

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİK VERİLERİNİN LAMARCKIAN GENETİK ALGORITMA İLE TERS-ÇÖZÜMÜ

Irfan AKCA

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet T. BASOKUR

Jeofizikte ters-çözümün amacı, uygulanan bir yöntem ile toplanan verilerden yola çıkılarak belirli bir fiziksel parametrenin yer içindeki dağılımın belirlenmesidir. Jeofizik verilerin ters çözümü, bir başlangıç modelinin yinelemeli olarak iyileştirilmesi yoluyla yürütülür. Parametre düzeltme yöneyi, kuramsal verinin parametrelere göre kısmi türevlerinden faydalanılarak hesaplanır. Türeve dayalı ters-çözüm algoritmalarının, problemin kötü-durumlu olması, düzey tersleme işlemlerindeki sorunlar, verinin gürültü içeriği ve ön-kestirim modelinin problemin çözümü civarında olmaması gibi durumlardan kaynaklanan zayıf yönleri bulunmaktadır. Sayılan sorunlarının giderilmesi için çeşitli düzgünleyici ve duraganlastiricilar önerilmiş olmasına karşın, türeve dayalı ters-çözüm algoritmaları hata enerjisi haritasında en yakın minimuma yönlendirilmektedir. Türeve dayalı ters-çözüm algoritmalarının sayılan zayıf yönlerinden dolayı, problemlerin çözümü için global arama yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerden biri olan genetik algoritma, canlılardaki genetik kalıtım sürecinin benzesimi ile geliştirilmiştir. Basit genetik algoritma, problemin çözümünü, tanımlanan bir parametre uzayında rastgele arama yöntemi ile bulmaya çalışır. Problemin global çözümünün bulunması olasılığı türeve dayalı yöntemlere göre daha yüksektir. Bununla birlikte, ölçülen ve kuramsal veriler arasında kabul edilebilir bir çakışmanın sağlanması için genetik algoritma oldukça fazla hesaplama zamanı gerektirir. Hesaplama zamanının azaltılması amacıyla, genetik algoritma ve türeve dayalı yöntemlerin ardisik ya da birlesik kullanıldığı çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu tez kapsamında hesaplama zamanının azaltılması amacıyla "Lamarckian Genetik Algoritma" adı verilen yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Lamarckian genetik algoritmada, basit genetik algoritma ve türeve dayalı ters-çözüm yöntemleri bir arada kullanılmaktadır. Gelistirilen algoritma elektrik verilerinin 2-B ters-çözümünde denenmiştir. Algoritmanın davranışı kuramsal bir örnek ve 2-B elektrik verilerinin ters-çözümü için çeşitli örneklerle ortaya konmaya çalışılmıştır.

2005, 81 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Genetik algoritma, Lamarckian genetik algoritma, Dogru akim özdiirenc, 2-B modelleme, 2-B ters-çözüm

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVERSION OF ELECTRICAL DATA BY THE LAMARCKIAN GENETIC ALGORITHM.

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

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet T. BASOKUR

The purpose of the inversion algorithms is to derive the subsurface distribution of a certain type physical parameter that causes the variation of applied geophysical fields. The inversion of geophysical data is carried out by updating an initial model supplied by the interpreter in an iterative manner. The parameter updating vector is computed from the partial derivatives of parameters with respect to theoretical data. The derivative based (DB) inversion schemes have some drawbacks arising from ill-posed nature of the problem, the success of matrix manipulations, the noise contamination of data and closeness of initial model to the solution. Although some precautions were suggested for the regularization of inversion schemes, the DB based methods find a solution around nearest minimum instead of the global one. Because of the above mentioned drawbacks of DB methods, a number of methods are suggested. One of these methods is genetic algorithm (GA) that simulates the biological inheritance process. The simple GA and some hybrid algorithms perform random search to find a solution inside a predefined parameter space. The possibility of locating the global minimum by GA algorithm is higher than that of the derivative based methods. However, the GA requires more computation time to obtain a reasonable fit between measured and theoretical data. For this reason, some algorithms that use the joint and sequential use of simple GA and derivative based methods are suggested to reduce the computation time. This thesis deals with a new algorithm referred as "Lamarckian genetic algorithm (LGA)". LGA is an algorithm that uses GA and DB methods simultaneously. Algorithm is tested on 2-D inversion of electric imaging data. Behaviour of new scheme is discussed in the view of reduction of misfit versus proceeding generations.

2005, 81 pages

Keywords: Genetic algorithm, Lamarckian genetic algorithm, Direct current resistivity method, 2-D modeling, 2-D inversion

TESEKKÜR

Yeni bir bilgi üretebilmek, üretilen bilgiyi layığıyla sunabilmek kimi zaman oldukça zor ve yorucu olabiliyor. Bu zorluk ve yorgunluğu göze alarak yola çıkanların harcadıkları emegin karşılığını eninde sonunda alabileceğine inanan biriyim. Ancak, yorulduğunuzda zorlandığınızda, yanınızda, yakınınızda birini ya da birilerini görebilmek duygusu, zor süreçleri kolay hale getiriyor. Bu vesileyle, çalışmam boyunca yanımda olan insanlara teşekkür etmek isterim.

Yaklaşık 3 yıl süren tez çalışmam boyunca, mesleki bilgi ve tecrübe birikimini benimle paylaşan, kişiliği ve ilkelerini örnek alarak uygulamaya çalıştığım değerli danışman hocam Prof. Dr. Ahmet T. BASOKUR'a, siktistigim her konuda kapisini çaldığım ve bir kere bile geri çevrilmediğim odanın sahibi değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Emin U. Ulugergerli'ye ve deneyim ve önerilerini benimle paylaşan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Emin Candansayar'a, gerek tez çalışmam gerekse günlük yaşamın getirdiği sevinci, hüznü güzel ya da kötü yaşadığımız çok şeyi paylaştığımız değerli mesai arkadaşlarım, Ars. Gör. Yıldırım Gündoğdu ve Ars. Gör. Begüm Koca'ya, çalışmamın son döneminde enerjimi tükenmek üzereyken sevgisini yanımda hissederek güç aldığım Cemile Öztürk'e, bundan önceki eğitim hayatımda ve bu çalışma süresince bende en büyük emegin sahibi değerli ailemin üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Irfan AKCA
Ankara, Temmuz 2005

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TESEKKÜR	iii
SIMGELER DIZINI	v
SEKİLLER DIZINI	vi
ÇİZELGELER DIZINI.....	ix
1. GIRIS	1
1.1 Tezin Amacı	4
2. BASIT GENETİK ALGORITMA	5
2.1 Basit Genetik Algoritma ile Parametre Kestirimi	7
2.1.1 Kodlama	9
2.1.2 Seçilim.....	10
2.1.3 Çaprazlama.....	12
2.1.4 Mutasyon.....	13
2.2 Algoritmanın Başarisini Etkileyen Etmenler.....	13
2.2.1 Nesil Sayisi.....	14
2.2.2 Topluluk Büyüklüğü.....	15
2.2.3 Çaprazlama Olasılığı	16
2.2.4 Kromozom Uzunluğu	17
3. LAMARCKIAN GENETİK ALGORITMA	19
4. DOGRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİNDE MODELLEME	26
4.1 DAÖ Yönteminde İki-Boyutlu Düz Çözüm	27
4.2 DAÖ Yönteminde İki-Boyutlu Düz Çözüm Probleminin Ayriklaştırılması	28
4.2.1 Modelin Parametreleştirilmesi	28
4.2.2 Sonlu-farklar Ağı	32
4.2.3 Doğrusal denklem sisteminin çözümü.....	35
4.2.4. Dönüşük Gerilimin Ters Fourier Dönüşümü ile Gerilime Dönüştürülmesi	37
4.2.5 Görünür Özdirenç Yapma-kesitinin Elde Edilmesi	38
4.2.6 Gelistirilen Modelleme Yazılımının Denenmesi	39
5. DOGRUSAL OLMAYAN PROBLEMLERİN TERS-ÇÖZÜMÜ	42
5.1 DAÖ Verilerinin 2-B Sönümlü En-küçük Kareler Ters-çözümü	45
5.1.1 Kısmi Türevler Dizeyinin Hesaplanması	46
6. DAÖ VERİLERİNİN LGA İLE 2-B TERS-ÇÖZÜMÜ	51
6.1 Uygulamalar	53
6.1.1 Model 1	55
6.1.2 Model 2	57
6.1.3 Model 3	59
6.1.4 Arazi verisi	61
7. TARTISMA VE SONUÇ	64
KAYNAKLAR	67
EK 1	70
EK 2	80
ÖZGEÇMİS	81

SIMGELER DIZINI

GA	Genetik Algoritma
LGA	Lamarckian Genetik Algoritma
DAÖ	Dogru Akim Özdirenç
?	Çakismazlik (chi square)
?	Özdirenç
? _a	Görünür Özdirenç
s	iletkenlik
f	Gerilim
f	Dönüsük Gerilim
? d	Veri Fark Dizeyi
? p	Parametre Düzeltme Dizeyi
J	Jacobian Dizeyi
? V	Gerilim Farki
K ₀	Birinci Cins Sifirinci Derece Degistirilmis Bessel Fonksiyonu
K ₁	Birinci Cins Birinci Derece Degistirilmis Bessel Fonksiyonu
k _y	Fourier Dönüsüm Degiski (dalga numarası)

SEKİLLER DİZİNİ

Sekil 2.1(2.1) denklemi ile verilen düz çözüm bağıntısından $p_1=2.5$ ve $p_2=1.5$ değerleri için hesaplanan sinama verisi.....	8
Sekil 2.2 (a) Çaprazlama için seçilen iki model ve tek-noktadan çaprazlama için seçilen nokta, (b) tek-noktadan çaprazlama sonucu oluşan yavru döller.....	12
Sekil 2.3 Mutasyon.....	13
Sekil 2.4 Nesiller boyunca elde edilen en-küçük çakışmazlık ve toplulukların ortalama çakışmazlıkları	14
Sekil 2.5 Farklı topluluk büyüklükleri için her nesilde elde edilen (a) en-küçük ve (b) ortalama çakışmazlık	15
Sekil 2.6 Farklı çaprazlama olasılıkları için her nesilde elde edilen en-küçük çakışmazlık	16
Sekil 2.7 Farklı kromozom uzunlukları için her nesilde elde edilen en-küçük çakışmazlık	17
Sekil 2.8 GA ile kestirilen parametreler için kuramsal ve ölçülen veriler ...	18
Sekil 3.1 LGA akis semasi	20
Sekil 3.2 GA ve LGA için (a) en-düşük çakışmazlık (b) ortalama çakışmazlık.....	22
Sekil 3.3 GA (sol kolon), ve LGA'nın (sağ kolon) aynı nesildeki bireylerinin hata enerjisi haritasındaki dağılımı. Parametre kümeleri siyah noktalarla gösterilmiştir. (a) 1, (b) 4, (c) 7 ve (d) 10. nesildeki dağılımı göstermektedir	23
Sekil 4.1 Çok-kanallı DAÖ ölçüm sisteminde elektrotların konumu ve buna bağlı olarak tasarlanan model ağı	30
Sekil 4.2 Sonlu-farklar ağı.....	34
Sekil 4.4 Dört elektrotlu öz direnç ölçüm düzeni	39

