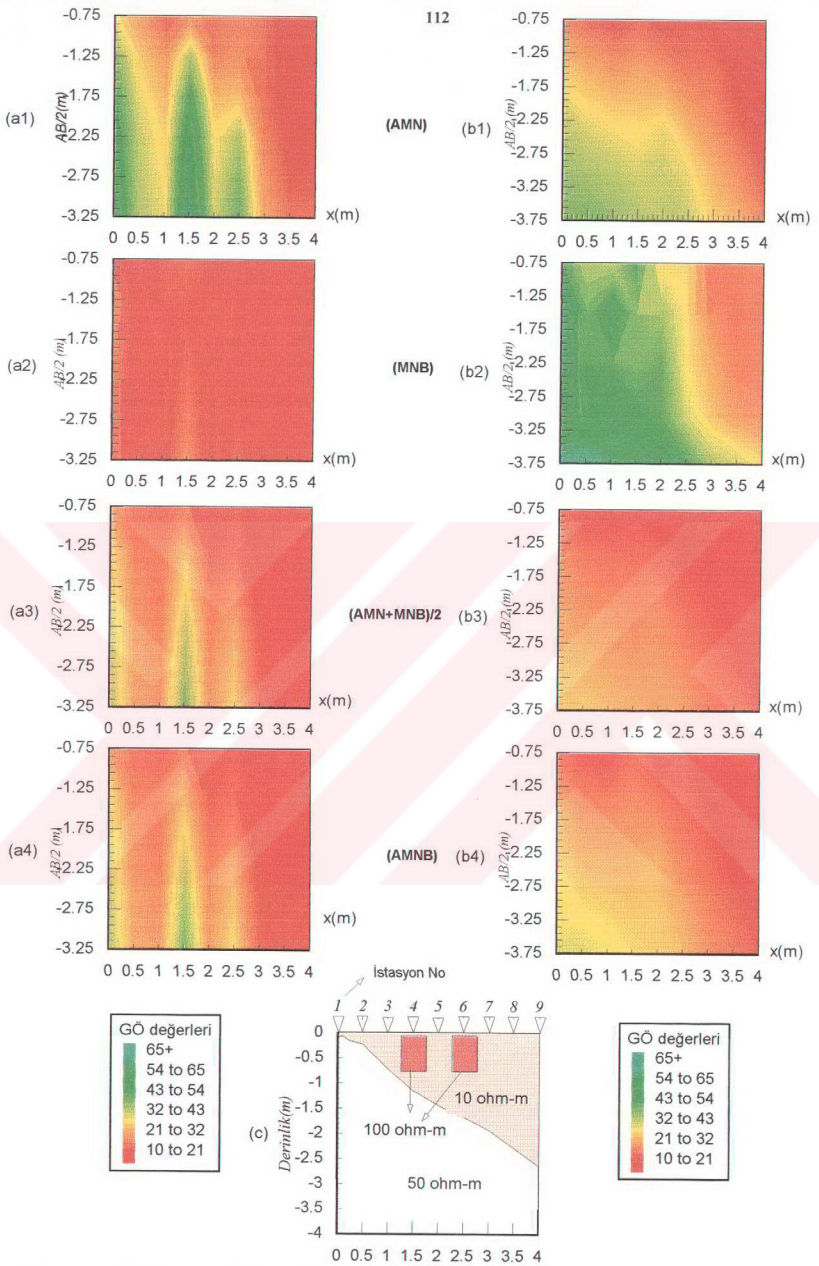
Gömülü cisimler en belirgin, İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{a1} değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde görülmektedir. Eğimli arayüzeyi ise en iyi İYYW dizilimi için hesaplanan ρ_{a1} değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrileri göstermektedir. Diğer hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde ise modelin etkisi belirgin olarak gözlenmemektedir.

İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{a1} , ρ_{a1B} ve ρ'_{a1B} değerleri ile İYYW dizilimi için hesaplanan ρ_{a1} , ρ_{a1B} ve ρ'_{a1B} GÖ değerleri için çizilen DES eğrileri artan tiptedir. Fakat İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{aB} GÖ değerleri ile İYYW dizilimi için hesaplanan ρ_{aB} GÖ değerleri için çizilen DES eğrileri düz bir doğru şeklindedir.

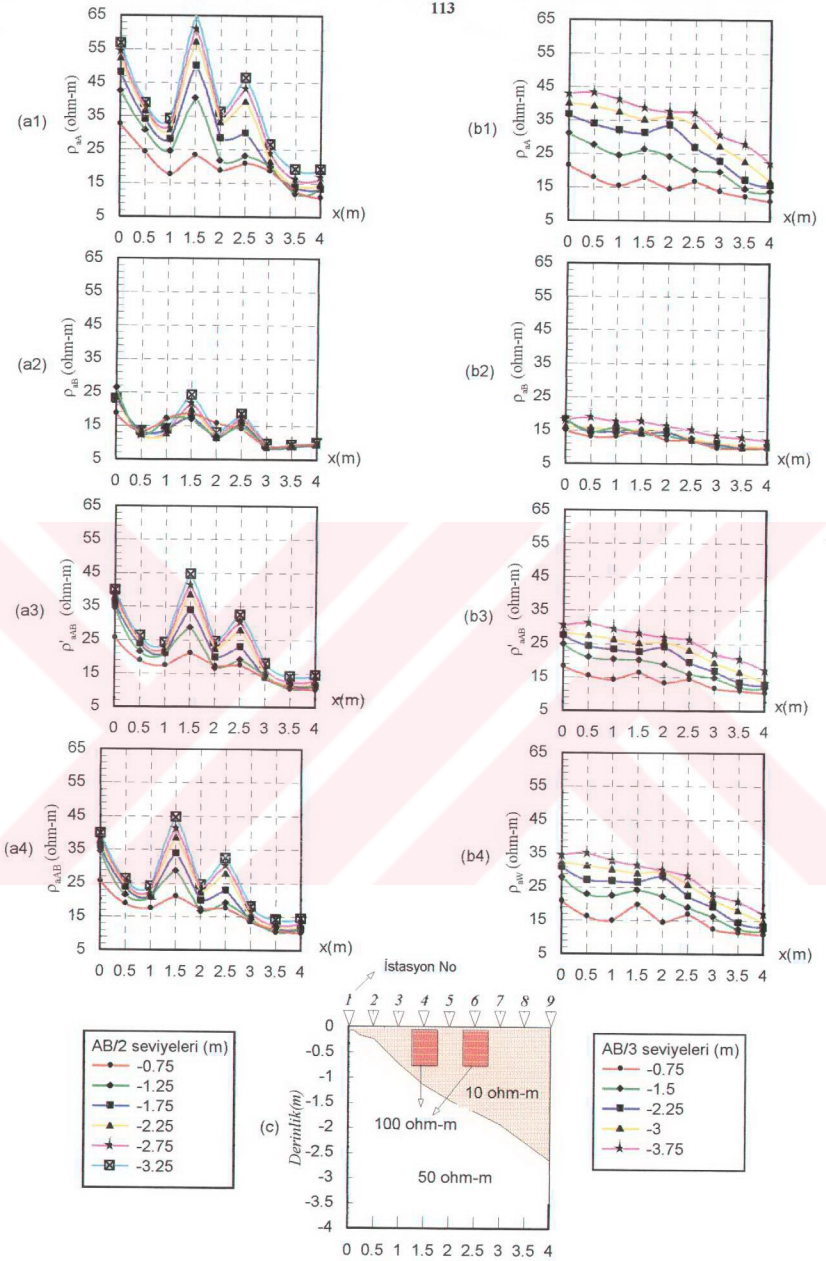
Yine aynı model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{a1} ve ρ_{aB} ile bulunun G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.48 ve Şekil 4.49 da görülmektedir. Gömülü cisimler ;bütün dizilimler için çizilen GÖ yapma-kesitlerinde belirgin olarak ayırt edilemezken, G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleriyle çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde bu iki cismin etkisi görülmektedir. Burada cisimleri; TSG ve TSG^2 değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinin G ve G^2 değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinden daha iyi gösterdiği görülmektedir.

4.9. Model 9

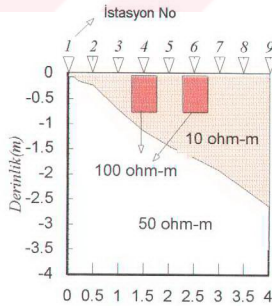
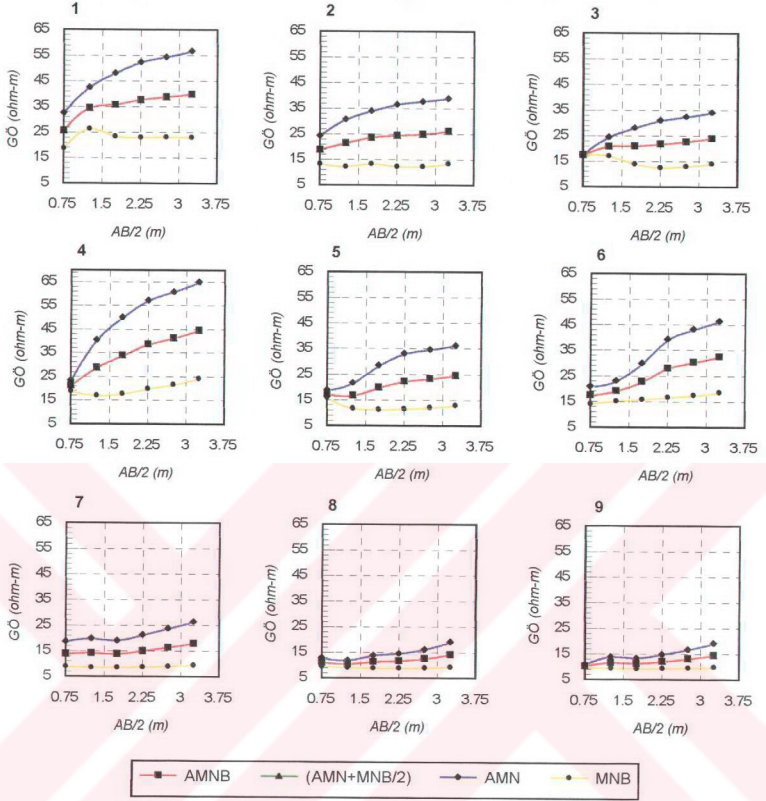
Bu modelde, birinci tabakanın kalınlığı 1.5 m ve özdirenci 10 ohm, ikinci tabakanın özdirenci 50 ohm-m ve birinci tabakanın 4 ve 6 numaralı ölçü noktalarının altındaki bölge yaklaşık 1.25 m kadar ikinci tabakanın içine sokulmuş durumdadır (Şekil 4.50.c). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.50.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.51.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53' de görülmektedir.



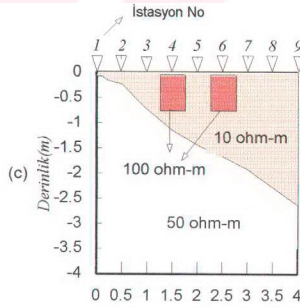
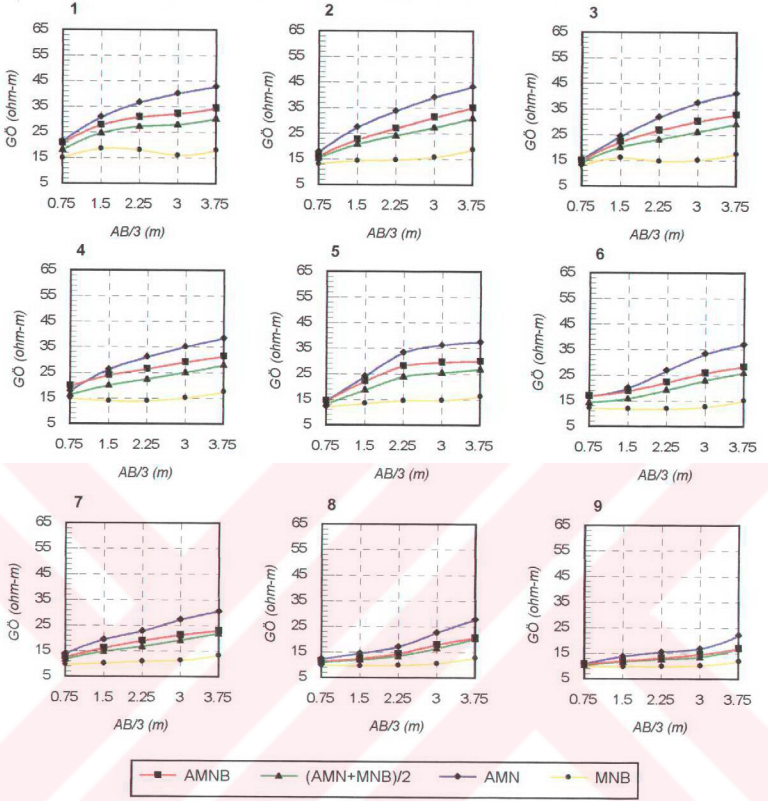
Şekil 4. 44. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma kesiti (a1), MNB GÖ yapma-kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c).