Sekil 4.5 Düşey fay modeli	40
Sekil 4.6 Deneme amaçlı kullanılan yer modeli için profil eğrileri.....	41
Sekil 5.1 Bir model hücresinin kısmi türevinin hesaplanması için gerekli parametreler. EA ve EG, sırasıyla akım ve gerilim elektrotlarını göstermektedir	47
Sekil 6.1(a) Genetik işlemlerle üretilen bir model (b) aynı modelin yuvarlatıldıktan sonraki görünümü.....	54
Sekil 6.2 Model 1	55
Sekil 6.3 GA ve LGA'nin (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 5, (e) 10, (f) 15 ve (g) 20nci nesillerinde en-küçük çakışmazlık üreten bireyleri. Son adimdaki çakışmazlıklar $\sigma_{GA}=0.2120$ ve $\sigma_{LGA}=0.0097$	55
Sekil 6.4 Model 1 için nesiller boyunca (a) en-küçük ve (b) ortalama çakışmazlıklar. Dairelerle işaretlenen eğriler GA, yıldız ile işaretlenen eğriler LGA ile elde edilen sonuçları göstermektedir.....	56
Sekil 6.5 Model 2	57
Sekil 6.6 GA ve LGA'nin (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 5, (e) 10, (f) 15 ve (g) 20nci nesillerinde en-küçük çakışmazlık üreten bireyleri. Son adimdaki çakışmazlıklar $\sigma_{GA}=0.2091$ ve $\sigma_{LGA}=0.0464$	57
Sekil 6.7 Model 2 için nesiller boyunca (a) en-küçük ve (b) ortalama çakışmazlıklar. Dairelerle işaretlenen eğriler GA, yıldız ile işaretlenen eğriler LGA ile elde edilen sonuçları göstermektedir.....	58
Sekil 6.8 Model 3	59
Sekil 6.9 GA ve LGA'nin (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 5, ve (e) 10, (f) 15 ve (g) 20nci nesillerinde en-küçük çakışmazlık üreten bireyleri. Son adimdaki çakışmazlıklar $\sigma_{GA}=0.17815$ ve $\sigma_{LGA}=0.0588$...	59
Sekil 6.10 Model 3 için nesiller boyunca (a) en-küçük ve (b) ortalama çakışmazlıklar. Dairelerle işaretlenen eğriler GA, yıldız ile	

isaretlenen egriler LGA ile elde edilen sonuçlari göstermektedir	60
Sekil 6.11 Arkeolojik yapıların aranması ile ilgili bir çalışmada ölçülen verinin, GA ve LGA ile ters-çözümünde (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 5, (e) 10, (f) 15 ve (g) 20nci nesillerde en-küçük çakışmazlık üreten bireyler. Son adımdaki çakışmazlıklar $\sigma_{GA}=0.3192$ ve $\sigma_{LGA}=0.0506$	61
Sekil 6.12 Arazi verisi için nesiller boyunca (a) en-küçük (b) ortalama çakışmazlıklar. Dairelerle isaretlenen egriler GA, yıldız ile isaretlenen egriler LGA ile elde edilen sonuçlari göstermektedir	62
Sekil 6.13 Görünür özdirenç yapma-kesiti	62
Sekil 6.14 Kullanılan arazi verisinin toplandığı bölgede, önerilen kazı alanında bulunan duvar.....	63

ÇİZELGELER DIZINI

Çizelge 2.1 Biyolojik evrim ve genetik bilimindeki bazı terimlerin, problemlerin GA ile ters-çözümündeki karşılıkları	6
Çizelge 2.2 Genetik işleçlerin çalışması ile ilgili parametreler	9
Çizelge 2.3 Model parametreleri için arama uzayı	9
Çizelge 2.4 Parametrelerin ikili sistemde kodlanması	10
Çizelge 3.1 GA ve LGA yöntemleri ile kestirilen parametre değerleri ve bunlara karşılık gelen çakışmazlıklar	24
Çizelge 4.1 Bazı elektrot dizilimleri için ortalama araştırma derinlikleri (Edwards, 1977). Değerler 1 metre elektrot aralığı için hesaplanmıştır. ze/a birim elektrot aralığına, ze/L toplam dizilim boyuna göre araştırma derinliğini göstermektedir	31
Çizelge 4.2 Sonlu-farklar ağındaki hücrelerin boyut ve konumları. Son elektrottan sonra gelen hücrelerin x - yönündeki boyutları ters sırada olmak koşuluyla ilk on bir hücrenin boyutlarına eşittir	35
Çizelge 6.1 GA parametreleri	54

1. GIRIS

Jeofizik yöntemlerle elde edilen verilerin, fiziksel olarak anlamlandırılabilmeleri için verilerin, parametreleri bilinen bir model ile temsil edilebilmeleri gereklidir. Böyle bir model fiziksel ve geometrik parametreler ile tanımlanır. Fiziksel parametreler uygulanan yönteme bağlı olarak özdirenç, yoğunluk, sismik hız, dielektrik özelliği gibi nicelikler olabilir. Modelin geometrik parametreleri ise fiziksel parametrelerin yer içindeki dağılımını belirler. Veri ile model parametreleri birbirine düz çözüm bağıntısı ile bağlıdır.

Ölçülen veri ile uyumlu kuramsal veriyi üreten modele ait parametreleri bulma işlemine ters-çözüm denir. Bu işlem parametrelerin farklı değerleri için hesaplanan model yanıtları ile ölçülen verinin karşılaştırılması ve belli bir çakışma ölçütünün sağlanıp sağlanmadığının denetlenmesi ile yürütülür. Ölçülen ve kuramsal veriler arasında bir çakışmanın sağlanabilmesi için çok sayıda model yanıtının hesaplanması gerekebilir.

Jeofizik yöntemlerin çoğunda ters-çözüm problemi doğrusal değildir. Dolayısıyla ölçülen veriden, bu veriyi açıklayan modelin parametrelerinin kestiriminde geleneksel olarak doğrusallaştırılmış yinelemeli yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerde parametreler için yorumcu tarafından sağlanan ön-kestirim değerlerinden hesaplanan kuramsal veri (model yanıtı) ile ölçülen veri karşılaştırılır. Bu iki veri kümesi arasındaki uyumun artırılması için her yinelemede parametre değerleri değiştirilerek önceden belirlenen bir ölçüt sağlanıncaya kadar işlem sürdürülür. Ancak, eğim ve eğrisellik bilgisine dayalı bu yöntemlerde (En-dik inis, Eslenik türev, Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt) parametrelerdeki iyileştirme işlemi tamamen hata enerjisi haritasındaki yerel bilgilere dayanılarak yapıldığından, başlangıç parametreleri çözümün başarısında son derece önemlidir. Başlangıç parametrelerinin hata enerjisi haritasında yerel bir minimum civarına düşmesi durumunda algoritma en yakın minimuma ulaştığında duracağından global minimuma erişme şansı kalmayacaktır. Kimi problemlerde gerçek parametre değerlerine çok yakın ön-kestirimler verildiğinde bile bu sorunla karşılaşılma olasılığı vardır. Bahsedilen parametre kestirim yöntemleri, problemin çözümünü ön-kestirim parametreleri civarında aradığından yerel yöntemler olarak da adlandırılırlar. Yerel yöntemlerdeki bu sorunu aşmak için, çözüm uzayının

tamamini tarayan global yöntemler geliştirilmiş ve bir çok jeofizik probleme uygulanmıştır (Szu and Hartley 1987, Landa et al. 1989, Basu and Frazer 1990, Sen and Stoffa 1991, Vestergaard and Mosegaard 1991, Dosso and Oldenburg 1991, Sen and Stoffa 1992).

Global yöntemler, genel olarak doğada mükemmel yakın biçimde gelişen süreç ve olayların matematiksel uyarlamalarıdır. Beyin ve sinir sisteminin çalışması (Sinir Ağları, (Neural Networks, NN), canlılarda yasama ortamına uygun davranış ve karakterlerin genler sayesinde nesiller boyunca aktarılması (Genetik Algoritma (GA), Holland, 1975), kristalleşebilir maddelerin eriyik haldeyken uygun sığuma koşullarına tabi tutulduğunda minimum enerjiye ulaşarak kristallesmesi (Simulated Annealing (SA), Kirkpatrick et al., 1983) gibi olaylardan esinlenilerek çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Yöntemlerin, değişik amaçlara yönelik çok sayıda uyarlamaları da bulunmaktadır.

İlk olarak Holland (1975) tarafından sunulan genetik algoritma, doğada aynı türe ait canlı topluluğunu oluşturan bireylerin, yaşam ortamı koşullarına uyumluluğuna göre seçimlerini temel alır. Buna göre ortam koşullarına uyumlu özellikleri olan bireyler, hayatta kalıp karakterlerini sonraki nesillere aktarma şansını yakalarken, uyumsuz karakterleri taşımayan bireyler ölür. Ölen bireylerin karakterleri nesiller geçtikçe topluluğun gen havuzundan silinir. Holland'ın önerdiği ve basit genetik algoritma olarak adlandırılan bu yöntem işleyiş olarak Darwin'in, türlerin kökenleri ve doğal seçimle ilgili teorilerini çağrıştırmaktadır. Darwin'in bu konudaki teorisine göre, tür içindeki çeşitlilik bir başka deyişle yeni özellikleri olan bireylerin ortaya çıkması rastlantısal bir süreçtir. Rastlantısal olarak ortaya çıkan bu karakterler, bireyin mevcut ortam koşullarında yaşayıp yaşayamayacağını belirler. Buna göre bir türün ortam koşullarına göre evrimi çok uzun sürede gerçekleşir ve bir yönü yoktur.

Canlıların ortam koşullarına bağımlı olarak evrimi üzerine bir diğer teori, J. B. Lamarck'a aittir. Lamarck'ın teorisinde Darwin'in bu konudaki teorisinin tersine, canlıların, değişen ortam koşullarına uyum sağlamak üzere davranış ve karakterlerini bu yönde geliştirmeye çalıştıkları savunulur. Bu sayede kimi organlar gelişip güçlenirken, değişen ortam koşulları için uygun olmayan organ ve davranışlar zayıflayarak yok olur. Kazanılan özellikler kalıtım yoluyla sonraki nesillere aktarıldığında, tür kusursuzluğa doğru

evrimlesir. Bu da evrimin bir amaci ve yönü oldugunu gösterir. Lamarck'in teorisine göre basit canlidan, karmasik ve gelismis canliya dogru giden evrim süreci yönlennmis oldugundan çok daha hizli gerçekleşir.

1.1 Tezin Amaci

Tüm yöntemlerin olduğu gibi, global yöntemlerin de üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Çözüm uzayının tamamının taranması, dolayısıyla global minimuma ulaşılma olasılığının yüksek olması, verinin gürültü içeriginden daha az etkilenmesi, fiziksel olarak anlamsız parametreler üretilmemesi gibi üstünlükleri bulunan yöntemlerin, hesaplama zamanı açısından değerlendirildiğinde pahalı yöntemler oldukları söylenilebilir.

Rastlantısal ve çok yavaş ilerleyen evrim sürecinin, karmaşık ters-çözüm problemlerine uygulanması oldukça zordur. Modeldeki parametre sayısı arttıkça basit genetik algoritmanın bu tür problemlerin çözümünde kullanılması, hesaplama zamanı açısından uygulanabilir değildir. Bu noktadan yola çıkılarak Lamarck'ın türlerin mükemmelleme doğru yönlendirilmiş evrim teorisinin algoritmaya eklenmesi amaçlanmıştır. Lamarck'ın evrim teorisi, basit genetik algoritmaya, genetik evrim sürecinin değişik aşamalarında ortaya çıkan bireylerin karakterlerinin ortam koşullarına daha uyumlu hale getirilmesi yoluyla eklenmiştir. Bu işlem genetik işlemlerle ortaya çıkan modelin, geleneksel ters-çözüm yöntemlerinden birine önkestirim olarak verilmesi ve belirli sayıda yineleme yapılarak iyileştirildikten sonra evrim sürecine yeniden katılması şeklinde özetlenebilir. İyileştirme işlemi her model hata enerjisi haritasında en yakın minimuma yönlendirecektir. Bu sayede evrim süreci iyiye doğru yönlendirilmiş ve hızlandırılmış olacaktır.