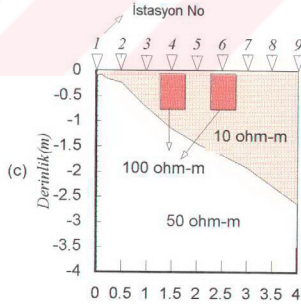
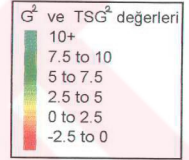
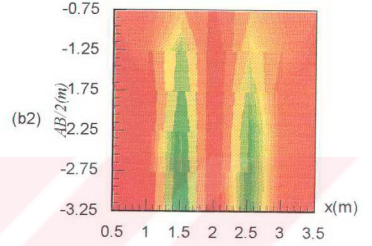
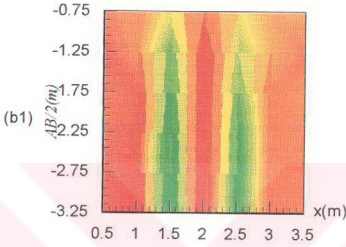
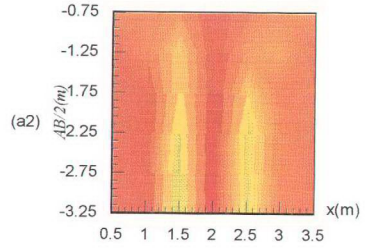
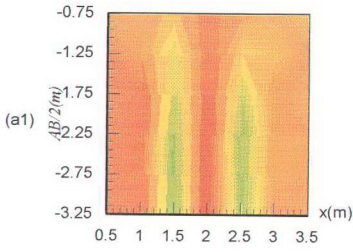
Şekil 4.45. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1) ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2) ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3) ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



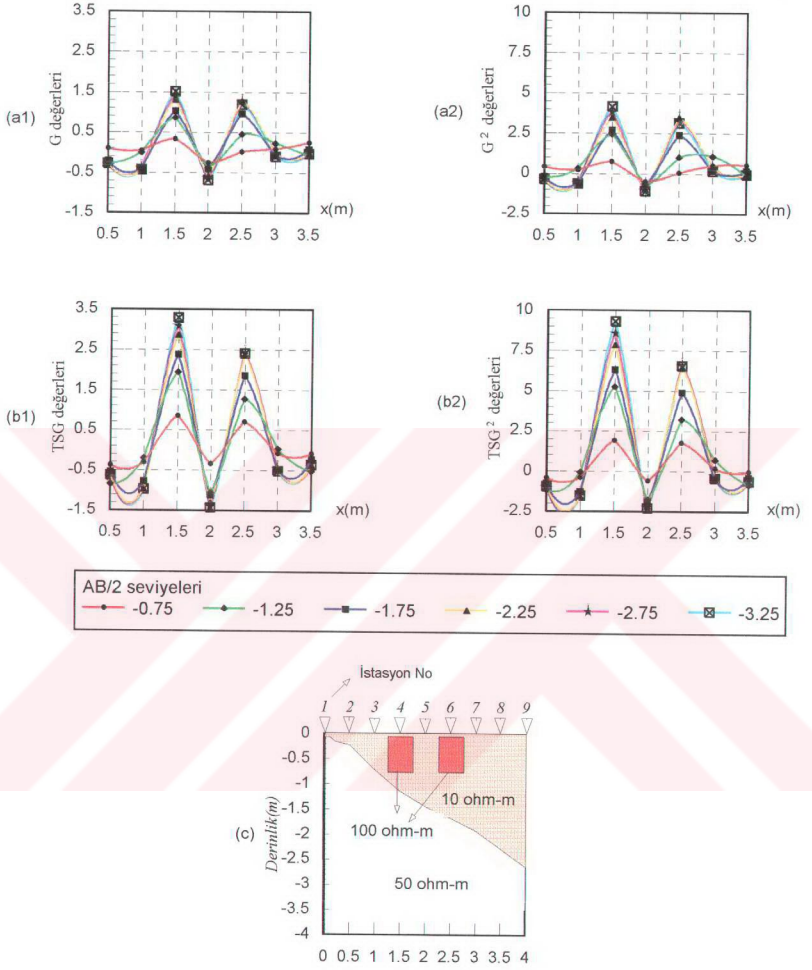
Şekil 4.46. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2 ve AMNB Düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.47. İki yönlü yarım-Wenner elektrod dizilimi için AMN, MNB, $(AMN+MNB)/2$ ve Wenner dizilimi düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.48. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c).



Şekil 4.49. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

Gömülü cisimler en belirgin, İYÜE dizilimi için hesaplanan ρ_{aA} ve ρ_{aB} nin aritmetik ortalamasından hesaplanan ρ'_{aAB} ile A ve B den akım verilerek hesaplanan ρ_{aAB} değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrileri göstermektedir. Diğer hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde ise modelin etkisi belirgin olarak gözlenmemektedir.

Bütün elektrod dizilimi için çizilen DES eğrileri ise artan tiptedir ve iki tabakalı ortamı yansıtmaktadır. Fakat DES eğrilerinde, birinci tabakanın ikinci tabaka içine dalımı gözlenmemektedir.

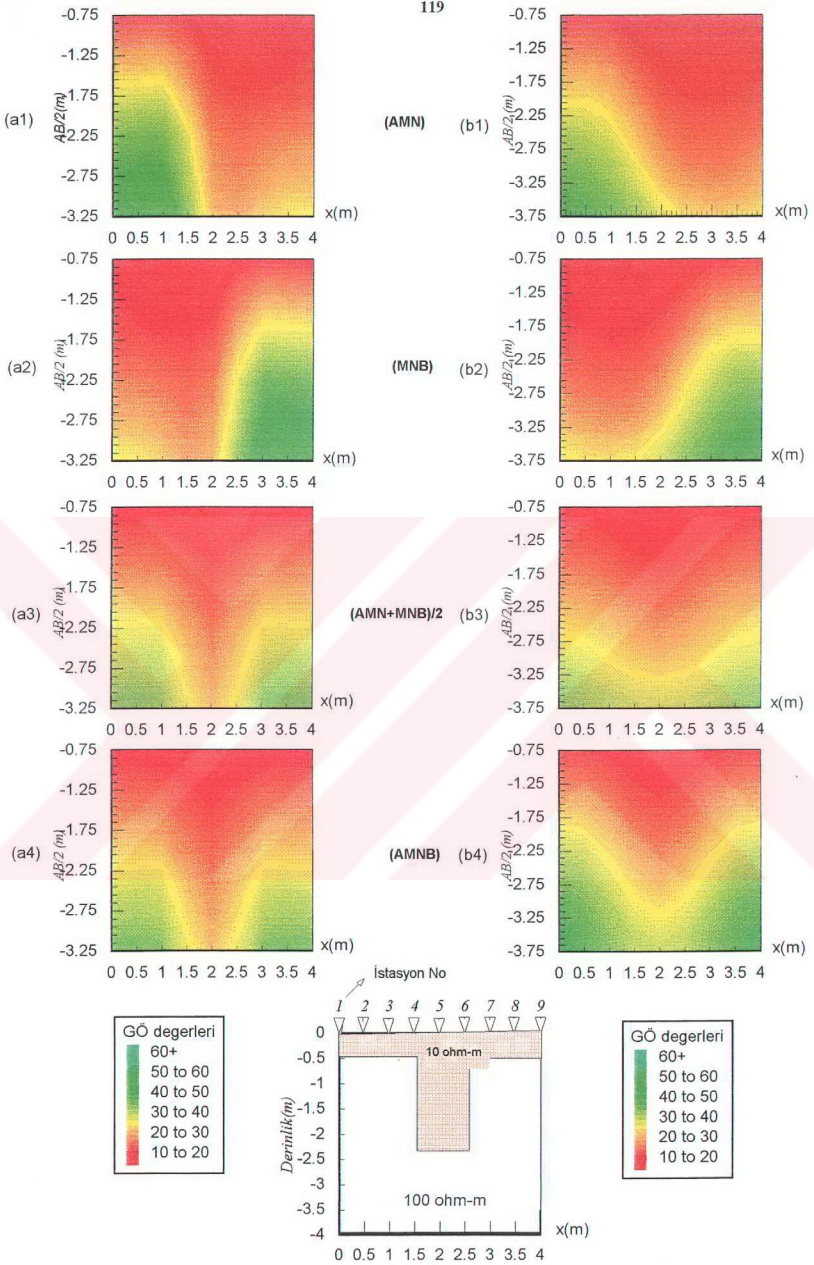
Bu model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{aA} ve ρ_{aB} ile bulunun G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.54 ve Şekil 4.55 de görülmektedir. Burada; TSG ve TSG^2 değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde yanal yöndeki değişim çok net gözlenirken, G ve G^2 değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerine bakarak model ile ilgili hiçbir yorum yapılamaz.

4.10. Model 10

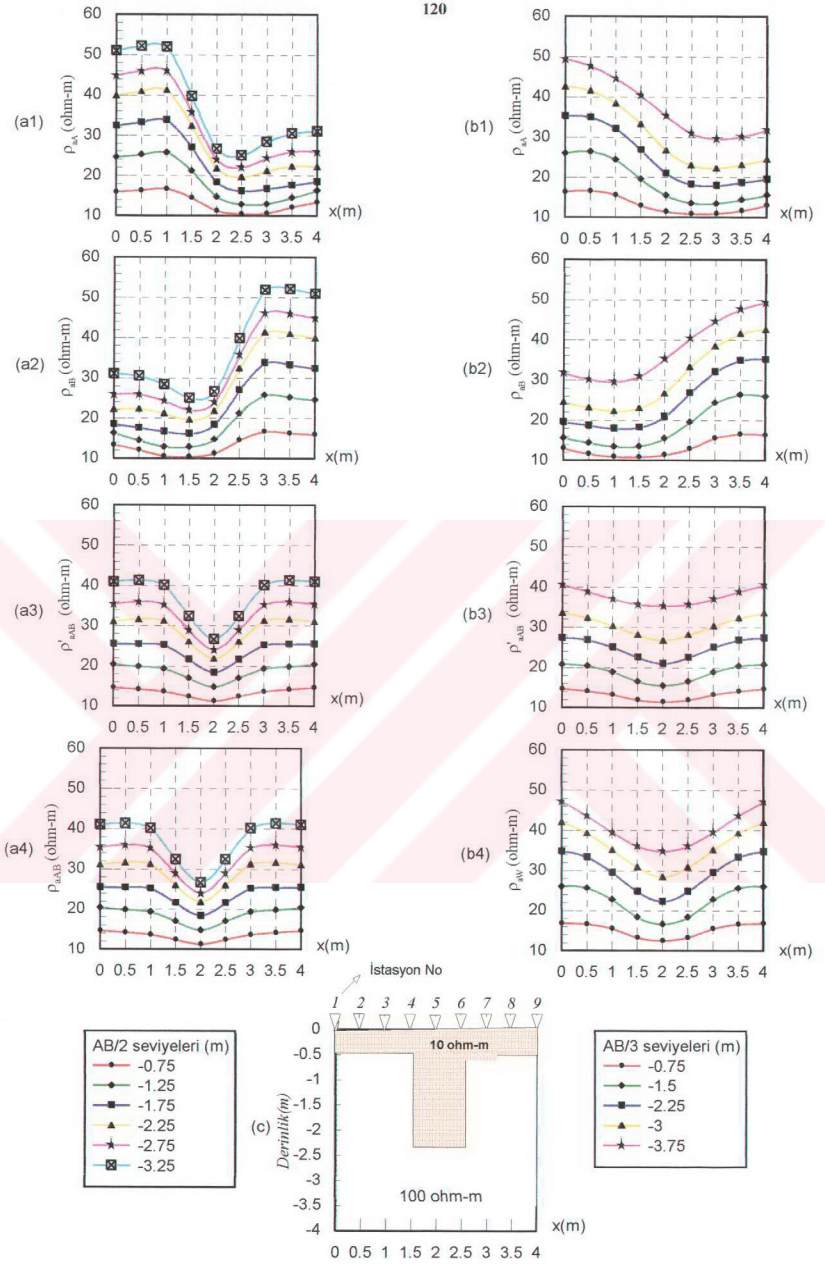
Bu modelde, yüzeyde 0.75 m derinlikte ve 10 ohm-m özdirencinde ince bir tabaka ve bunun altında, profilin tam orta noktasının altında bir fay düzlemi görülmektedir. Fay düzleminin sol tarafı 50 ohm-m ve sağ tarafı ise 200 ohm-m özdirencindedir (Şekil 4.56). Bu model için 2-B modelleme sonucu hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit, profil eğrileri ve DES eğrileri Şekil 4.56.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.57.a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3 ve b4, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59' da görülmektedir.