Bahsedilen biyolojik evrim kuralları ve teorileri ışığında elektrik verilerinin ters-çözümünde kullanılmak üzere bir yazılım geliştirilmesi, yapay ve arazi verileri ile test edilmesi, sonuçların aynı verilerin geleneksel yöntemlerle ters-çözümünden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak önerilen yöntemin başarısının denemesi bu tezin amacını oluşturmaktadır.

2. BASIT GENETİK ALGORITMA

Genetik algoritma, temelleri biyolojik evrim sürecinden alınarak geliştirilmiştir. İlk olarak Holland (1975) tarafından ortaya konulan yöntem Goldberg'in (1989) çalışmaları ile geliştirilmiş ve çok geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Algoritmayı ayrıntıları ile anlatmadan önce temellerinin alındığı biyolojik evrim sürecine ve bu süreçle ilgili çeşitli kavramlara değinilmesi faydalı olacaktır.

Bir canlının tasıdığı özelliklere "karakter" adı verilir. Canlının karakterini DNA üzerindeki genler belirler. Bir karakteri temsil eden ve bu karakterin yavru döllerine aktarılmasını sağlayan DNA parçasına gen adı verilir. Yavru bireyde karakteri oluşturan genlerden biri anneden diğeri babadan gelir, karakteri oluşturan bu gen çiftine "alel gen" adı verilir.

Bir topluluk, kalıtsal yapısı farklı olan birçok bireyden oluşur. Toplulukta farklı karakterlerin ortaya çıkması, genetik işlemler olarak adlandırılan, seçim, çaprazlama ve mutasyon süreçleri nedeniyle meydana gelir. Bu sayede topluluktaki gen havuzuna yeni karakterler eklenmiş olur.

Doğal seçim teorisine göre topluluktaki farklı karakterlerden, yaşama ortamına bir başka deyişle çevre koşullarına uygun olanların hayatlarına devam etme ve çoğalma şansı vardır. Çevre koşulları, doğal seçim sürecinde sabit bir parametre değildir. Zaman içinde değişim gösterebilir. Bu durumda çevre koşullarının önceki haline uyumlu olan karakterlere ait yetenekler değişen koşullar için yeterli olmayabilir. Bu onların yasal işlevlerinde (üreme, besin bulma, barınma ve korunma gibi) azalmaya neden olur ve yeni koşullara uyumlu karakterler toplulukta baskın olmaya başlar. Çevre koşullarının sabit olduğu ortamlarda kararlı ve duragan bir gen havuzu oluşur. Bu durumda topluluktaki karakterlerde çok büyük değişimler ortaya çıkmaz.

Doğal seçim süreci, bakterilerin antibiyotiklere karşı giderek artan düzeylerde gösterdikleri direnç ile anlatılabilir. Antibiyotikler, ilk kullanılmaya başlandığında, bakterileri öldürmekte çok etkililerdi. Rastlantı sonucunda üyelerinin küçük bir bölümü penisiline karşı dirençli olan bir bakteri topluluğu üzerine çok miktarda penisilin döküldüğünde, dirençli olan birkaç tanesi dışında tüm bakteriler ölür. Dirençli bakteriler,

başlangıçta topluluk üyelerinin çok küçük bir bölümünü oluştururken, birdenbire topluluğun tek hakimi durumuna gelir. Penisilin aracılığıyla doğal seçim, dirençli bakterilerin lehine işlemiş olur. Bu durum aslında yönlendirilmiş bir seçilimdir. Özel koşulları olan bir çevreye uzun bir süre içerisinde uyum yapan canlılarda görülür. Yukarıdaki örnekte olduğu gibi yalnızca penisiline direnç gösterebilen karakterdeki canlıların hayatta kalma şansı vardır (Demirsoy, 1998).

Basit genetik algoritma, önceki bölümde anlatılan biyolojik evrim sürecinde, çevre koşullarına en uyumlu olanların hayatta kalması ilkesinden yola çıkılarak geliştirilmiş bir yöntemdir. Genetik biliminde kullanılan birçok terim benzer anlamlarla kullanılmaktadır. Bu terimlerin genetik biliminde ve algoritmadaki karşılıkları Çizelge 2.1’de verilmistir.

Çizelge 2. 1 Biyolojik evrim ve genetik bilimindeki bazı terimlerin, problemlerin GA ile ters-çözümündeki karşılıkları

Biyolojik Evrim	Ters-çözüm
Birey	Model
Kromozom	Kodlanmış parametre kümesi
Gen (DNA parçası, belirli elemanların karşılıklı bağlarından oluşur)	Parametreyi tanımlayan koddaki bir hane (ikili kodlamada 1 ya da 0 değeri alabilir)
Doğal seçim: Ortam koşullarına uyumlu karakterler taşıyan canlılar hayatta kalır ve çoğalır.	Ölçülen veri ile daha uyumlu kuramsal veriyi üreten modeller kabul edilir.
Adaptasyon: Nesiller ilerledikçe bireyler ortama uyum sağlar.	İlerleyen nesillerde, model yanıtları daha iyi çakışma gösterir.
Mutasyon: Topluluğun homojen hale gelmeye başladığında karakter değişimlerine neden olur.	Erken yakınsamayı ve yerel minimumlara takılmayı engeller.

Biyolojide bir topluluğu oluşturan bireylerin genetik algoritmadaki karşılığı problemin çözümü olarak önerilen herhangi bir modeldir. Model parametrelerinin alabileceği sayısal değerlerin alt ve üst sınırları, algoritmaya önceden verilerek olası çözüm uzayı tanımlanır. Her parametre için farklı çözüm aralıkları tanımlanabilir. Parametreler için çözüm

aralıkları ve topluluktaki birey sayısı tanımlandıktan sonra, algoritma ilk adımda topluluktaki birey sayısı kadar rastgele model üretir. Her bir modelin ürettiği kuramsal veri, düz çözüm bağıntısı ile hesaplanarak ölçülen veri ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda modelin genetik işlemlerden nasıl etkileneceğini belirleyen çakışmazlığı (ortam koşullarına uyumsuzluğu) hesaplanır. Başlangıç topluluğundaki bireyler kodlandıktan sonra genetik evrim sürecine sokularak, çevre koşullarına uygun bireylerin toplulukta çoğalmaları sağlanır. Çevre koşullarının parametre kestirim problemindeki karşılığı ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki uyumu denetleyen fonksiyonun değeridir. Probleme bağlı olarak farklı çakışmazlık fonksiyonları seçilebilir. Ölçülen veri ile iyi uyum gösteren model yanıtını veren bireyler, hayatta kalıp çoğalırken, model yanıtları ile ölçülen veri arasındaki çakışmazlığı yüksek olan bireyler ölür. Ölen bireylerin karakterleri topluluğun gen havuzundan silinir. Nesiller ilerledikçe topluluk homojen hale gelir. Belirlenen nesil sayısına ulaşıldığında, topluluktaki birey sayısı kadar model elde edilir. Yorumcu bu modeller içinden birini çözüm olarak alabilir. Gerçekte bir problem için global minimuma ulaşılıp ulaşılmadığı hiçbir zaman bilinemeyeceğinden, bulunan modellerden en uygununun seçilmesi, çakışma ölçütü ışığında, mesleki bilgi ve tecrübelerle dayanılarak yapılacaktır.

2.1 Basit Genetik Algoritma ile Parametre Kestirimi

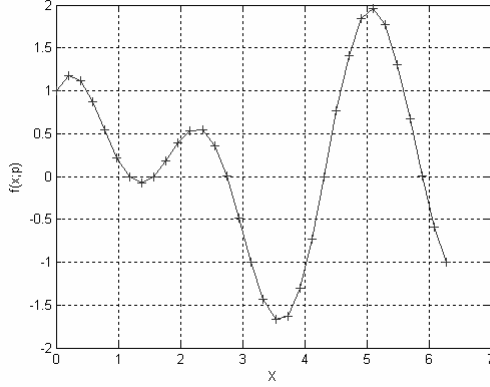
Genetik algoritmanın parametre kestiriminde kullanılmasında izlenen adımlar aşağıdaki gibidir:

1. Giriş verilerinin okutulması
2. Genetik işlemlerin çalışması ile ilgili parametrelerin (nesil sayısı, topluluk büyüklüğü, model parametreleri için arama uzayının alt ve üst sınırları, çaprazlama ve mutasyon olasılıkları) girilmesi
3. Başlangıç topluluğunun oluşturularak kodlanması
4. Topluluktaki bireylerin çakışmazlığının hesaplanması
5. Bireylerin çakışmazlıklarına göre çiftleşme hakkı için seçilmesi
6. Seçilen bireyler arasında çaprazlama
7. Çaprazlama sonucu oluşturulan yeni bireylerin bir sonraki nesil olarak tanımlanması,
8. 4-7. adımlar belirlenen nesil sayısına ulaşılincaya kadar tekrarlanır.

Genetik algoritmanın parametre kestiriminde kullanılması izleyen örnek üzerinde açıklanmıştır.

$$f(x, p) = \cos(p_1 x) + \sin(p_2 x) \quad (2.1)$$

ile verilen problemde, $p_1 = 2.5$ ve $p_2 = 1.5$ degerleri için sinama verisi olusturulmus ve Sekil 2.1' de verilmistir.



Sekil 2. 1(2.1) denklemleri ile verilen düz çözüm bagintisindan $p_1 = 2.5$ ve $p_2 = 1.5$ degerleri için hesaplanan sinama verisi

Algoritmanin ikinci adiminda model parametreleri ve genetik isleçlerin çalismasi ile ilgili bilgiler girilir. (2.1) denklemleri ile verilen problem için algoritmaya girilen bilgiler Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'de verilmistir.

Çizelge 2. 2 Genetik işleçlerin çalışması ile ilgili parametreler

Parametre sayısı, n_{param}	2	Modeli tanımlayan parametre sayısı
Nesil sayısı, $maxgen$	10	Genetik evrim sürecinin yineleme sayısı
Topluluk büyüklüğü, n_{popsiz}	50	Her nesilde oluşturulacak topluluktaki birey sayısı
Çaprazlama olasılığı, p_{cross}	0.6	$R \in (0,1) < p_{cross}$ ise çaprazlama gerçekleşir
Mutasyon olasılığı, p_{mutate}	0.1	$R \in (0,1) < p_{mutate}$ ise mutasyon gerçekleşir

Çizelge 2. 3 Model parametreleri için arama uzayı

Parametre	p_{min}	p_{max}	p_{gercek}	(np)	$\Delta p = (p_{max} - p_{min}) / (np - 1)$
p_1	1	4	2.5	16	0.2000
p_2	0.1	3	1.5	16	0.1933

2.1.1 Kodlama

Genetik bilgi, kodlanmış olarak DNA sayesinde sonraki nesillere aktarılır. Modellerin algoritmanın genetik işleçler olarak adlandırılan bölümlerinde işlenebilmesi için benzer şekilde kodlanmaları gereklidir. Genetik algoritmada, parametreleri temsil etmek amacıyla çeşitli kodlama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kodlama yöntemleri arasında en kolay ve en çok kullanılanı, her bir parametrenin ikili (binary) sistemde kodlanmasıdır. İkili kodlama, bilgisayar mantığına yakınlığı, GA işleçlerine uyumlu olması ve kolayca değiştirilebilmesi gibi nedenler ile tercih edilen bir kodlama sistemidir. Basit ikili kodlamada, kromozom 0 ya da 1 değerini alabilen genlerin birleşiminden oluşur. Kromozomların uzunluğu, her bir parametre için tanımlanan çözüm aralığı ve parametrelerin bu aralıklarda

alabilecegi olasi deger sayisina baglidir. Bir modeli temsil eden birey, her bir parametrenin ayri ayri kodlanip bunlarin arda arda eklenmesi ile olusturulur. Parametreler için tanımlanan çözüm uzaylari farkli olabileceginden her bir parametrenin ayri ayri kodlanması gereklidir. Düz çözümü (2.1) ile verilen bir problem için parametrelerin ikili sistemde kodlanması Çizelge 2.4’de verilmistir.

Çizelge 2. 4 Parametrelerin ikili sistemde kodlanması

Parametre	$\log_2(np)$	Onluk sistemdeki degeri	Ikili kod karsiligi
p_1	4	3.2000	(1011)
p_2	4	1.4531	(0111)
Model	8	$f(x, p) = \cos(3.2x) + \sin(1.4531x)$	(10110111)

(1011) seklinde kodlanmış birinci parametrenin gerçek degerinin hesaplanması ise izleyen sekildedir:

$$p_1 = p_{1\min} + \Delta p_1 (1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) = 1 + 0.2 \cdot (8 + 0 + 2 + 1) = 3.2$$

2.1.2 Seçilim

Topluluktaki tüm modellerin çakismazligi hesaplandıktan sonraki adım, seçim islecinin uygulanmasıdır. Seçilim, genetik bilgi alisverisinin saglandigi çaprazlama için çiftleri belirler. Seçilen bireyler çiftlesme ve kendi karakterlerini sonraki nesillere aktarma sansini yakalarlar. Basit genetik algoritmanın jeofizik uygulamalarında, seçim adımında göz önüne alınan tek ölçüt bireylerin çevre kosullarina uyumluluklari yani ölçülen-kuramsal veri çakismasıdır. İyi çakisma veren bireylerin seçim olasiligi daha yüksektir. Çiftlesme hakkı için seçim olasiligi dogrudan çakismaya ya da çakismayı tanımlayan bir fonksiyona bağlanabilecegi gibi, bir esik degerinin altında ya da üstündeki modellerin elenmesi ya da seçilmesi yoluna da gidilebilir.

Seçilim için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, çakismayla orantili seçilim, sıralanmış seçilim ve yarisma seçilimidir. Çakismayla orantili seçilimde, “i” numarali modelin seçilme olasiligi, modelin çakismasinin topluluktaki tüm bireylerin çakismalarının toplamına oranı olarak ifade edilir ve izleyen denklem ile verilir:

$$P_s(m_i) = \frac{F(m_i)}{\sum_{j=1}^n F(m_j)} . \quad (2.2)$$

Burada, $P_s(m_i)$, i modelinin seçilme olasiligini, $F(m_i)$, i modelinin çakismasını, n ise topluluktaki birey sayısını göstermektedir. Baslangıç toplulugundaki bireyler $P_s(m_i)$ olasiligi ile orantili sayıda kopyalanarak bir ara topluluk olusturulur. Bu kopyalama islemi çakisması iyi olan bireylerin seçilme sansini artırıcı yönde rol oynar. Bu ara toplulugun bireyleri çakismalarına göre seçilerek eslestirilir.

Sıralanmış seçilim yönteminde (Baker 1987, Whitley 1989), tüm modeller çakismalarına bağlı olarak sıralanır. En iyi çakismayı veren 0, en kötü çakismayı veren model n-1 ile numaralandirilir. Modeller sıralamadaki yerlerine bağlı olarak önceden belirlenen bir sayı kadar kopyalanarak sonraki topluluk olusturulur.

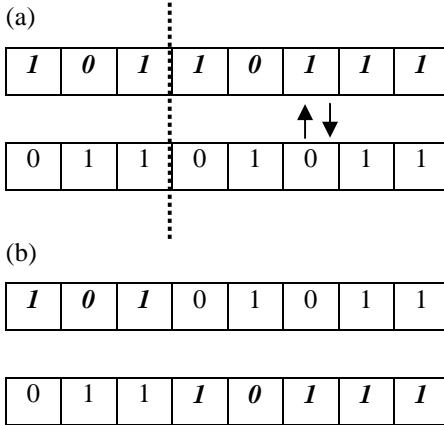
Seçilimde kullanılan bir baska yöntem olan yarisma seçiliminde (Goldberg ve Deb, 1991) ise, doğada çiftleşme hakkını elde etmek için yapılan mücadeleye benzer şekilde rastgele seçilen iki bireyden daha iyi çakisma üreten yarismayı kazanarak seçilir. Bu işlem, topluluktaki birey sayısının yarisi kadar çift elde edilinceye kadar tekrarlanır. Buna göre bireyin çiftleşme hakkını kazanma sansini çakismazligi belirler. Bu tez kapsamında değerlendirilen tüm problemlerde (2.3) denklemi ile verilen çakismazlık fonksiyonu kullanılmış ve seçilim yarisma seçilimine göre yapılmıştır.

$$c = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d(i) - f(i))^2 \right]^{1/2} . \quad (2.3)$$

(2.3) denkleminde, ? çakismazlık, n, veri sayısı, d, ölçülen veri, f ise kuramsal veriyi göstermektedir.

2.1.3 Çaprazlama

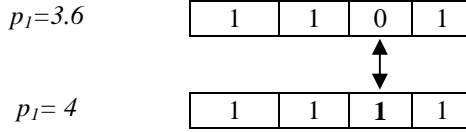
Bireyler arasında genetik bilgi alış verişinin gerçekleşmesini sağlayan işlemdir. Çakışmalarına bağlı olarak ebeveyn olarak seçilen bireyler genetik evrim sürecinde kazandıkları iyi karakterleri sonraki nesle bu sayede aktarırlar. Çaprazlama, tek-noktadan (single-point) ve çok-noktadan (multi-point) olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilir. Tek-noktadan çaprazlamada, kromozom üzerinde rastgele bir nokta seçilir. Bu noktanın sağında kalan genler diğer ebeveyninki ile yer değiştirir. Bu sayede ebeveynlerden ve birbirinden farklı iki yeni model elde edilmiş olur. Bu iki modelden her ikisi de kabul edilebilir ya da model yaniti ile ölçülen veri arasındaki çakışması daha iyi olan seçilerek diğeri elenebilir. Çok-noktadan çaprazlamada ise iki modelin tüm parametreleri arasında birer çaprazlama noktası seçilerek gen değişimi yalnızca kromozomun aynı parametreyi temsil eden kısımları arasında tek-noktadan çaprazlamada olduğu gibi gerçekleşir.



Sekil 2. 2 (a) Çaprazlama için seçilen iki model ve tek-noktadan çaprazlama için seçilen nokta, (b) tek-noktadan çaprazlama sonucu oluşan yavru döller

2.1.4 Mutasyon

Genetik evrim sürecinin son isleci mutasyondur. Mutasyon kromozom içinde yalnız bir genin değişmesi şeklinde gerçekleşir. Nesiller ilerledikçe topluluğun gen havuzu duragan hale gelir. Bu durum toplulukta yeni karakterlerin ortaya çıkmasını engeller. Jeofizik ters-çözüm problemlerinde yeni karakterlerin ortaya çıkmamasının karşılığı erken yakınsama yani algoritmanın yerel minimuma takılması olarak karşımıza çıkabilir. Mutasyon operatörü modellerde küçük değişimler meydana getirerek algoritmanın çözüm uzayında aramaya devam etmesini sağlar.



Sekil 2. 3 Mutasyon

Algoritma önceki bölümlerde anlatılan işlemler aracılığı ile topluluğu sürekli çevre koşullarına uyumlu yönde evrimleştirerek, belirlenen nesil sayısı sonunda, global minimum ya da yakın civarında bir noktada duracaktır. Global minimuma ulaşılması için gereken topluluk büyüklüğü ve nesil (yineleme) sayısı problem bağımlidir. Topluluktaki birey ve nesil sayısının büyük seçilmesi, genetik çeşitliliği artırır ancak gereğinden büyük seçilmesi durumunda işlem zamanını artıracaktır. Global arama yöntemlerinin zayıf yönlerinden biri, yerel arama yöntemlerine göre oldukça fazla sayıda yineleme gerektirmesidir. Bu sebeple topluluk büyüklüğü ve nesil sayısı probleme bağlı olarak optimize edilmelidir.

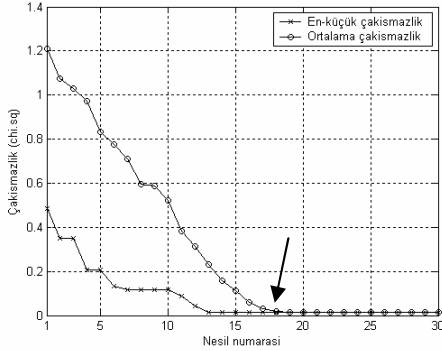
2.2 Algoritmanın Başarısını Etkileyen Etmenler

Topluluk büyüklüğü, nesil sayısı, çarpazlama olasılığı, algoritmanın başarısında etkili parametrelerdir. Bunların dışında kodlama işleminde model parametrelerini temsil eden kromozomların uzunluğu da algoritmanın bir minimuma (büyük olasılıkla global minimum) yakınsaması için gerekli nesil sayısında belirleyicidir. Bahsedilen genetik parametrelerin

etkisinin incelenmesi amacıyla, düz çözümü (2.1) denklemi ile verilen problem için algoritma, farklı topluluk büyüklüğü, nesil sayısı, çaprazlama ve mutasyon olasılıkları için çalıştırılmış ve sonuçlar her nesilde elde edilen en az çakismazligi üreten model ve her neslin ortalama çakismazligi isiginda sunulmustur.

2.2.1 Nesil Sayisi

Genetik algoritmada, nesiller ilerledikçe belirli karakterlerdeki modeller toplulukta çoalmaya baslar. Ele alınan problemin dogasi ve algoritmaya girilen diğer parametrelere (topluluk büyüklüğü, çaprazlama ve mutasyon olasılıkları) bağlı olarak bir nesil sayısından sonra tüm modeller hata enerjisi haritasında global minimum civarında toplanacak ve topluluk tekdüze hale gelecektir. Bu noktadan sonra çözüm uzayında aramaya devam edilmesi modellerde fiziksel olarak anlamlı bir değişiklige neden olmayacaktır. Toplulugun hangi nesilden sonra tekdüze hale gelecegi baska etkenlere de bağlı olduğundan algoritma önceden belirlenen bir nesil sayısına ulasildiginda ya da baska bir ölçüt saglandiginda durdurulabilir.

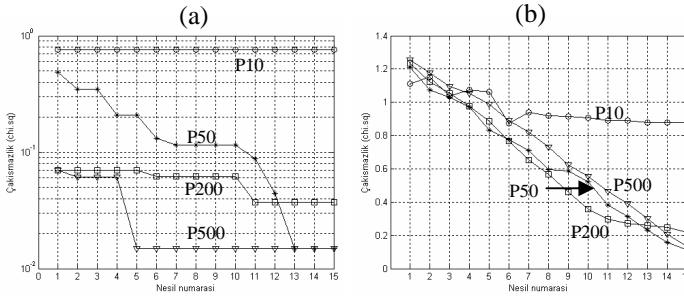


Şekil 2. 4 Nesiller boyunca elde edilen en-küçük çakismazlik ve toplulukların ortalama çakismazlikları

Sekil 2.4'den de görülebileceği gibi verilen örnek için on üçüncü nesilden sonra modellerde anlamlı değişiklikler ortaya çıkmamakta on dokuzuncu nesilden sonra ise topluluk tekdüze hale gelmektedir.