Şekil 4.58 da İYÜE dizilimi için ρ_{aA} , ρ_{aB} , ρ'_{aAB} ve ρ_{aAB} GÖ DES eğrileri görülmektedir. Burada 1 numaralı ölçü noktası hariç bütün ölçü noktalarındaki ρ_{aA} DES eğrileri azalan tip ve ρ_{aB} DES eğrileri ise artan tiptedir. ρ_{aAB} ve ρ'_{aAB} DES eğrileri ise ρ_{aA} ve ρ_{aB} nin tam ortasında ve üst üst geçmektedir.

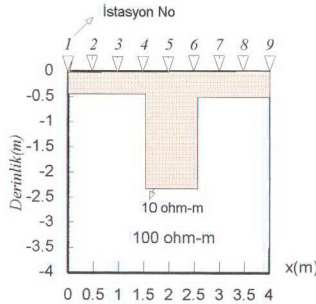
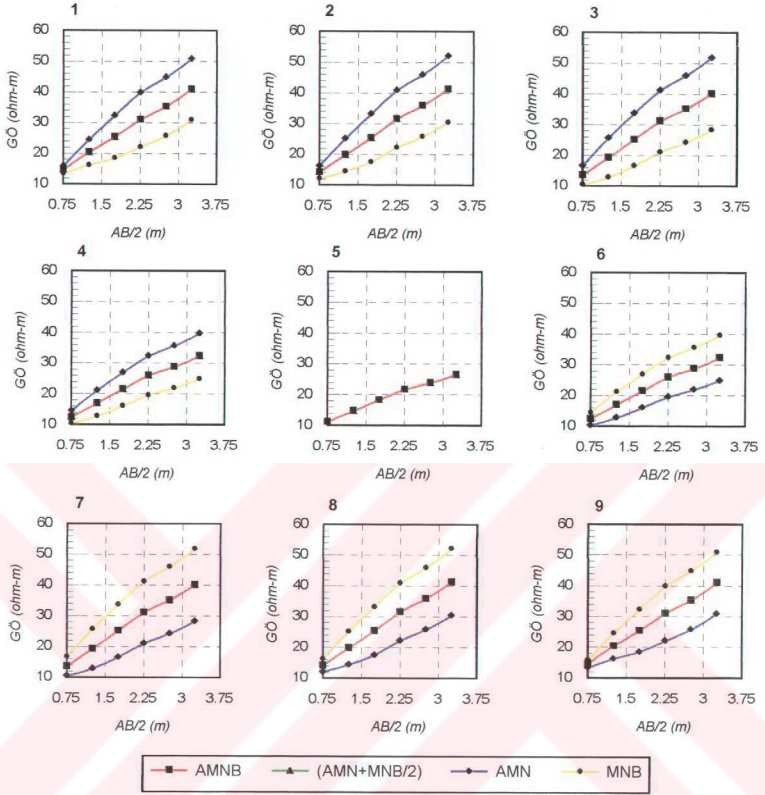
Şekil 4.59 da İYYW dizilimi için ρ_{aA} , ρ_{aB} , ρ'_{aAB} ile ρ_{aAB} GÖ DES eğrileri görülmektedir. Burada bütün ölçü noktalarındaki ρ_{aA} DES eğrileri azalan tip ve ρ_{aB} DES eğrileri ise



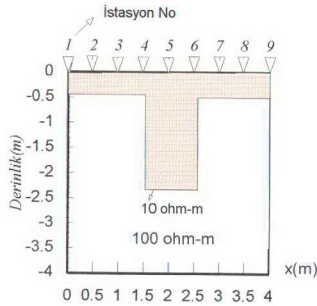
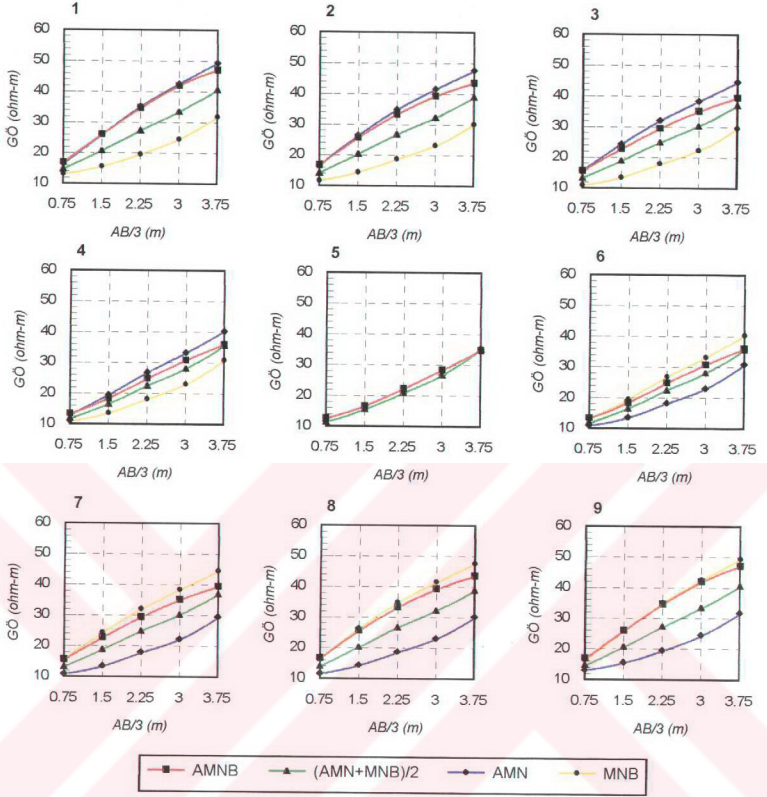
Şekil 4.50. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma-kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c).



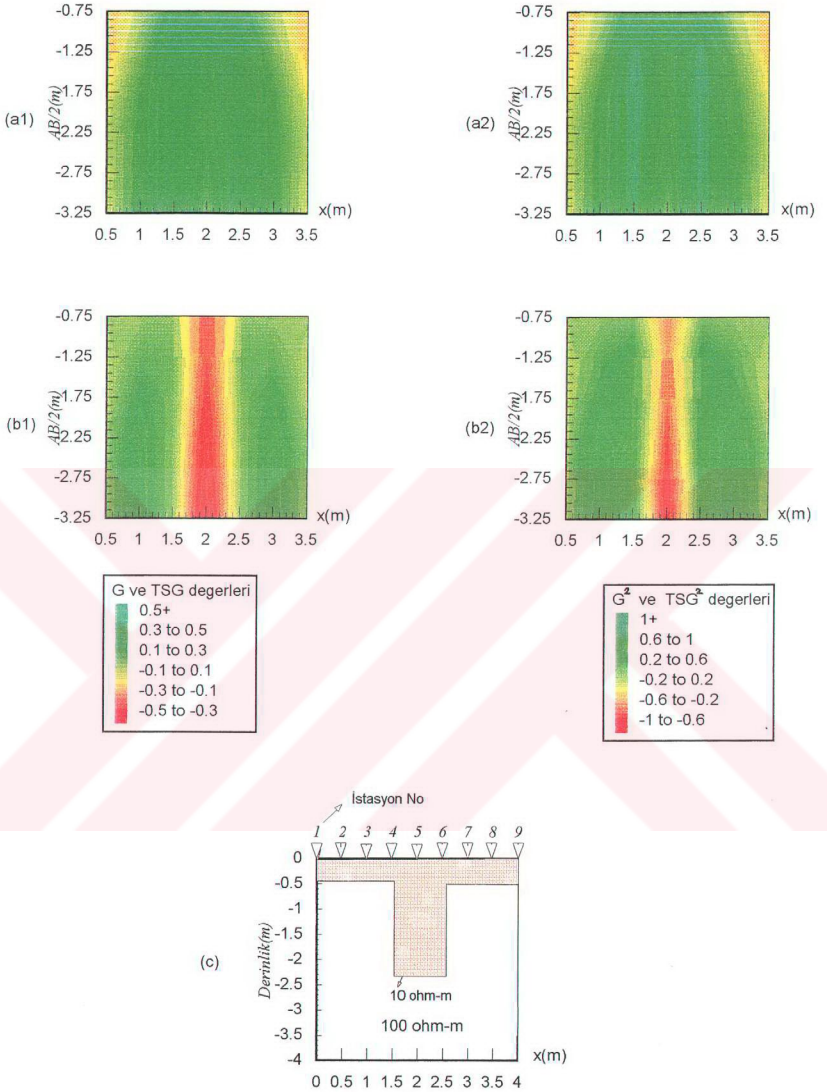
Şekil 4.51. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{aA} GÖ profil eğrileri (b1) ρ_{aB} GÖ profil eğrileri (b2) ρ'_{aAB} GÖ profil eğrileri (b3) ρ_{aAB} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



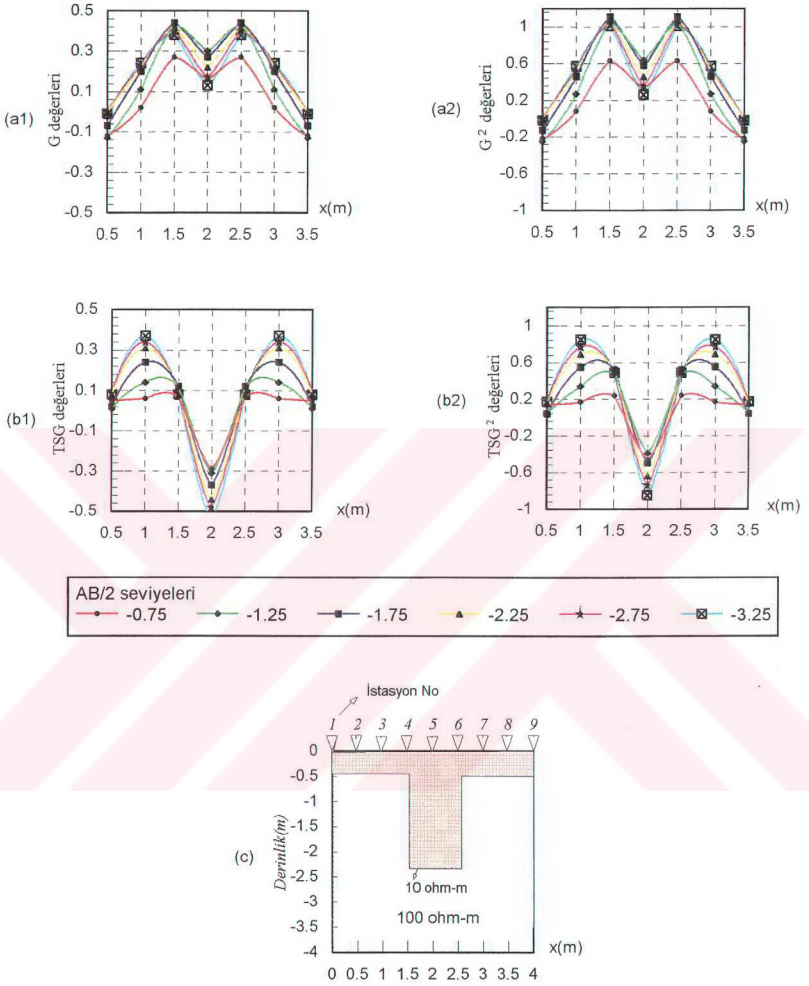
Şekil 4.52. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2 ve AMNB düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