2.2.2 Topluluk Büyüklüğü

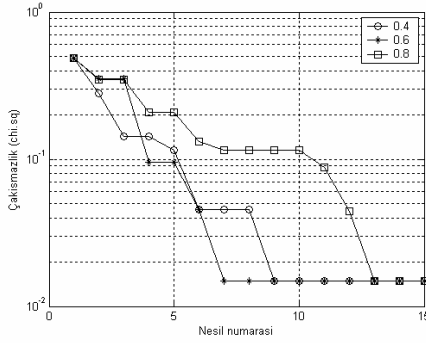
Topluluk büyüklüğü bir nesildeki modellerin sayısıdır. Topluluktaki nesil sayısının artırılması genetik çeşitliliği artıracığından farklı karakterlerin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Ancak, rastlantısal bir süreç içerisinde çeşitliliğin artırılması, ortaya çıkan karakterlerin topluluğu iyiye doğru evrimleştirmesini garanti etmez. Bunun yanında parametreler için çözüm uzayı başlangıçta sınırlandırıldığından, birey sayısının gereğinden fazla artırılması durumunda tekrarlanan modeller elde edilebilir. Bu da zaten hesaplama zamanı uzun olan yöntemi daha da yavaşlatacaktır. GA önceki bölümlerde de verilen örnek problem için diğer tüm büyüklükler sabit kalmak üzere, 10, 50, 200 ve 500 topluluk büyüklüğü için çalıştırılmış ve sonuçlar Sekil 2.5a ve b' de verilmiştir.



Sekil 2. 5 Farkli topluluk büyüklükleri için her nesilde elde edilen (a) en-küçük ve (b) ortalama çakismazlık

2.2.3 Çaprazlama Olasiligi

Ebeveyn olarak seçilen iki bireyin çaprazlanması bir olasılık içerisinde gerçekleşir. Algoritmaya önceden girilen çaprazlama olasılığının, (0,1) aralığından rastgele seçilen R sayısından küçük olması durumunda çaprazlama gerçekleşirken, bu koşulun sağlanmaması durumunda bir önceki nesildeki birey yeni nesle taşınır. Çaprazlama olasılığının algoritmanın işleyişine etkisi, farklı çaprazlama olasılıkları için her nesilde elde edilen en-küçük çakışmazlığın değişimi ile Şekil 2.6' da verilmiştir.

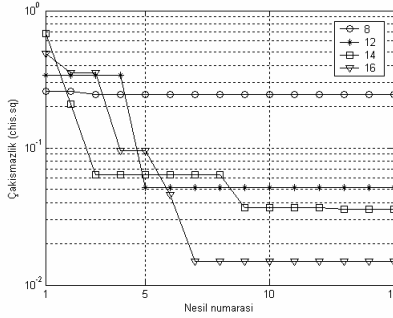


Şekil 2. 6 Farklı çaprazlama olasılıkları için her nesilde elde edilen en-küçük çakışmazlık

Çaprazlama olasılığının bire yaklaşması genetik çeşitliliği artırmakla birlikte yakınsamayı geciktirmektedir. Ancak, çaprazlama olasılığının optimum değeri problem bağımlidir. Verilen örnek için 0.6 en uygun çaprazlama olasılığı olarak gözükmektedir.

2.2.4 Kromozom Uzunluğu

Kromozom uzunluğu parametrelerin verilen arama uzayında alabileceği değer sayısına bağlıdır (Çizelđe 2.4). Örnek olarak çözüm uzayının alt ve üst sınırları sırasıyla 1 ve 4 olarak verilen birinci parametre için bu aralıkta alabileceği olası değer sayısı 16 seçilirse, parametreyi tanımlayan kromozomun uzunluğu ($\log_2(16)$) 4 bit ve $\Delta p = 0.2$ olur. Verilen problem için her iki parametrenin kromozom uzunluğu aynı seçilirse bir modeli tanımlayan genetik kodun uzunluğu 8 bit olur. Her iki parametre için aynı olmak üzere farklı kromozom uzunlukları için elde edilen en-küçük çakışmazlık Şekil 2.7’de verilmiştir.

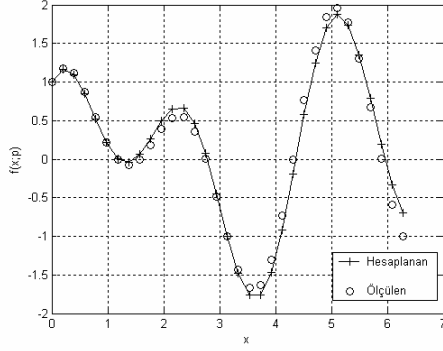


Şekil 2. 7 Farklı kromozom uzunlukları için her nesilde elde edilen en-küçük çakışmazlık

Kromozom uzunluğunun artması parametreler için verilen arama uzayının daha ayrıntılı taranmasını sağlar. Kromozom uzunluğu seçilirken ilgili parametrenin ölçülen-kuramsal veri farkına etkisi göz önüne alınabilir. Veri üzerindeki etkisi baskın olan parametreler uzun kromozom ile temsil edilirken, veriye katkısı görecel olarak az olan parametrelerin daha kısa kromozomla temsil edilmesi yoluna gidilebilir.

Önceki bölümlerde verilen bilgiler ışığında, (2.1) denklemi ile düğ çözümü verilen problem için basit genetik algoritma, topluluk büyüklüğu 50, nesil sayısı 15, çaprazlama olasılığı 0.6, mutasyon olasılığı 0.01 alınarak çalıştırılmıştır. Kestirilen parametre değerleri $p_1=2.505$ ve $p_2 = 1.4993$ 'dir. Kestirilen parametreler için model yanıtı ve ölçülen veri Şekil 2.8’de

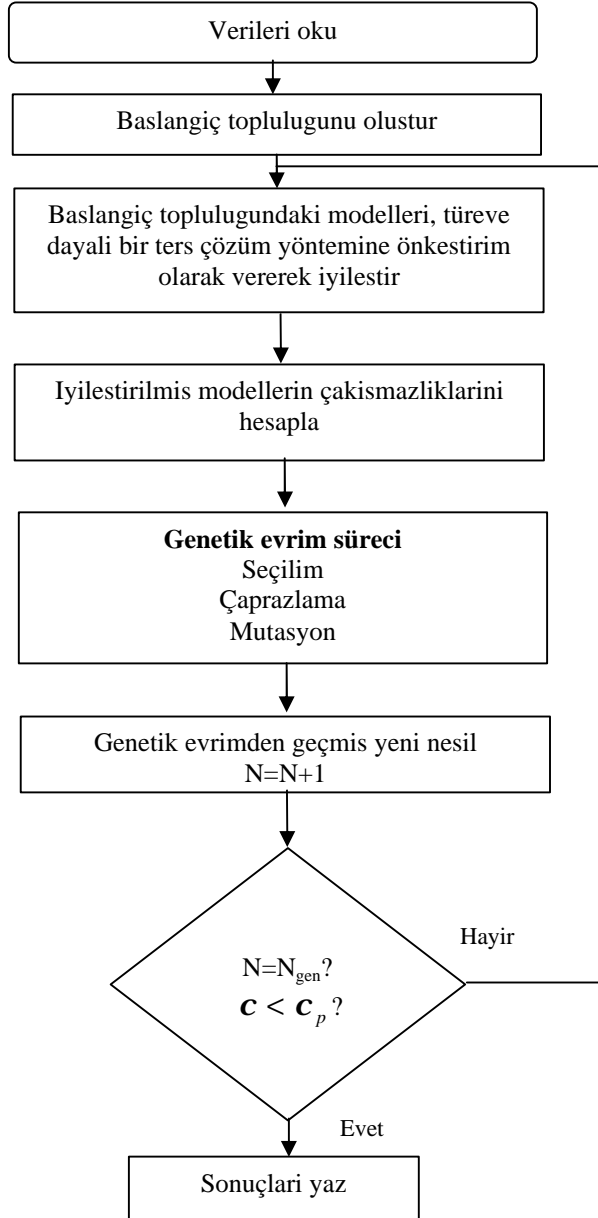
verilmiştir. Son adımda, ölçülen ve hesaplanan veri kümeleri arasındaki çakışmazlık $c = 0.0147$ 'dir.



Sekil 2. 8 GA ile kestirilen parametreler için kuramsal ve ölçülen veriler

3. LAMARCKIAN GENETİK ALGORITMA

Önceki bölümde bahsedilen üstünlüklerine karsin, genetik algoritmanın global çözüme ulasacağı yönünde bir kural bulunmamaktadır. Kuramsal olarak sonsuz sayıda nesil sayısı ile global minimuma ulaslabilmektedir. Ancak geleneksel yöntemlere göre çok fazla hesaplama zamani gerektiren yöntemin global minimuma ulasması yönünde nesil sayisinin artırılması yoluyla zorlanması çok uygulanabilir bir yöntem olmayacaktır. Ayrıca bir nesil sayısından sonra topluluk duragan hale gelebilmekte ve parametrelerdeki değisim fiziksel olarak anlam tasimamaktadır. Bunun yerine, bir topluluktaki her birey kendi içinde geliştirilerek yeniden stokastik evrim sürecine sokulabilir. Bireyleri, çevre kosullarina uyumlu bir topluluk evrim sürecinde daha basarili döller verecektir. Bireylerin çevre kosullarina uyumlulugunun artırılması, ters-çözümdeki karsiligi ile daha iyi çakisma vermelerinin saglanması için başlangıçta genetik algoritma ile olusturulan çözümler toplulugunun bireyleri, geleneksel yöntemlerden birine önkestirim olarak verilerek en yakin minimuma yaklastirilabilir. Genetik algoritmanın ürettiği çözümlerden yerel minimumlar civarina düşenler yerel minimuma yaklasirken, olasi çözümlerden global minimum civarina düşenler global minimuma yaklasacaktır. Nesiller ilerledikçe çözümler minimumlar civarında toplanacaktır. Probleme bagli olmakla birlikte, nesil sayısı ve çözüm uzayinin dogru tanımlanması durumunda son nesildeki tüm çözümler global minimum civarında olacaktır. Bu yöntemle evrim süreci hizlandirilarak daha az nesil sayısı ile problemin çözümüne ulaslabilinecektir. Lamarckian genetik algoritma (LGA) olarak adlandırılan bu yöntem, çözüm uzayinin tamamini tararken, aynı zamanda kabul edilebilir ölçütleri saglayan bir çözüm bulunmasında gerekli nesil sayısı ve topluluk büyüklüğünü, basit genetik algoritma ile karsilastirildiginda önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu özelligi nedeniyle, genetik algoritma ve geleneksel ters-çözüm yöntemlerinin üstün yönlerini birlestiren, zayıf yönlerini bastiran melez bir yöntem elde edildiği söylenebilir. Bu sayede daha karmaşik problemlerin, genetik evrim kurallari araciligi ile çözülmesi uygulanabilir bir yöntem olacaktır. LGA'nin akis semasi Sekil 3.1'de verilmistir.



Sekil 3. 1 LGA akis semasi

Lamarckian genetik algoritma, bireylerin evrim sürecine sokulmadan önce türeve dayalı bir yöntemle geliştirilmesi dışında basit genetik algoritma ile aynı akış seması ile ifade edilebilir. Algoritmanın genetik işlemleri üzerinde de bir değişiklik yapılmamıştır. Ancak, iyileştirme işlemi ile kazanılan özelliklerin kaybolmaması için modeller yeniden kodlanarak genetik evrim sürecine katılmıştır.

Topluluğun bireylerinin en yakın minimuma yaklaştırılması, diğer bir deyişle geliştirilmeleri için sönümlü en-küçük kareler ters-çözüm yöntemi kullanılmıştır. Sönümlü en-küçük kareler yönteminde parametreler için sağlanan ön-kestirimlere yapılacak düzeltme izleyen düzey denklemi ile hesaplanabilir:

$$\Delta p = (J^T J + e^2 I)^{-1} J^T \Delta d . \quad (3.1)$$

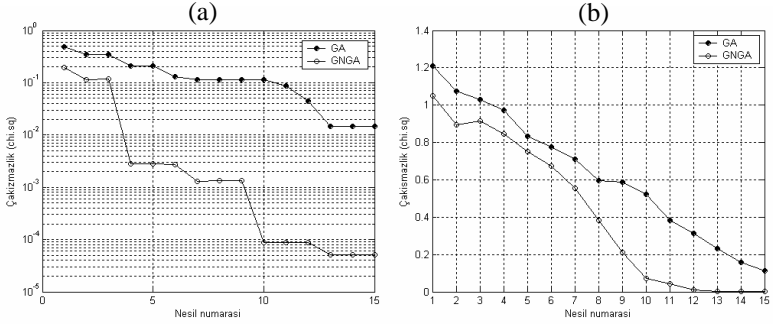
(3.1) denkleminde Δp , parametre düzeltme düzeyi, J, kuramsal verinin önkestirim değerlerine göre kısmi türevlerini içeren Jacobian düzeyi, e, sönüm faktörü, I, birim düzey ve Δd , ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki farkı gösteren veri fark düzeyidir. Parametrelerin düzeltilmiş değerleri, önkestirim değerlerine, hesaplanan düzeltmelerin eklenmesi ile bulunabilir :

$$p = p^o + \Delta p . \quad (3.2)$$

Görüldüğü gibi türeve dayalı parametre kestiriminde parametrelerin veriye göre kısmi türevlerinin hesaplanması, düzey tersleme işlemlerinin yapılması ve parametreler için bir önkestirim sağlanması gerekmektedir. Buna göre basit genetik algoritmadan farklı olarak, bir nesildeki tüm modellerin genetik evrimi için gerekli hesaplama zamanına, sayılan hesaplama adımları ve topluluktaki her model için fazladan en az bir düz çözüm için gerekli sürede eklenmiş olur. Sönüm faktörünün doğru seçilmemesi ya da çoklu yineleme uygulanması durumunda bir modelin sönümlü en-küçük kareler ile iyileştirilmesi için birden fazla model yanıtının hesaplanması gerekebilir.

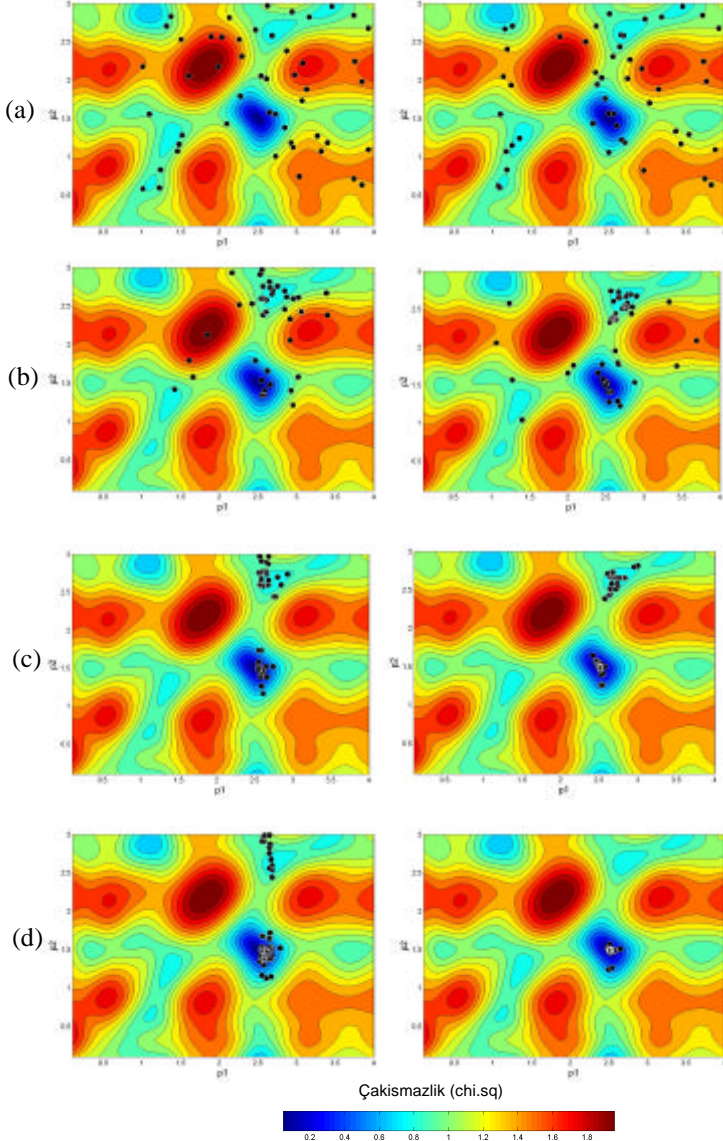
Yalnız bir nesildeki modellerin stokastik evrimi düşünüldüğünde LGA'nin hesaplama zamanını artırdığı düşünülebilir. Evrim sürecinin tamamı göz önüne alarak bir değerlendirme yapılması ve yöntemin basit genetik algoritma ile karşılaştırılması amacı ile basit genetik algoritma için verilen örnek LGA için de kullanılmıştır. İki algoritmanın karşılaştırılmasıyla elde

edilen sonuçlar her nesilde elde edilen en-düşük ve ortalama çakismazlik isiginda Sekil 3.2'de verilmistir. Her iki yöntem için topluluk büyüklüğü nesil sayisi, çaprazlama olasililiklari aynı alınmistir.



Sekil 3. 2 GA ve LGA için (a) en-düşük çakismazlik (b) ortalama çakismazlik

Basit genetik algoritma ve LGA'nin nesiller boyu topluluklari nasil evrimlestirdiginin gösterilmesi amaciyla, evrim sürecinin degisik asamalarinda parametre kümelerinin hata enerjisi haritasindaki dagilimlari hazirlanarak Sekil 3.3'de verilmistir.



Şekil 3. 3 GA (sol kolon), ve LGA'nin (sağ kolon) aynı nesildeki bireylerinin hata enerjisi haritasındaki dağılımı. Parametre kümeleri siyah noktalarla gösterilmiştir. (a) 1, (b) 4, (c) 7 ve (d) 10. nesildeki dağılımı göstermektedir

Sekil 3.2 ve Sekil 3.3 incelendiğinde aynı parametrelerle çalıştırılan her iki algoritmanın davranışları arasındaki fark ortaya çıkmaktadır. Buna göre, nesildeki en-düşük çakışmazlık, ortalama çakışmazlık ve topluluk bireylerinin hata enerjisi haritasındaki konumları, başlangıçta benzer özellikler gösterirken üçüncü nesilden sonra belirgin şekilde ayrılmaktadır. Bu da ara adımlarda LGA ile geliştirilen nesillerin daha başarılı döllere vardığını göstermektedir. İlk nesilden başlamak üzere arama uzayına dağılan parametre kümelerinin minimumlara doğru yönlendiği ve ilerleyen nesillerde tamamının global minimum civarında toplandığı gözlenmektedir. Nesiller boyunca ortaya çıkan en-düşük çakışmazlık incelendiğinde, LGA'nin başlangıçtan itibaren evrim sürecini hızlandırdığı söylenebilir. Basit genetik algoritma da on besinci nesilde ulaşılan en-küçük çakışmazlık değerine LGA'nin dördüncü adımında ulaşılmıştır. Nesil sayısının daha fazla artırılması, modellerde anlamlı değişiklikler yaratmadığından her iki algoritma, on besinci nesilde durdurulmuştur. Son adımda her iki algoritma tarafından kestirilen parametre değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3. 1 GA ve LGA yöntemleri ile kestirilen parametre değerleri ve bunlara karşılık gelen çakışmazlıklar

	P ₁	P ₂	?
GA	2.5058	1.4993	0.0147
LGA	2.5000	1.5000	5.10^{-5}

LGA yönteminin, sinama verisinin üretildiği model parametrelerini tam olarak hesaplayabildiği görülmektedir. Ancak, LGA 'nin aynı nesil sayısı için en az iki kat daha fazla çözüm hesaplaması yaptığı da göz önüne alınmalıdır. Bu durumda esit sayıda düz çözüm için bir karşılaştırma yapılsa dahi LGA'nin basit genetik algoritmaya göre daha başarılı olduğu görülmektedir. Sözelimi ele alınan örnek problem için, basit genetik algoritmanın 15 nesil ve 50 topluluk büyüklüğü ile çalıştırılmasından son nesilde elde edilen en-küçük çakışmazlık değerine LGA'da dördüncü nesilde ulaşılmaktadır. Buna göre Lamarckian genetik algoritmanın özellikle modelin çok sayıda parametre ile temsil edildiği problemlerde optimum kullanımı için,

1. Algoritma önceden belirlenen bir çakışmazlık ölçütü sağlandığında durdurularak, son adımda kestirilen parametre değerleri önkestirim olmak

üzere türeve dayalı bir ters-çözüm yönteminin birkaç yinelemesi ile sonuca gidilebilir

2. Basit genetik algortmada hesaplama zamanını artıran büyüklükler olan nesil sayısı ve topluluk büyüklüğünün azaltılması yoluna gidilebilir.

Ancak yapılan denemelerden ikinci seçeneğin çok kullanışlı bir yöntem olmadığı görülmüştür. Topluluk büyüklüğünün azaltılması ile genetik çeşitliliğin azaldığı ve buna bağlı olarak algoritmanın deterministik bölümünün baskın hale geldiği ve global minimuma ulaşılma olasılığının azaldığı gözlenmiştir.

Parametre sayısının göreceli olarak az olduğu problemlerde, her iki algoritmanın hesaplama zamanları arasında kullanıcı tarafından gözlenebilecek belirgin bir fark olmadığı düşünüldüğünde, LGA algoritmasının nesil sayısı ve topluluk büyüklüğünde bir kısıtlama yapılmadan çalıştırılması da düşünülebilir. Model parametresi sayısı fazla olan, düz çözümlerinin ve parametrelerin kısmi türevlerinin karmaşık denklemlerle ifade edilebildiği problemlerde önerilen birinci yolun en uygun yöntem olduğu söylenebilir.

Her iki algoritmanın çalışmasını ve davranışlarını ortaya koymak için seçilen örnek problemin iki adet model parametresi ve modeli tanımlayan oldukça basit bir düz çözümü vardır. LGA'nin daha karmaşık problemlerin çözümündeki başarısı DAÖ verilerinin 2-B ters-çözümü ile denenmiştir. Bu uygulamanın sunulmasından önce bu tez kapsamında geliştirilen modelleme ve ters-çözüm yazılımı ve kuramsal altyapısı ile ilgili bilgiler izleyen bölümlerde verilmiştir.