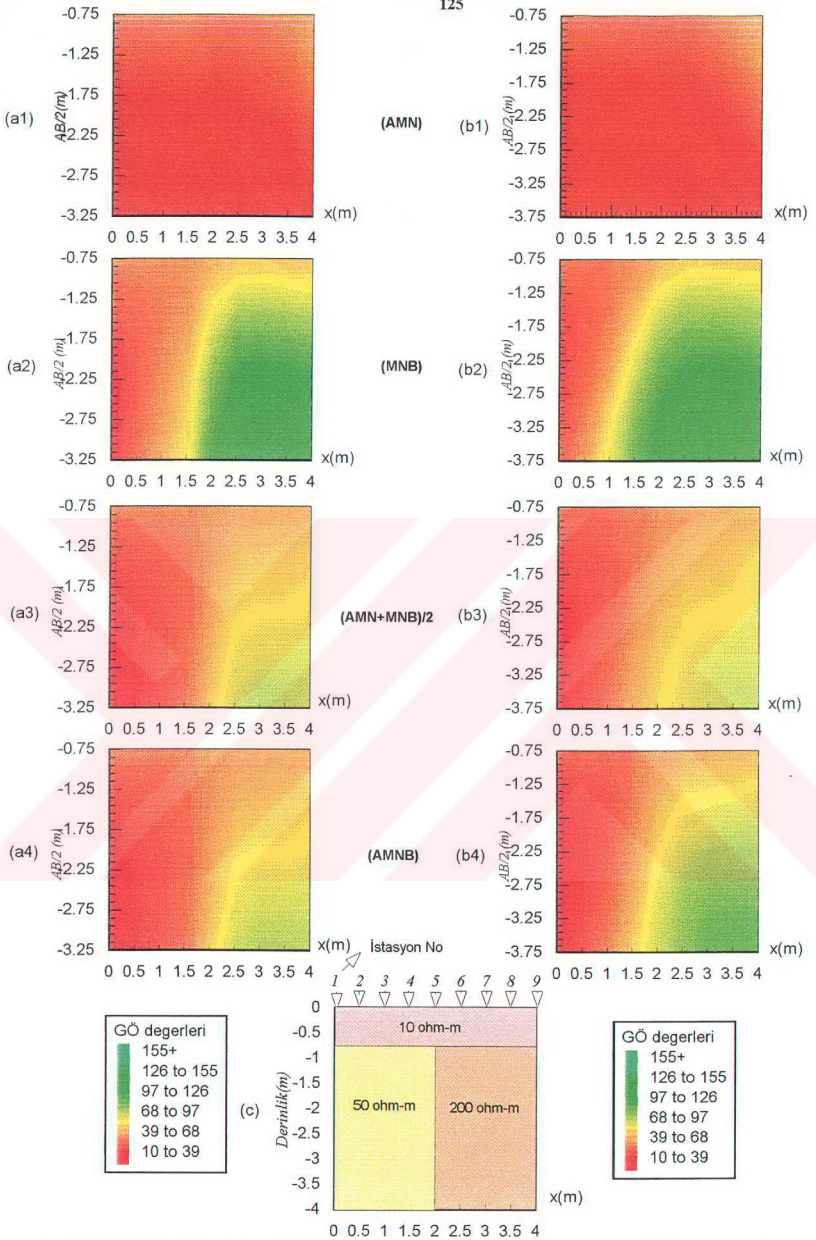
Şekil 4.53. İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2 ve Wenner dizilimi düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



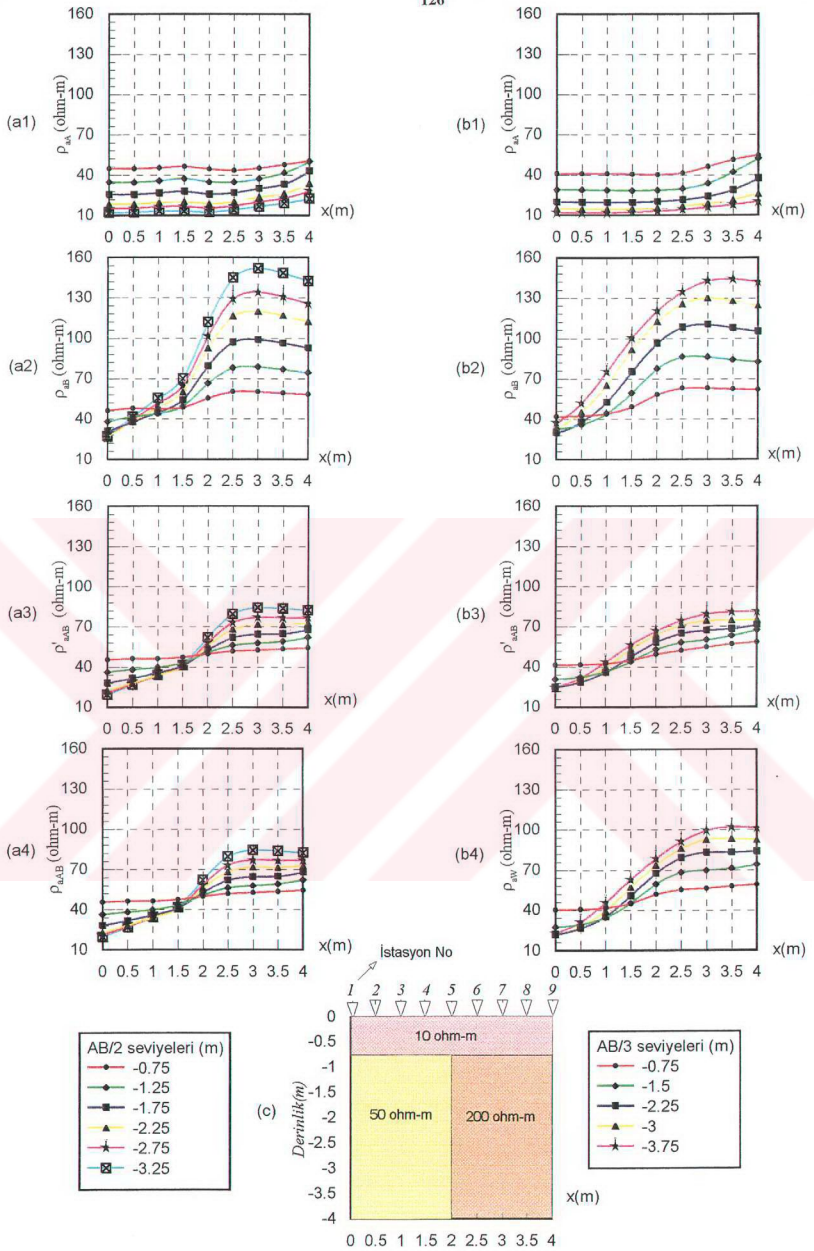
Şekil 4.54. G değerleri yapma-kesiti (a1), G^2 değerleri yapma-kesiti (a2), TSG değerleri yapma-kesiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kesiti (b2) ve yer modeli (c).



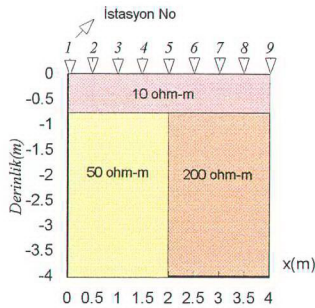
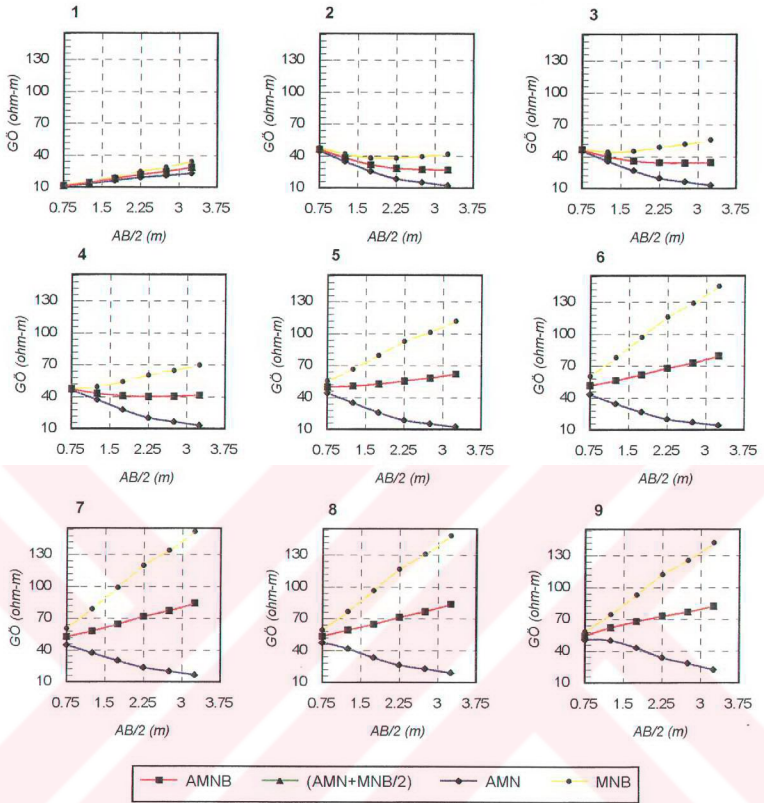
Şekil 4.55. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).



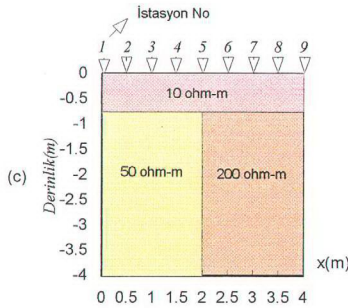
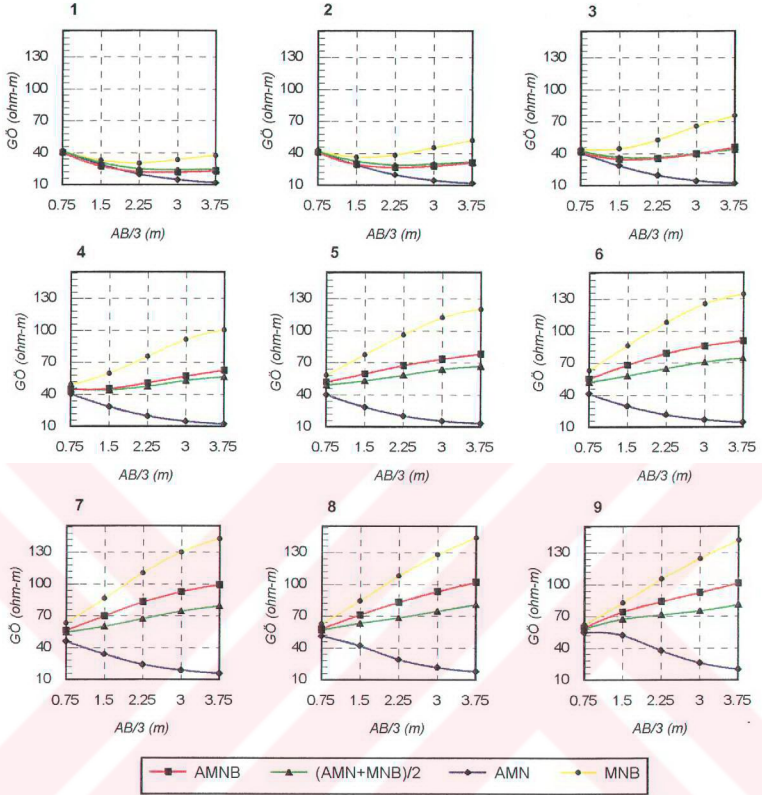
Şekil 4. 56. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (a1), MNB GÖ yapma-kesiti (a2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (a3), AMNB GÖ yapma-kesiti (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN GÖ yapma-kesiti (b1), MNB GÖ yapma-kesiti (b2), (AMN+MNB)/2 GÖ yapma-kesiti (b3), Wenner dizilimi GÖ yapma-kesiti (b4) ve yer modeli (c).