4. DOGRU AKIM ÖZDIRENÇ YÖNTEMİNDE MODELLEME

DAÖ yönteminde modelleme, yarısonsuz uzay içindeki bir yer elektrik modelinin bir nokta akım kaynagından dolayı olusturdugu gerilim dagiliminin hesaplanmasi olarak tarif edilebilir. Hesaplanan gerilim dagilimi, varsayilan model üzerinde yapılacak DAÖ ölçümlerinde, ölçülmesi beklenen degerlerin sayisal yöntemlerle elde edilen karsiligidir. Gerilim dagiliminin hesaplanması, ölçülen veri ile model parametrelerini birbirine baglayan düz çözüm bagintisi ile yürütülür. Modelleme, model geometrisine bagli olarak, bir-boyutlu (1-B), iki-boyutlu (2-B) ve üç-boyutlu (3-B) yapılabilir. 1-B modellerin yanıtlari analitik olarak hesaplanabilirken, 2-B ve 3-B modellerin yanıtlari için sayisal modelleme yöntemleri kullanilir.

Yer içindeki fiziksel parametre değisiminin çoğunlukla 3-B olduğu düşünülürse, 1-B ve 2-B modelleme ile model yanıtının belli kabul ve varsayımlar çerçevesinde hesaplanabileceği görülür. Buna göre 1-B modellemede yer içinin, kendi içinde tekdüze yatay katmanlardan olustugu, 2-B modellemede ise modelin fiziksel parametresi olan özdirencin yatay yönlerden biri (x) ve derinlik yönünde (z) değistegi, diğer yatay yönde (y) sabit kaldığı kabul edilir. 3-B modellemede parametre değisimi için yön bagimli bir kisiltama ve varsayım yapılmaz.

Önceleri yeriçi, nokta akım kaynagina yaniti analitik olarak hesaplanabilen geometrik sekiller ve yatay katmanlarla açıklanılmaya çalışılmış, daha sonralari, karmasik yer modelleri için sayisal modelleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bunların baslıcalari, sonlu-farklar, sonlu elemanlar ve integral denklemleri yöntemleridir. Bu tez kapsamında da kullanılan sonlu-farklar ile 2-B ve 3-B modelleme için Dey and Morrison'a (1979a ve 1979b) bakilabilir.

4.1 DAÖ Yönteminde İki-Boyutlu Düz Çözüm

Düz çözüm, bir modelin parametreleri ile ölçülmesi beklenen veriyi birbirine bağlayan matematik bağıttır. DAÖ yönteminde, elektrik iletkenliğinin iki boyutlu değistiği yer modellerinin, model yanıtlarının hesaplandığı düz çözüm bağıntısı

$$-\nabla \cdot [\mathbf{S}(x, z)\nabla \mathbf{f}(x, y, z)] = I(x, y, z) \quad (4.1)$$

ile verilir. İletkenliğinin y- yönünde değismediği ($\frac{\partial}{\partial y} [\mathbf{S}(x, y, z)] = 0$) kabulü nedeniyle (4.1) denkleminde akım kaynağı ve gerilim dağılımı x, y ve z'nin fonksiyonu iken, iletkenlik dağılımı x ve z'nin fonksiyonudur. Hesaplama kolaylığı açısından çözüm Fourier bölgesinde (x, k_y, z) yapılip ters dönüşüm ile uzay bölgesine (x, y, z) dönülebilir. Fourier ve uzay bölgeleri arasındaki dönüşüm

$$F(x, k_y, z) = \int_0^{\infty} f(x, y, z) \cos(k_y y) dy \quad (4.2.a)$$

ve

$$f(x, y, z) = \int_0^{\infty} F(x, k_y, z) \cos(k_y y) dk_y \quad (4.2.b)$$

dönüşüm çifti ile yapılabilir. (4.1) denkleminin y- yönünde Fourier dönüşümü alınarak üç-boyutlu gerilim dağılımı $\mathbf{f}(x, y, z)$, iki-boyutlu dönüşük gerilim dağılımına $\mathbf{f}'(x, k_y, z)$ indirgenir :

$$-\nabla \cdot (\mathbf{S}(x, z)\nabla \mathbf{f}'(x, k_y, z)) + k_y^2 \mathbf{S}(x, z)\mathbf{f}'(x, k_y, z) = I(x, k_y, z) . \quad (4.3)$$

Dönüşüm değiskeninin (k_y) farklı değeri için çözülen $\mathbf{f}'(x, k_y, z)$ 'nin ters Fourier dönüşümü alınarak, uzay ortamında iki boyutlu gerilim dağılımı bulunabilir. Denklem (4.3), sayısal yöntemlerden biri ile ayrıklaştırılarak belirli sınır koşulları altında çözülebilir. Bu tez çalışmasında sayısal yöntem olarak sonlu-farklar, sınır koşulları için ise Dey and Morrison (1979) tarafından önerilen karışık sınır koşulları kullanılmıştır.

4.2 DAÖ Yönteminde İki-Boyutlu Düz Çözüm Probleminin Ayrıklaştırılması

Bir yer modelinin yanıtının, sayısal yöntemlerle hesaplanabilmesi için yer içinin sonlu sayıda fiziksel birim ile temsil edilmesi gereklidir. Modeli oluşturan fiziksel birimler belirli bir geometri ve yöntemle bağlı olarak bir fiziksel büyüklük ile tanımlanırlar. DAÖ yönteminde 2-B modelin geometrisi ve boyutları, ölçüm sistemi, modellenecek yapı ve kullanılacak sayısal yöntemle bağlı olarak seçilir. Modelin parametreleri ise her bir birimin özdeşidir. Model parametrelerinin sayısı, veri sayısı ve içeriğine bağlıdır. 2-B modellemede, model birimleri genellikle, y- yönünde sonsuza uzanan dikdörtgen bloklardır.

Izleyen bölümde modelin parametreleştirilmesi, sonlu-farklar ağı ve sonlu-farklar denklemlerinden oluşan doğrusal denklem sisteminin çözümü anlatılmıştır. Kuramsal altyapısı yeterince anlaşılmış olan konu, bilinen denklemlerin tekrarlanması yerine uygulamaya dönük olarak anlatılmaya çalışılmıştır.

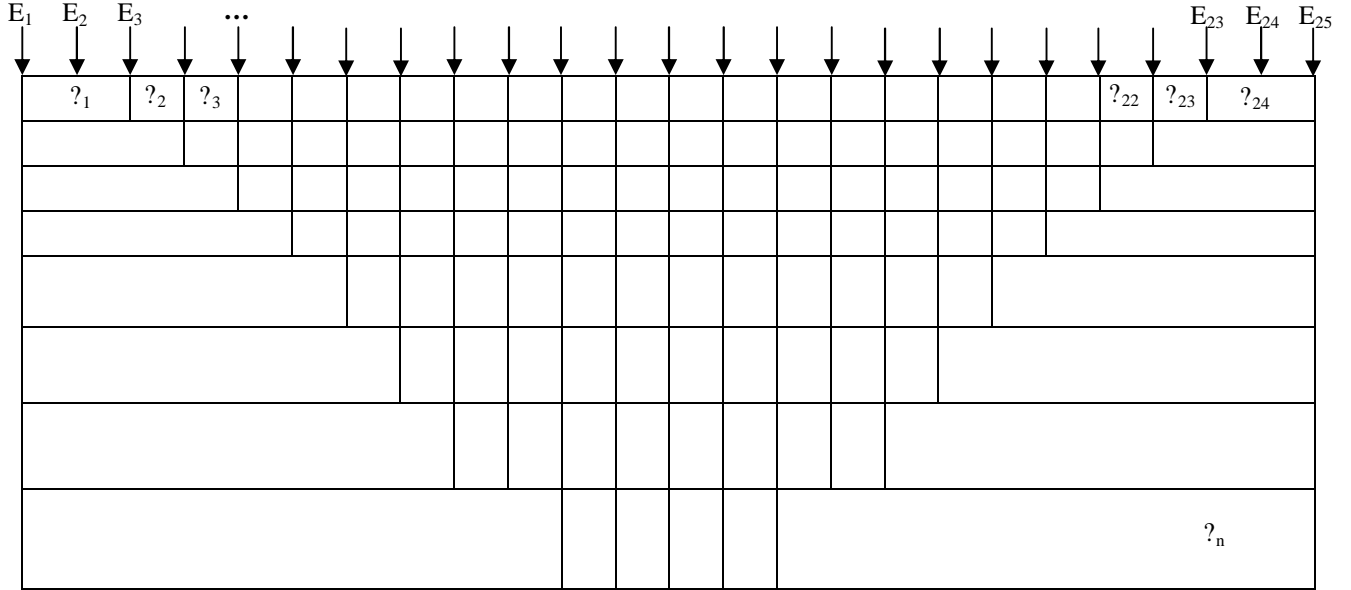
4.2.1 Modelin Parametreleştirilmesi

Günümüzde, DAÖ ölçümleri yaygın olarak çok kanallı ölçüm sistemleri ile yapılmaktadır. Modelin parametreleştirilmesi ve sonlu-farklar ağına oluşturulmasında, ölçümlerin böyle bir sistemle yapıldığı varsayımından yola çıkılmıştır. Çok kanallı ölçüm sistemlerinde elektrotlar genellikle eşit aralıklarla dizilerek, aynı anda sisteme bağlanır. Bilgisayar denetimli bir birim ile akım ve gerilim elektrotları değiştirilerek, ölçümler yürütülür. Ölçümler, aynı elektrot yerleşimi ile farklı elektrot dizilimleri için yapılabilir. İzleyen bölümler bu tez çalışması kapsamında geliştirilen modelleme algoritması ışığında anlatılmıştır. Aynı algoritma küçük değişiklikler ile geleneksel ölçüm sistemleri için de kullanılabilir. Elektrotların eşit aralıklı dizilmesi ve modeldeki bazı simetri özellikleri hesaplama zamanında belirgin bir iyileşme sağlamaktadır.

İlk olarak yer içi, ölçüm düzenegi ve verideki bilgi içerigine bagli olarak parametrelestirilir. Parametrelestirme islemi 2-B modelleme için yer içinin dikdörtgen bloklara bölünmesi anlamına gelir. Modelin sinirli sayıda parametre ile temsil edilmesi hesaplama işlemlerinin yürütülebilmesi için bir zorunluluktur. Modelin sinirli sayıda parametre ile yalinlastirilmasında, eksik parametrelestirme veride olan bilginin kullanılmaması, asiri parametrelestirme ise veriden kapsamadigi bilginin elde edilmeye çalışılması olarak adlandırılır.

Model hücreleri, düşey yönde araştırma derinligine bagli olarak en az bir veri noktası ile temsil edilebilecek şekilde yerlestirilmistir. Birim elektrot araligi için farklı elektrot dizilimlerinin araştırma derinligi Çizelge 4.1'de verilmistir. Düşey yöndeki hücre sayısı maksimum araştırma derinligi ve veri sayısına bagli olarak kullanıcı tarafından seçilebilir ya da algoritma bu sayiyi otomatik olarak hesaplayabilir. Yatay yöndeki model hücreleri her bir elektrot arasına bir hücre gelecek şekilde yerlestirilmistir. Veri bulunmayan noktalarda hücre sağa ya da sola doğru uzatılmistir.

Sekil 4.1' de örnek bir ölçüm düzenegi için tasarlanmış bir model ağı verilmistir. Model ağı yer içini temsil etmek üzere oluşturulurken, hesaplamalar, sonlu-farklar ağı üzerinden yürütülmektedir. Ölçüm düzenegi esit aralıklarla yerlestirilmiş 25 elektrottan oluşmaktadır. Elektrotların farklı kombinasyonları ile değişik dizilimler için model yanıtları hesaplanabilir ya da bir elektrot dizilimi için hesaplanan görünür özdirençler diğerlerine dönüştürülebilir. Bir elektrot dizilimi ile hesaplanan ya da ölçülen görünür özdirençlerin bir diğerine çevrilmesi ile ilgili olarak Basokur'a (1983) bakılabilir.