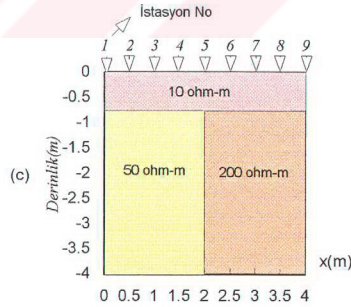
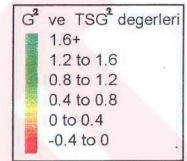
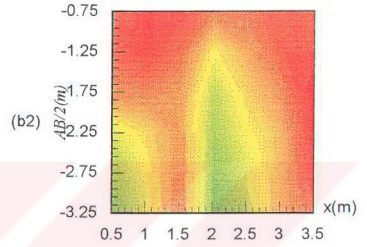
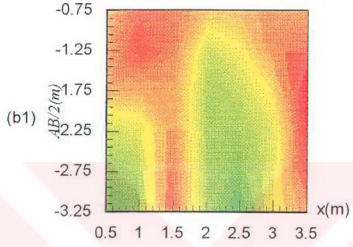
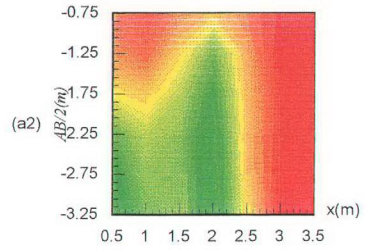
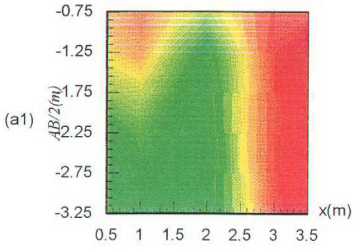
Şekil 4.57. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için ρ_{BA} GÖ profil eğrileri (a1), ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (a2), ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (a3), ρ_{BA} GÖ profil eğrileri (a4). İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için ρ_{BA} GÖ profil eğrileri (b1) ρ_{AB} GÖ profil eğrileri (b2) ρ'_{AB} GÖ profil eğrileri (b3) ρ_{BW} GÖ profil eğrileri (b4) ve yer modeli (c).



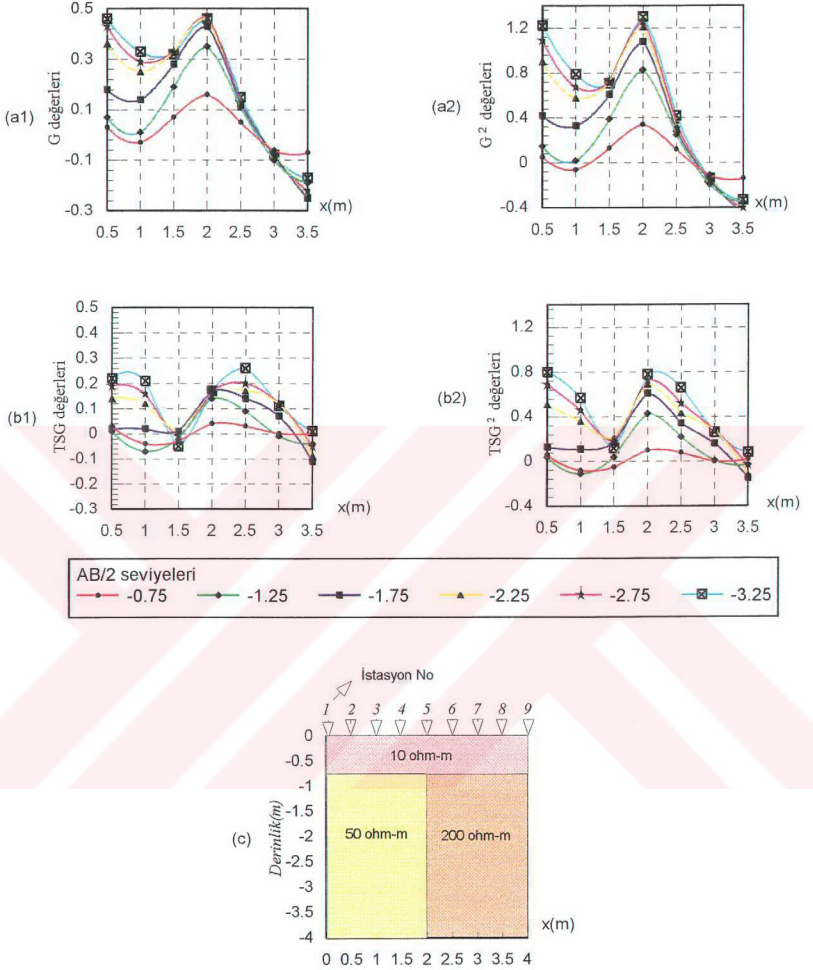
Şekil 4.58. İki yönlü-üç elektrod dizilimi için AMN, MNB, (AMN+MNB)/2 ve AMNB düşey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.59. İki yönlü yarım-Wenner dizilimi için AMN, MNB, $(AMN+MNB)/2$, Wenner dizilimi düzey elektrik sondajı eğrileri ve yer modeli.



Şekil 4.60. G değerleri yapma-kесiti (a1), G^2 değerleri yapma-kесiti (a2), TSG değerleri yapma-kесiti (b1), TSG^2 değerleri yapma-kесiti (b2) ve yer modeli (c).



Şekil 4.61. Farklı AB/2 seviyeleri için; G değerleri profil eğrisi (a1), G^2 değerleri profil eğrisi (a2), TSG değerleri profil eğrisi (b1), TSG^2 değerleri profil eğrisi (b2), ve yer modeli (c).

artan tiptedir. ρ'_{aAB} DES eğrileri ise ρ_{aA} ve ρ_{aB} nin tam ortasından ρ_{aW} DES eğrileri ise ρ'_{aAB} nin biraz üstünde ve artan tip bir eğridir.

Bu model için; İYÜE dizilimi ile hesaplanan ρ_{aA} ve ρ_{aB} ile bulunun G , G^2 , TSG ve TSG^2 değerleri için çizilen profil eğrileri ve yapma-kesitler Şekil 4.60 ve Şekil 4.61 de görülmektedir. Burada; G ve G^2 değerleri ile çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde fay düzlemi gözlenmektedir.



5. SONUÇLAR

Genel olarak DAÖ verilerinin 2-B modellemesinde kullanılan sonlu farklar ve sonlu elemanlar sayısal çözüm yöntemleri kullanışlıdır. Sonlu farklar formülasyonunun kolay programlanabilir olması en önemli avantajıdır. Sonlu elemanlar yönteminin formülasyonunu programlamak sonlu farklara göre daha karmaşıktır. Fakat bu yöntemde çözüm bölgesi istenilen şekilde bölünebilir. Karmaşık sınırların tanımlanmasında ve çözümün bulunmasında sonlu farklara göre daha kullanışlıdır. Sonlu elemanlar yönteminin diğer sayısal çözüm yöntemlerine göre en önemli avantajlarından biriside; modele topoğrafyanın etkisini katabilmektir (Örneğin Tong and Young 1990; Uchida 1991).

İYÜE dizilimi ile yapılan modellemelerde Uchida' nın (1990) sonlu elemanlar yöntemi ile 2-B ters çözüm yapan programı kullanılmıştır. Burada AMN ve MNB nin aritmetik ortalaması ile AMNB GÖ değerleri eşit çıkmaktadır. İYYW ve Wenner dizilimi ile yapılan modellemelerde ise Dey' in (1976) sonlu farklar yöntemine göre 2-B modelleme yapan programı kullanılmıştır. Burada AMN ve MNB nin aritmetik ortalaması ile hesaplanan GÖ değerleri ile Wenner dizilimi ile hesaplanan GÖ değerleri eşit çıkmamaktadır. Bu sonucu göre ve başka araştırmacıların da incelemelerine göre (Fenner,1975; Pridmore ve diğ, 1981; Molano ve diğ.,1990; Candansayar 1996); sonlu elemanlar yönteminin sonlu farklar yöntemine göre daha kullanışlı olduğu söylenebilir.

Sonlu farklar ve sonlu elemanlar sayısal çözüm yöntemine göre 2-B modelleme yapan programlarda $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ yi $\phi(x, y, z)$ ' ye dönüştürmede kullanılan k_y katsayılarının iyi belirlenmesi gereklidir. k_y katsayıları kullanılan ağ' ın boyutlarına ve GÖ değerlerinin hesaplanacağı AB/2 (veya AB/3) değerlerine bağlıdır. Modelleme yapmadan önce, en büyük AB/2 değeri ve istasyonlar arasındaki uzaklığa göre ağın boyutları ayarlanmalı ve kullanılacak AB/2 değerleri için hesaplanan GÖ değerleri homojen ortamın öz direncine eşit olacak şekilde k_y katsayıları belirlenmelidir. Bu katsayılar ağ boyutlarına ve AB/2 değerlerine bağlı formülize edilebilir.

Model 1, model 2 ve model 3 de gömülü cismi İYÜE dizilimi için çizilen GÖ yapma-kesitleri ve profil eğrileri, İYYW ve Wenner dizilimi için çizilen GÖ yapma-kesit ve profil

eğrilerinden daha iyi göstermektedir. Model 4 de İYÜE diziliminde AMN GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit sağdaki gömülü cisim, MNB GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit ise soldaki gömülü cisim daha belirgin göstermektedir. Diğer elektrod dizilimlerine göre hesaplanan GÖ değerleri ile G değerleri için çizilen yapma-kesitlerde gömülü cisimler ayırt edilememektedir (Şekil 4.21). Aynı model için hesaplanan TSG değerleri ile çizilen yapma-kesitte ise her iki cisimde ayırt edilebilmekte ve yerleri tam olarak belirlenebilmektedir. Model 5 de modeli, İYÜE dizilimine göre hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesitler, İYYW dizilimine göre hesaplanan GÖ değerlerinden çizilen GÖ yapma-kesitlerinden daha iyi yansıtmaktadır. Bu modelde tabaka arayüzeyi, İYYW dizilimine göre çizilen yapma-kesitlerde olduğundan daha derindeymiş gibi görülmektedir. Model 6 da İYÜE diziliminde AMN GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesitte ikinci tabaka görülmekte fakat tabaka arayüzeyi tam olarak belirlenememektedir. İYYW diziliminde AMN GÖ değerleri ile çizilen GÖ yapma-kesitinde ikinci tabaka, 1 ve 2 numaralı istasyonların altında olduğundan daha derindeymiş gibi görülmekte MNB GÖ yapma kesitinde ise aynı numaralı istasyonda ikinci tabaka yüzeyde mostra vermiş gibi görülmektedir. İYYW diziliminde de tabaka arayüzeyi ayırt edilememektedir. Yarım açılımların bu modelde yanal süreksizlikleri daha iyi gösterdiği söylenebilir. Model 7 de modeli; İYÜE dizilimine göre hesaplanan GÖ değerlerinden çizilen yapma-kesitleri, İYYW dizilimine göre hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesitlerden daha iyi yansıtmaktadır. Model 8 de ise modeli en iyi TSG değerleri ile çizilen yapma-kesit göstermektedir (Şekil 4.48.b1). Model 9 da modeli en iyi, İYÜE diziliminde AMN ve MNB nin aritmetik ortalamasından hesaplanan GÖ değerleri ile çizilen yapma kesit yansıtmaktadır. Model 10 da, modeli en iyi; İYÜE ve İYYW dizilimlerinde, MNB GÖ değerleri ile çizilen yapma-kesit yansıtmaktadır.

Yapılan tüm 2-B modellemelere göre; yanal süreksizliklerin belirlenmesinde İYÜE diziliminin, Wenner ve İYYW diziliminden daha kullanışlı olduğu söylenebilir. Tabakalı ortam içinde aynı şey söylenebilir. Fakat bu çalışmada kullanılan tüm elektrod dizilimlerine göre çizilen yapma-kesitlerde gömülü cisimlerin hangi derinlikte sona erdiği hakkında bir bilgi edinilememektedir.

2-B modelleme sonuçları yorumlanırken daha çok profil eğrileri ve yapma-kesitlerden yararlanılmıştır. GÖ DES eğrileri ile oluşturulan 2-B model hakkında anlamlı bir yorum yapmak mümkün değildir.

G ve TSG dönüşümleri Model 1 de görüldüğü gibi, cismin öz direnci çevre jeolojinin öz direncinden küçük olması durumunda iyi sonuç vermemektedir (Bkz. Şekil 4.7-8). Yapılan 2-B modellemelere göre TSG dönüşümü; aranan yapının öz direnci çevre jeolojisinin öz direncinden büyük olması durumunda G dönüşümünden daha iyi sonuç vermektedir. Model 4 de tüm elektrod dizilimleri için çizilen GÖ yapma-kesit' lerinde, GÖ profil eğrilerinde, G yapma-kesitlerinde ve G profil eğrilerinde yanyana iki cisim birbirinden ayırt edilemezken, TSG değerleri için çizilen yapma-kesit ve profil eğrilerinde bu iki cisim birbirinden ayırt edilebilmektedir (Bkz. Şekil 4.21-26). Model 5 de görüldüğü gibi yanal süreksizlik olmadığı durumda bütün G, G^2, TSG ve TSG^2 değerleri sıfır olarak hesaplanmıştır (bkz. Şekil 4.31). Model 6 da ise tabaka arayüzeyini G yapma-kesiti, TSG yapma-kesiti ve GÖ yapma-kesitlerinden daha iyi göstermektedir (Şekil 4.36.a1).

Genelde aranan arkeolojik yapının (duvar, pithos, taş sanduka mezar vb...) öz direnci çevre jeolojisinin öz direncinden büyük olduğundan TSG dönüşümünün arkeolojik yapıların aranmasında G dönüşümünden daha iyi sonuç vereceği söylenebilir. 2-B süreksizliklerin belirlenmesinde G ve TSG dönüşümleri kullanışlı veri işlem teknikleridir.

Sinyal katkı kesitlerinden; veri yorumunda pozitif ve negatif katkı bölgelerinin gözönünde bulundurulması gerektiği görülmektedir. Farklı elektrod dizilimleri için çizilen sinyal katkı kesitlerine bakılarak, amaca yönelik hangi elektrod diziliminin seçilebileceğine karar verilebilir. Sinyal katkı kesitlerine göre; sığ araştırmalarda, özellikle arkeolojik araştırmalarda İYÜE dizilimi kullanışlıdır.

Doğru akım öz direnç yönteminde ölçülen sinyal yarım küre hacmindeki bir alanın cevabıdır. Sinyal katkı kesitleri, bu yarım küre hacminin düşey (z yönünde) bir kesittir ve bu kesitlerden derinliğin artmasıyla yarım küre hacminin büyüdüğü görülmektedir. Buna göre doğru akım öz direnç yönteminde, derinliğin artmasıyla ayrımlılığın azalacağı söylenebilir. Ayrıca sinyal katkı kesitlerinden; ölçülen sinyale en çok elektrodların çevresindeki alanın katkısı olduğu görülmektedir. Buna görede sığ yapıların aranmasında bu yöntemin başarıyla uygulanabileceği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Apparao, A. 1979.** Model tank experiments on resolution of resistivity anomalies obtained over buried conducting dikes-inline and broadside profiling. G.P., v. 27, p. 835-847.
- Aspinal, A. and Lynam, J.T. 1970.** An induced polarization instrument for the detection of Near surface features. *Prospez. Archael.*, 5: p.67-75.
- Aktarakçı, H.K. 1988.** Düşey ve eğik daykların deneysel ve teorik D.C. öz direnç tepkilerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi (Yayımlanmamış).
- Aktaş, Z., Öncül, H. ve Uras, S. 1981.** Sayısal çözümleme. ODTÜ yayını.
- Bhattacharya, P.K., and Patra, H.P. 1968.** Direct current geoelectric sounding. Elsevier Publishing Company (Amsterdam-London-New York).
- Barnet, C.T. 1972.** Theoretical modeling of induced polarization due to arbitrarily shaped bodies. Ph.D. dissertation, Colorado School of Mines.
- Barker, R.D. 1979.** Signal contribution section and their use in resistivity studies. *Geophysics*. J.R.Astr. Soc., 59: p.123-129.
- Barker, R.D. 1981.** The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. G.P., 29: p.128-143.
- Başokur, A.T. 1984.** Düşey elektrik sondajı, TPAO.
- Başokur, A.T. 1994.** Definitions of apparent resistivity for the presentation of magnetotelluric sounding data. G.P., 42(2):141-150.
- Bernabini, M., Brizzolari, E., and Mazzola, C. 1987.** Anomalies due to resistive parallelepiped bodies in resistivity profile. *Bollettino Geofisica Teorica Ed Applicata*, XXIX (114).
- Bernabini, M., Brizzolari, E., and Piro, S., 1988.** Improvement of signal to noise ratio in resistivity profiles. G.P., v. 36, p. 559-570.
- Bhattacharya, P.K. and Patra, H.P. 1968.** Direct current geoelectric sounding principles and interpretation. Elsevier Publishing Company (Amsterdam-London-New York).
- Brizzolari, E. and Bernabini, M. 1979.** Comparison between Schlumberger electrode

- arrangement and some focused electrode arrangements in resistivity profiles. *G.P.*, 27: p.233-244.
- Brizzolari E., Samir, A., Orlando L., Piro, S., and Versino, L. 1989.** Filtering and crosscorrelating of resistivity profiles. *Boll. Teor.Appl.*,16(123-124):245-257.
- Brizzolari E., Ermolli, F., Orlando, L., Piro, S., and Versino, L. 1992.** Integrated geophysical methods in archaeological surveys. *Journal of Applied Geophysics*, 29(1):47-55.
- Candansayar, M.E. 1996.** Doğru akım öz direnç verilerinin 2-B modellemesinde kullanılan sonlu elemanlar ve sonlu farklar sayısal çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması ve sinyal katkı kesiti. *Seminer (AÜFF)*, yayımlanmamış.
- Carpenter, E.W., and Habberjam, G.M. 1956.** A tri-potential method of resistivity prospecting. *G.*, 21(2):153-169.
- Coggon, J.H. 1971.** Electromagnetic and Electrical Modeling by the Finite Element Method. *G.*, 36: p.132-155.
- Coggon, J.H. 1973.** A comparison of IP electrode arrays. *G.*, 38(4):737-761.
- Dey, A. 1976.** RESIS2D Fortran program for two-dimensional finite different modeling. Univ.of California, Berkeley.
- Dey, A. and Morrison, H.F. 1979a.** Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional, *G.P.*, v.27, p.106-136.
- Dey, A. and Morrison, H.F. 1979b.** Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional, *G.*, 44(4): 753-780.
- Dieter, K., Paterson, N.R., and Grant, F.S., 1969.** IP and resistivity type curves for three-dimensional bodies. *G.*, v.34, p.615-632.
- Dittmer, J. K., and Szymanski, J. E. 1993.** Forward modeling of resistive two-dimensional features using the finite element method. *Geophysical Exploration of Archaeological Sites Book*, Vieweg published.
- Eskola, L., 1992.** Geophysical interpretation using integral equations. ???
- Fenner R.T., 1975.** Finite element methods for engineers. Lecturer in Mechanical Engineering, Imperial Collage of Science and Technology, London.
- Griffiths, D.H., Turnbull, J., and Olayinka, A.I. 1990.** Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break* 8(4):121-129.
- Grandinetti, M. 1967.** Una nuova disposizione elettrodica per la ricerca di corpi di limitate

- dimensni. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 9 (35).
- Hohmann, G.W., 1976.** Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. *G.*, 40(2): 309-324.
- Jepsen, A.F., 1969.** Numerical modeling in resistivity prospecting. Pd.D. thesis, University of California, Berkley.
- Hallof, P.G. 1957.** On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. PhD. Thesis, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, USA.
- Karous, M. and Pernu, T.K. 1984.** Combined sounding profiling resistivity measurements with the three-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 33, p.447-459.
- Koefoed, O. 1979.** Geosounding principles 1. Resistivity sounding measurements. Vol. 14A in *Methods in Geochemistry and Geophysics*, Elsevier, Amsterdam.
- König, D. 1950.** Theorie der endlichen und unendlichen Graphen. New York, Chelsea Publishing Co.
- Meyer, W.H., 1976.** Computer modeling of electromagnetic prospecting methods. Ph.D. dissertation, Univ. of California, Berkley.
- Molano, C.E., Salamanca, M., and Van Overmeeren, R.A. 1990.** Numerical modeling of standard and continuous vertical electrical sounding. *Geophysical Prospecting*, 38: p. 705-718.
- Mufti, I.R. 1976.** Finite difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 41(1): p.62-78.
- Mufti, I.R. 1980.** Finite-difference evaluation of resistivity curves. *G.P.*, 28: p.146-166.
- Martin, R.S. 1965.** Symmetric decomposition of positive definite and matrices, *Numer. Math.*, 7: p.355.
- Orlando, L., Piro, S., and Versino, V., 1987.** Location of sub-surface geoelectric anomalies for archaeological work: a comparison between experimental arrays and interpretation using numerical methods. *Geoexploration*, v. 24, p. 227-237.
- Pekşen, E. 1996.** Arkeolojik cisimlerin iki-boyutlu öz direnç yöntemi ile araştırılması. Rapor (yayımlanmamış).
- Pelton H.W., Rijo, L., and Swift. Jr.C.M. 1978.** Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data. *G.*, 43(4):788-803.
- Petrov, A. A. 1995.** Volume integral equation for computation of potential electric fields in

- two-dimensional models. *Physics of The Solid Earth*, 30 (11).
- Pratt, D.A., 1972.** The surface integral approach to the solution of the 3D resistivity problem. *ASEG Bull*, v.3, p.30-50.
- Pridmore, D.F., 1978.** Three-dimensional modeling of electric and electromagnetic data using the finite-element. Ph.D. dissertation, Univ. of Utah, Utah.
- Pridmore, D.F., Hohmann, G.W., Ward, S.H., and Sill W.R. 1981.** An investigation of finite element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions. *Geophysics*, 46 (7): 1009-1024
- Qian, A., and Boerner, D.E. 1994.** Electromagnetic response of a discretely grounded circuit-an integral equation solution. *G.*,59(11):1680-1694.
- Queralt, P., Pous, J., Marcuello, A., 1991.** 2-D resistivity modeling: An approach to arrays parallel to the strike direction. *G.* 56(7):941-950.
- Rijo, L., 1977.** Modeling of electric and electromagnetic data. Ph.D. thesis, University of Utah, Utah.
- Roy, A. and Apparao, A. 1971.** Depth of investigation in direct current methods, *G.*, 36: p.943-959.
- Sasaki, Y. 1989.** Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole data. *G.*, 54 (2).
- Sasaki, Y. 1989.** Automatic Interpretation of resistivity sounding data over two-dimensional structures (I). *Butsuri-Tanko (Geophysical Exploration)*, 34(5):15-24.
- Sasaki, Y. 1989.** Automatic Interpretation of resistivity sounding data over two-dimensional structures (II). *Butsuri-Tanko (Geophysical Exploration)*, 34(6):24-36.
- Schulz, R. 1985.** Interpretation and depth of investigation of Gradient Measurements in direct current geoelectrics. *G.P.*, 33: p.1240-1253.
- Shima, H. 1990.** Two-dimensional automatic resistivity inversion technique using alpha centers. *G.*, 55(6):682-694.
- Smith, G. D. 1965.** Numerical solution of partial differential equations. New York, Oxford Univ. Press.
- Stefanescu S., and Stefanescu D., 1974.** Mathematical models of conducting ore bodies for direct current electrical prospecting. *GP.*,v. 22,p.246-260.

- Tsokas, N.G., and Tsourlos, P.I., 1997.** Transformation of the resistivity anomalies from archaeological sites by inversion filtering. *G.*, 62(1): 36-43.
- Uchida, T. 1991.** Two-dimensional resistivity inversion for Schlumberger sounding, *Butsuri-Tansa*, 44 (1): 1-17.
- Van Nostrand, R. G., and Cook, K. L. 1966.** Interpretation of resistivity data: USGS Prof. paper 449, Washington, D.C., U.S. Govt. Printing Office.
- van Overmeeren, R.A., and Ritsema, I.L. 1988.** Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6(10):313-324.
Prof. paper 449, Washington, D.C., U.S. Govt. Printing Office.
- Varga, R. S. 1962.** Matrix iterative analysis: Englewood Cliffs. Prentice-Hall, Inc.
- Young, D. 1954.** Iterative methods for solving partial difference equations of elliptic type: *Trans. Am. Math. Soc.*, v.76, p. 92-111.
- Zhao, S., and Yedlin M., 1996.** Some refinements of the finite-difference method for 3-D dc resistivity modeling. *G.*, 61(5):1301-1307.
- Zhdanov, M.Z., and Keller G.V., 1994.** The geoelectrical methods in geophysical exploration. Elsevier published, Amsterdam-London-NewYork-Tokyo.
- Zienkiewicz, O.C. and Cheung, Y.K. 1965.** Finite elements in the solution of field problems. *The Engineer*, vol. 220, p.507-510.
-1967. The finite element method in structural and continuum mechanics. McGraw-Hill, London.
- Zienkiewicz, O.C. 1971.** The finite element method in engineering science, McGraw-Hill, London.

EKLER

EK-A. Sınırlarda bağlantı katsayılarının hesaplanması.

a. Yüzeyde Sınır Koşulu

Şekil 2. de gösterilen şekilden görüleceği gibi, yüzey için $\Delta A_{i,j}$ alanı L konturu boyunca 3,4,5 ve 6 için uygulanır. (i,1) $i=2,3,\dots,N-1$ düğüm noktalarına bu sınır koşulu uygulanır. Bu durumda sonlu fark denklemleri ve bağlantı katsayıları

$$C_L^{ij} \tilde{\phi}_{i-1,j} + C_R^{ij} \tilde{\phi}_{i+1,j} + C_B^{ij} \tilde{\phi}_{i,j+1} + C_P^{ij} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s)$$

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i-1,j}}{2\Delta x_{i-1}} \right]$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i,j}}{2\Delta x_i} \right]$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j} + \Delta x_i \cdot \sigma_{i,j}}{2\Delta z_j} \right]$$

$$A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) = k_y^2 \left[\frac{\sigma_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_j}{4} + \frac{\sigma_{i,j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_j}{4} \right]$$

$$C_P^{ij} = - \left[C_L^{ij} + C_R^{ij} + C_B^{ij} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right]$$

olur.

b. Yüzeyde Sağ ve Sol Köşeler için Sınır Koşulu

Bu sınır koşulunda Şekil 3.2.2.2. de görüleceği gibi $\Delta A_{i,j}$ alanı L konturu boyunca (1,1) düğüm noktası için 3 ve 4 boyunca, (N,1) için 5 ve 6 konturu boyunca uygulanır.

J akım yoğunluğunun z yönündeki bileşeni Neumann sınır koşulu gereğince sıfırdır. Bu durumda akım yoğunluğunun x yönündeki bileşeni karışık sınır koşuluyla

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} + \alpha \tilde{\phi} \cos \theta = 0, \quad \alpha = \frac{k_y K_1(k_y \cdot r)}{K_0(k_y \cdot r)}$$

şeklinde yazılır. θ , (i, j) noktası ile kaynak noktası arasındaki dik uzaklık r ile dışa doğru normal vektörü arasındaki açıdır. Sonlu fark denklemi ve bağlantı katsayıları yüzeyde sol üst köşe için

$$C_B^{ij} \tilde{\phi}_{i,j+1} + C_R^{ij} \tilde{\phi}_{i+1,j} + C_P^{ij} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s)$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_i \cdot \sigma_{i,j}}{2 \Delta z_j} \right]$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i,j}}{2 \Delta x_i} \right]$$

$$A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) = k_y^2 \left[\frac{\sigma_{i,j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_j}{4} \right]$$

$$C_P^{ij} = - \left[C_B^{ij} + C_R^{ij} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right] + \frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i,j} \cdot \alpha \cos \theta}{2}$$

ile verilir. Benzer şekilde yüzeyde sağ üst köşe için bu ifadeler

$$C_L^{ij} \tilde{\phi}_{i-1,j} + C_B^{ij} \tilde{\phi}_{i,j+1} + C_P^{ij} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s)$$

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i-1,j}}{2 \Delta x_{i-1}} \right]$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j}}{2\Delta z_j} \right]$$

$$A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) = k_y^2 \left[\frac{\sigma_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_j}{4} \right]$$

$$C_P^{ij} = - \left[C_L^{ij} + C_B^{ij} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right] + \frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i-1,j} \cdot \alpha \cos \theta}{2}$$

şeklinde olur.

c. Model Tabanında Sınır Koşulu

(i,M) düğümlerinde $i=2,3,\dots,N-1$ olmak üzere $\Delta A_{i,j}$ alanında L konturu boyunca 1,2, 7 ve 8 noktalarında (Şekil 2.) sonlu fark denklemi ve bağlantı katsayıları

$$C_L^{ij} \tilde{\phi}_{i-1,j} + C_R^{ij} \tilde{\phi}_{i+1,j} + C_T^{ij} \tilde{\phi}_{i,j-1} + C_P^{ij} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s)$$

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1}}{2\Delta x_{i-1}} \right]$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i,j-1}}{2\Delta x_i} \right]$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1} + \Delta x_i \cdot \sigma_{i,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right]$$

$$A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) = k_y^2 \left[\frac{\sigma_{i-1,j-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\sigma_{i,j-1} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_{j-1}}{4} \right]$$

$$C_P^{ij} = - \left[C_L^{ij} + C_R^{ij} + C_T^{ij} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right] + \left(\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1} + \Delta x_i \cdot \sigma_{i,j-1}}{2} \right) \alpha \cos \theta$$

şeklinde verilir.

d. Model Tabanında Sol ve Sağ Köşelerde Sınır Koşulu

Bu sınır koşulu $\Delta A_{i,j}$ alanın L konturunun 1,2 bölümüne (1,M) düğümü için, 7 ve 8 bölgelerine (N,M) düğümü için uygulanır. Bu durumda (1,M) düğümü için sonlu fark denklemleri ve bağlantı katsayıları

$$C_R^{ij} \tilde{\phi}_{i+1,j} + C_T^{ij} \tilde{\phi}_{i,j-1} + C_P^{ij} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s)$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i,j-1}}{2\Delta x_i} \right]$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_i \cdot \sigma_{i,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right]$$

$$A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) = k_y^2 \left[\frac{\sigma_{i,j-1} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_{j-1}}{4} \right]$$

$$C_P^{ij} = - \left[C_R^{ij} + C_T^{ij} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right] + \frac{\Delta x_i \cdot \sigma_{i,j-1} \cdot \alpha \cos \theta_1}{2} + \frac{\Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i,j-1} \cdot \alpha \cos \theta_2}{2}$$

şeklinde olur. Benzer uygulama (N,M) noktası için yapılırsa,

$$C_L^{ij} \tilde{\phi}_{i-1,j} + C_T^{ij} \tilde{\phi}_{i,j-1} + C_P^{ij} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s)$$

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1}}{2\Delta x_{i-1}} \right]$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right]$$

$$A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) = k_y^2 \left[\frac{\sigma_{i-1,j-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{4} \right]$$

$$C_P^{ij} = - \left[C_L^{ij} + C_T^{ij} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right] + \frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1} \cdot \alpha \cos \theta_1}{2} + \frac{\Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1} \cdot \alpha \cos \theta_2}{2}$$

bulunur. Burada θ_1 ve θ_2 açıları (i, j) noktasının akım kaynağına olan dik uzaklık ile sırasıyla x ve z yönlerinde yaptığı açıdır.

e. Modelin Sol Kenarlarında Sınır Koşulu

(1, j) düğümlerinde j=2,3,...,M-1 noktalarında $\Delta A_{i,j}$ alanı çevreleyen L konturunun 1,2,3 ve 4 kısımları boyunca sınır koşulu uygulandığında sonlu fark denklemleri ve bağlantı katsayıları

$$C_R^{ij} \tilde{\phi}_{i+1,j} + C_T^{ij} \tilde{\phi}_{i,j-1} + C_B^{ij} \tilde{\phi}_{i,j+1} + C_P^{ij} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s)$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i,j} + \Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i,j-1}}{2 \Delta x_i} \right]$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_i \cdot \sigma_{i,j-1}}{2 \Delta z_{j-1}} \right]$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_i \cdot \sigma_{i,j}}{2 \Delta z_j} \right]$$

$$A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) = k_y^2 \left[\frac{\sigma_{i,j-1} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\sigma_{i,j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_j}{4} \right]$$

$$C_P^{ij} = - \left[C_R^{ij} + C_T^{ij} + C_B^{ij} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right] + \left(\frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i,j} + \Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i,j-1}}{2} \right) \alpha \cos \theta$$

biçiminde olur.

f. Modelin Sağ Kenarında Sınır Koşulu

(N, j) düğümlerinde $j=2,3,\dots,M-1$ olmak üzere $\Delta A_{i,j}$ alanında L konturu boyunca 5,6,7 ve 8 bölgelerine bu sınır koşulu uygulanırsa, sonlu fark denklemleri ve bağlantı katsayıları

$$C_L^{\ddot{u}} \tilde{\phi}_{i-1,j} + C_T^{\ddot{u}} \tilde{\phi}_{i,j-1} + C_B^{\ddot{u}} \tilde{\phi}_{i,j+1} + C_P^{\ddot{u}} \tilde{\phi}_{i,j} = \frac{I}{2} \delta(x_s) \delta(z_s)$$

$$C_L^{\ddot{u}} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i-1,j} + \Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1}}{2\Delta x_{i-1}} \right]$$

$$C_T^{\ddot{u}} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right]$$

$$C_B^{\ddot{u}} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \sigma_{i-1,j}}{2\Delta z_j} \right]$$

$$A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) = k_y^2 \left[\frac{\sigma_{i-1,j-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\sigma_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_j}{4} \right]$$

$$C_P^{\ddot{u}} = - \left[C_L^{\ddot{u}} + C_T^{\ddot{u}} + C_B^{\ddot{u}} - A(\sigma_{i,j}, A_{i,j}) \right] + \left(\frac{\Delta z_j \cdot \sigma_{i-1,j} + \Delta z_{j-1} \cdot \sigma_{i-1,j-1}}{2} \right) \alpha \cos \theta$$

biçiminde olur.

EK-B.

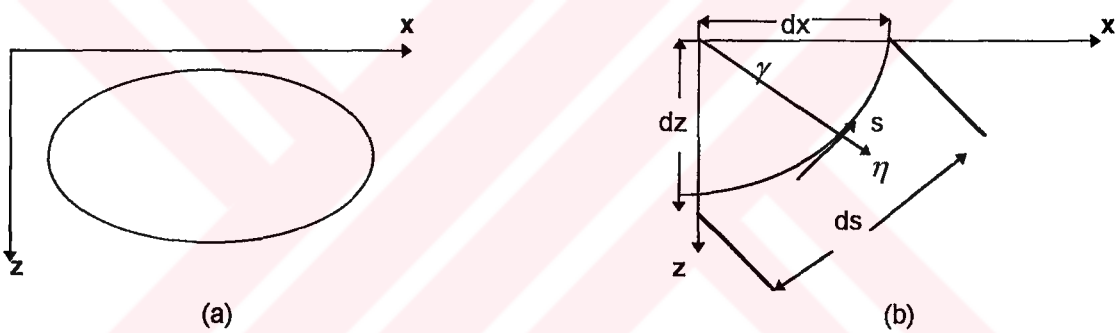
Kısalık açısından aşağıdaki bağıntılarda,

$$\tilde{\phi} = \tilde{\phi}(x, k_y, z) \text{ ve } \sigma = \sigma(x, z)$$

yazılacaktır. Gerilimin dış doğru normal vektörü ile türevini (2.4.4) denklemi ile çarparsak

$$F(\tilde{\phi}) \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} = \sigma \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} k_y^2 \tilde{\phi} + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} I \delta(x - x_s) \delta(z) = 0 \quad (\text{Ek-B.1})$$

elde edilir (Şekil B.1). Burada η , akım yoğunluğunun dış doğru normalidir.



Şekil B.1. Tanımlanan alan (a), Tanımlanan alanın bir kesiti (b) (Fenner 1975).

Çözüm bölgesi içinde denklem (Ek-B.1) in integrali sıfırdır.

$$\chi = \iint F(\tilde{\phi}) \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} dx dz = \iint \left[\sigma \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} k_y^2 \tilde{\phi} + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} I \delta(x - x_s) \delta(z) \right] dx dz = 0 \quad (\text{Ek-B.2})$$

Burada, χ , bilinmeyen $\tilde{\phi}(x, k_y, z)$ ye bağlı fonksiyonel olarak bilinir. Bu denklemde ikinci dereceden türevler hesaplama zorluğundan dolayı birinci dereceden türevlere dönüştürülürler;

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} \right] - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right] - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right)^2 \right]$$

ve

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} k_y^2 \tilde{\phi} = k_y^2 \tilde{\phi}^2$$

özellikleri(Ek-B.2) de yerine konursa

$$\iint \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} \right)^2 + k_y^2 \tilde{\phi}^2 + \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right)^2 \right] + \tilde{\phi} I \delta(x - x_s) \delta(z) \right\} dx dz - A = 0 \quad (\text{Ek-B.3})$$

elde edilir. Burada,

$$A = \iint \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right) \right] dx dz \quad (\text{Ek-B.4})$$

dir. Bu eşitliğe Green teoremi uygulanırsa,

$$A = \oint \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} \partial z + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} dx \right) \quad (\text{Ek-B.5})$$

bulunur. Yukardaki çizgi integrali, çözüm bölgesinde sınır etrafında saatin tersi yönünde çözülür.

Şekil B-1.b' de görüldüğü gibi γ , x eksenine ile normal vektör arasındaki açı olmak üzere,

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} = \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} \cos \gamma + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \sin \gamma$$

yazılabilir. γ' nün sinüs ve cosinüsü ise

$$\cos \gamma = \frac{\partial z}{\partial s}, \quad \sin \gamma = -\frac{\partial x}{\partial s}$$

şeklinde bulunur. Burada s , saatin tersi yönünde sınır boyunca ölçülen mesafe ve negatif işaret $\sin \gamma$ yü tanımlamak içindir. x artarken s azalır (Fenner, 1975). Yukardaki denklemler kullanılarak,

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} ds = \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} dz - \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} dx \quad (\text{Ek-B.6})$$

elde edilir. Bu eşitlik (Ek-B.5) de yerine konursa,

$$A = \oint \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial \eta} ds \quad (\text{Ek-B.7})$$

bulunur. η normalinin veya ϕ nin η ye göre birinci türevinin yeryüzü sınırında sıfır olması sınır koşulunu kullanarak $A=0$ yazılabilir. Buna göre η ye bağlı fonksiyonel bağıntısı (Ek-B.3) den

$$\chi = \frac{1}{2} \iint \left\{ \sigma \left[\left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} \right)^2 + k_y^2 \tilde{\phi}^2 + \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right)^2 \right] + 2I \delta(x - x_s) \delta(z) \tilde{\phi} \right\} dx dz \quad (\text{Ek-B.6})$$

şeklinde bulunabilir.

EK-C.

N_i , N_j ve N_k şekil fonksiyonları için aşağıdaki özellikler yazılabilir (Zienciewicz, 1971).

$$\iint_{\Delta} N_i^l N_j^m N_k^n dx dz = 2\Delta \cdot \frac{l!m!n!}{(l+m+n+2)!}$$

$$\iint_{\Delta} N_i^2 dx dz = \iint_{\Delta} N_j^2 dx dz = \iint_{\Delta} N_k^2 dx dz = \frac{\Delta}{6}$$

$$\iint_{\Delta} N_i N_j dx dz = \iint_{\Delta} N_j N_k dx dz = \iint_{\Delta} N_i N_k dx dz = \frac{\Delta}{12}$$

$$\iint_{\Delta} I_{\Delta} \delta(x) \delta(z) dx dz = I_{\Delta}$$

$$\iint_{\Delta} I_{\Delta} \delta(x) \delta(z) x dx dz = \iint_{\Delta} I_{\Delta} \delta(x) \delta(z) z dx dz = 0$$

EK-D

Sırasıyla 1, 2, ..., 8 elemanlarının, sonlu elemanlar ağı için yazılan global denklem takımına katkısı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{array}{c}
 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \quad 9 \\
 \left[\begin{array}{cccccccc|c}
 k_{11}^1 & k_{12}^1 & 0 & k_{13}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 k_{21}^1 & k_{22}^1 & 0 & k_{23}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 k_{31}^1 & k_{32}^1 & 0 & k_{33}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right] \begin{array}{c} \phi_1^1 \\ \phi_2^1 \\ 0 \\ \phi_3^1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} = \begin{array}{c} s_1^1 \\ s_2^1 \\ 0 \\ s_3^1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}
 \end{array}$$

2. elemanın katkısı,

$$\begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{cccccccc|c}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{11}^2 & 0 & k_{13}^2 & k_{12}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{31}^2 & 0 & k_{33}^2 & k_{32}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{21}^2 & 0 & k_{23}^2 & k_{22}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right] \begin{array}{c} 0 \\ \phi_1^2 \\ \phi_2^2 \\ 0 \\ \phi_3^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} = \begin{array}{c} 0 \\ s_1^2 \\ s_2^2 \\ 0 \\ s_3^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}
 \end{array}$$

3. elemanın katkısı,

$$\begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{cccccccc|c}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{11}^3 & k_{12}^3 & 0 & k_{13}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{21}^3 & k_{22}^3 & 0 & k_{23}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{31}^3 & k_{32}^3 & 0 & k_{33}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right] \begin{array}{c} 0 \\ \phi_1^3 \\ \phi_2^3 \\ 0 \\ \phi_3^3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} = \begin{array}{c} 0 \\ s_1^3 \\ s_2^3 \\ 0 \\ s_3^3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}
 \end{array}$$

4. elemanın katkısı,

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k^4_{11} & 0 & k^4_{13} & k^4_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k^4_{31} & 0 & k^4_{33} & k^4_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k^4_{21} & 0 & k^4_{23} & k^4_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi_1^4 \\ 0 \\ \phi_3^4 \\ \phi_2^4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_1^4 \\ 0 \\ s_3^4 \\ s_2^4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

5. elemanın katkısı

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k^5_{11} & k^5_{12} & 0 & k^5_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k^5_{21} & k^5_{22} & 0 & k^5_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k^5_{31} & k^5_{32} & 0 & k^5_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \phi_1^5 \\ \phi_2^5 \\ 0 \\ \phi_3^5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ s_1^5 \\ s_2^5 \\ 0 \\ s_3^5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

6. elemanın katkısı

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k^6_{11} & 0 & k^6_{13} & k^6_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k^6_{31} & 0 & k^6_{33} & k^6_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k^6_{21} & 0 & k^6_{23} & k^6_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \phi_1^6 \\ 0 \\ \phi_3^6 \\ \phi_2^6 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ s_1^6 \\ 0 \\ s_3^6 \\ s_2^6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

7. elemanın katkısı

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & k_{11}^7 & k_{12}^7 & 0 & k_{13}^7 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & k_{21}^7 & k_{22}^7 & 0 & k_{23}^7 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & k_{31}^7 & k_{32}^7 & 0 & k_{33}^7 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \phi_1^7 \\
 \phi_2^7 \\
 \phi_3^7 \\
 0
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 s_1^7 \\
 s_2^7 \\
 s_3^7 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

8. elemanın katkısı

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{11}^8 & 0 & k_{13}^8 & k_{12}^8 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{31}^8 & 0 & k_{33}^8 & k_{32}^8 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{21}^8 & 0 & k_{23}^8 & k_{22}^8
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \phi_1^8 \\
 \phi_3^8 \\
 \phi_2^8
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 s_1^8 \\
 s_3^8 \\
 s_2^8
 \end{bmatrix}$$

Ek-E. C programlama dilinde yazılmış analitik çözüm yapan program.

```

/*****
/* Filename: analitik.cpp
/* Yazan : Mehmet Emin CANDANSAYAR
/* Aciklama: Fay modeli icin analitik olarak Gorunur
/* Ozdirenc hesaplar (IYUE dizilimi icin)
/* Sonuclari Stanford Grafics'te yapma kesit
/* cizecek sekilde bir dosyaya yazdirir.
/* Program toplam 9 istasyonda ve 6 AB/2
/* seviyesinda GO hesaplar.
*****/

#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <io.h>
float r,r1,rmin;
float ab,ab1,mn,yer,n;
float k,kayma,ro1,ro2;
float goa[10][10];
int olcs,i,j,l;
char ccv;
char *dosya;
FILE *out;

//
/*****MAIN*****/
main()
{
clrscr();
printf("Bu program yarim-Schlumberger elektrod dizilimi ile");
printf("\nfay modeli icin analitik olarak Gorunur Ozdirenc");
printf("\ndegerleri hesaplar. \n");

printf("\n MN uzakligini giriniz: ");
scanf("%f",&mn);

printf("\n AB/2 uzakligini giriniz: ");
scanf("%f",&ab1);
ab = ab1 * 2;

printf("\n Kayma miktarini giriniz: ");
scanf("%f",&kayma);

rmin=ab+mn;
printf("\n A akim elektrodu ile fay sureksizligi");
printf("\n arasindaki uzakligi giriniz ");
printf("\n r > %4.1f olmalı: ",rmin);
scanf("%f",&r);

printf("\n ro1 ve ro2 ozdirenc degerlerini giriniz: ");
scanf("%f %f",&ro1,&ro2);

k=(ro2-ro1)/(ro2+ro1);

printf("\n Sonuclarin Yazilacagi dosya ismini giriniz: ");
scanf("%s",dosya);

```

```

/* *****Hesap Bölümü ***** */
for (i = 0 ; i < 6; i++)
{
    yer = 0.5;
    r1 = r + i * kayma;

    for (j = 0 ; j < 9 ; j++)
    {
        if (r1 > ((ab+mn)/2) ) // 1. Durum
        goa[i][j] = ro1 * (1-((k*(ab*ab-mn*mn)/((4*r1-ab+mn)*(4*r1-ab-mn)))));
        else if (r1 > ((ab-mn)/2) && r1 < ((ab+mn)/2) ) // 2. Durum
        goa[i][j] = ro1 * (1+((k*(2*ab-4*r1) / ((4*r1-ab+mn)*(ab+mn)))));

        else if (r1 < ((ab-mn)/2) && r1 > 0 ) // 3. Durum
        goa[i][j] = ro1 * (1 + k);

        else if (r1 < 0 ) // 4. Durum
        {
            r1=-r1;
            goa[i][j] = ro2 * (1-((k*(ab*ab-mn*mn) / ((4*r1+ab+mn)*(4*r1+ab-mn)))));
            r1=-r1;
        };

        r1 = r1 - kayma;
        yer = yer + kayma;

    }; // end for j
    ab = (ab / 2 + kayma) * 2;
}; // end for i

/* *****Yazdirma Bolumu ***** */
/* Sonuclari Stanford Graphics isimli grafik programinin okuyacagi formatta
bir dosyaya yazar */
out = fopen(dosya,"wr");
fprintf(out,"%10.2f\n",r);

for (i = 0 ; i < 6; i++)
{
    fprintf(out," %10.2f",-ab1);
    ab1=ab1+kayma;
}; // end for i
    fprintf(out," \n");
for (j = 0 ; j < 9; j++)
{
    fprintf(out," %2i",j);

for (i = 0 ; i < 6; i++)
{
    fprintf(out," %10.2f",goa[i][j]);
}; // end for i
    fprintf(out," \n");
}; // end for j

fclose(out);
return(0);
}
/* *****bitti***** */

```

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Elbistan' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara' da tamamladı. 1990 yılında girdiği Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümün' den 1994 yılı Haziran ayında Jeofizik Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı' nda Yüksek Lisans Öğrenimine başladı.

1991 yılından beri Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı' nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