Sekil 4. 1 Çok-kanalli DAÖ ölçüm sisteminde elektrotların konumu ve buna bağlı olarak tasarlanan model ağı

Çizelge 4. 1 Bazi elektrot dizilimleri için ortalama araştırma derinlikleri (Edwards, 1977). Değerler 1 metre elektrot aralığı için hesaplanmıştır. z_c/a birim elektrot aralığına, z_c/L toplam dizilim boyuna göre araştırma derinliğini göstermektedir

Elektrot Dizilimi		z_c/a	z_c/L
Wenner		0.519	0.173
Dipol-dipol	n = 1	0.416	0.139
	n = 2	0.697	0.174
	n = 3	0.962	0.192
	n = 4	1.220	0.203
	n = 5	1.476	0.211
	n = 6	1.730	0.216
	n = 7	1.9823	0.220
	n = 8	2.236	0.224
Wenner- Schlumberger	n = 1	0.519	0.173
	n = 2	0.925	0.186
	n = 3	1.318	0.189
	n = 4	1.706	0.190
	n = 5	2.093	0.190
	n = 6	2.478	0.191
	n = 7	2.863	0.191
	n = 8	3.247	0.191
	n = 9	3.632	0.191
	n = 10	4.015	0.191
Pol-dipol	n = 1	0.519	
	n = 2	0.925	
	n = 3	1.318	
	n = 4	1.706	
	n = 5	2.093	
	n = 6	2.478	
	n = 7	2.863	
	n = 8	3.247	
Pol-pol		0.867	

4.2.2 Sonlu-farklar Ağı

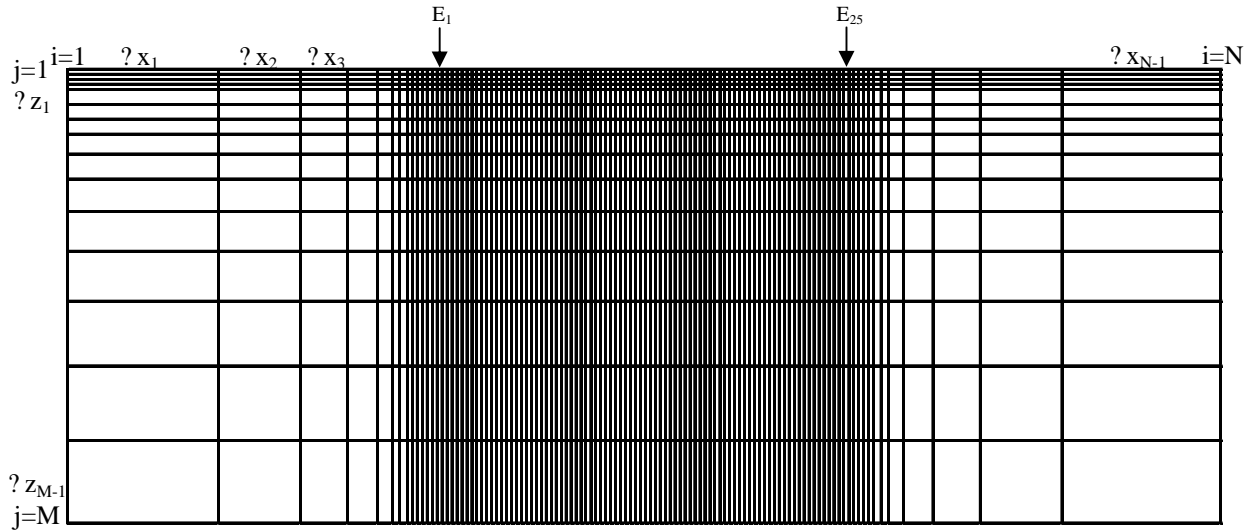
Jeofizikte karşılaşılan düz çözüm bağıntıları genellikle çok sayıda değişkene bağlı sürekli fonksiyonlardır. Sürekli bir fonksiyonun ayrik noktadaki değerlerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemlerden biri sonlu-farklar yöntemidir. Sonlu-farklar yöntemi ile değeri bir takım ayrik noktalarda bilinen fonksiyonun, değeri bilinmeyen noktalardaki davranışı tahmin edilebilir. Buna göre, DAÖ yönteminde 2-B modellemeye kullanılan Poisson denklemi sonlu-farklar yöntemi ile çözülerek bir ağı üzerindeki tüm ayrik noktalarda, nokta akım kaynagından oluşan gerilimler hesaplanabilir. Sonlu-farklar yönteminde hesaplanmaya çalışılan büyüklüğün bir takım noktalarda bilinen değerlerinden bilinmeyen noktalardaki değeri tahmin edilmeye çalışıldığından, Şekil 4.1'de verilen ağı sayısal hesaplamalar için yeterli olmaz. Yatay ve dikey yönlerdeki keskin geçişler sayısal duyarsızlığa neden olduğundan model daha sık bir ağı ile örülür. Dikey yönde, yüzeye yakın bölgelerde hücreler daha sık yerleştirilirken, artan derinlikle birlikte hücrelerin z- yönündeki boyutları büyütülür. Yatay yönde ise, ilk ve son elektrot arasındaki model hücreleri, her bir komşu elektrot arasında dört düğüm noktası yer alacak şekilde eşit olarak bölünmüştür. Bu aralıktaki model hücrelerinin ikiye bölünmesi ile oluşturulan sonlu-farklar ağı, modelin fiziksel parametreleri arasında keskin değişimlerin olmaması durumunda yeterli olurken, dörtten daha fazla parçaya bölünmesinin sayısal bir getirisinin olmadığı yapılan deneylerde görülmüştür.

Denklem (4.1) ile verilen düz çözüm bağıntısı yarı sonsuz uzay için çözüleceğinden, sonlu-farklar ağı, sağ, sol ve alt sınırından uzatılarak yarı sonsuz sınırlar oluşturulur. Böylece $x = \mp\infty$ ve $z = \infty$ sınırlarının sağlandığı varsayılır. Yarı sonsuz sınırları oluşturmak için eklenen model hücrelerinin, x- ve z- yönündeki boyutları yine sayısal hesaplamaların sağlıklı yürütülebilmesi açısından dereceli bir geçişle büyütülmelidir. Böylece ağı sınırlarındaki düğüm noktalarında gerilimin asimptotik bir davranış göstermesi için, bu noktaların kaynaktan yeterince uzakta olması sağlanmış olur.

Sonlu-farklar yöntemi temel olarak, dikeyde M ve yatayda N adet düğüm noktası ile tanımlanan dikdörtgen ağı her bir düğüm noktasındaki gerilimin hesaplanmasını sağlar. Sonlu-farklar ağı, M-1 satır ve N-1 sütun dikdörtgen hücreden oluşur. Ağı üzerindeki düğüm noktaları sol üst köşeden başlamak üzere dikey yönde artan şekilde numaralandırılmıştır. Ayrıca, düğüm

noktaları i sütun ve j satır numarası olmak üzere (i, j) şeklinde ikili olarak da numaralandırılmıştır.

Sekil 4.2’de verilen sonlu-farklar ağında ilk elektrot sol üst köşeden itibaren on birinci ($i = 11, j = 1$) yatay düğüm noktasına yerleştirilmiştir. Benzer şekilde son elektrot ile ağın sağ üst köşesi arasında 11 düğüm noktası ve birbirine komşu her iki elektrot arasında 4 düğüm noktası bulunmaktadır. Hücrelerin düşey yöndeki boyutları, yüzeye yakın yerlerde elektrotlar arası uzaklığın $\frac{1}{4}$ ’ünü geçmeyecek ve artan derinlikle birlikte dereceli olarak büyüyecek şekilde seçilmiştir. Maksimum araştırma derinliğinin altındaki derinliklerde, düşey yöndeki hücre boyutları daha hızlı büyütülerek yapay sonsuz sınırlar oluşturulmuştur. Buna göre yirmi beş elektrotlu bir ölçüm sistemi için tasarlanan ve Sekil 4.2’de verilen sonlu-farklar ağı 117x18 düğüm noktasından oluşmaktadır. Bir örnek teşkil etmesi açısından 1 metre elektrot aralığı için tasarlanan ağın yatay ve düşey yöndeki hücre boyutları Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Sekil 4. 2 Sonlu-farklar ağı

Çizelge 4. 2 Sonlu-farklar agındaki hücrelerin boyut ve konumlari. Son elektrottan sonra gelen hücrelerin x- yönündeki boyutlari ters sirada olmak kosuluyla ilk on bir hücrenin boyutlarına esittir

x- yönünde			z- yönünde		
Sıra no (i)	Hücre boyutu (? x _i)	Yatay konum (x)	Sıra no (j)	Hücre boyutu (? z _j)	Derinlik (z)
1	32	0.00	1	0.25	0.25
2	16	32.00	2	0.25	0.50
3	8	48.00	3	0.25	0.75
4	4	56.00	4	0.25	1.00
5	2	60.00	5	0.55	1.55
6	1	62.00	6	0.60	2.15
7	0.5	63.00	7	0.67	2.82
8	0.25	63.50	8	0.73	3.55
9	0.25	63.75	9	0.80	4.36
10	0.25	64.00	10	0.89	5.25
11	0.25	64.25	11	1.77	7.02
12	0.25	64.50	12	3.54	10.56
13	0.25	64.75	13	7.09	17.65
14	0.25	65.00	14	14.17	31.82
15	0.25	65.25	15	28.35	60.17
16	0.25	65.50	16	56.69	116.86
17	0.25	65.75	17	113.38	230.24
...			

4.2.3 Doğrusal denklem sisteminin çözümü

(4.1) denkleminin 2-B sonlu-farklar aginin her düğüm noktası için ayrıklaştırılması (Dey and Morrison, 1979) ve sinir kosullarının uygulanması ile her bir düğüm noktası için bir sonlu-farklar denklemi yazilir. Tüm düğüm noktaları için yazılan fark denklemleri birleştirilerek doğrusal denklem sistemi elde edilir. Sonlu-farklar agındaki iki boyutlu gerilim dağılımının çözülmesini sağlayan doğrusal denklem sistemi dizey gösterimi ile

$$A\mathbf{f} = S \quad (4.3)$$

sekinde ifade edilir. A , (katsayi dizeyi) ag üzerindeki dügüm noktalarinin birbirleriyle baglantilarini belirleyen katsayilari içerir. Katsayi dizeyi, NM , agdaki toplam dügüm sayisi olmak üzere $NM \times NM$ boyutlarında seyrek ve kösegen bir dizeydir. Katsayi dizeyinin elemanlarinin hesaplanmasi EK-1'de verilmistir. f , k_y bölgesinde tüm dügüm noktalarındaki gerilimleri içeren dizeydir. S ise kaynak dizeyi olarak adlandırilir ve $NM \times 1$ boyutundadir. Kaynak dizeyinin akim kaynaginin bulundugu dügüm noktasidaki tüm elemanlari sifirdir.

K dizeyi, pozitif tanimli, bakisimli ve seyrek olmak üzere, $Kx = b$ sekinde verilen dogrusal denklem sistemlerinin çözümü için önerilen en iyi yöntem Cholesky ayrisimidir (Cholesky decomposition). Buna göre, $RR^T = K$ esitligini saglayan gerçel, tekil olmayan bir R alt üçgen dizeyi bulunabilir. K dizeyi, Cholesky ayrisimi ile parçalandiktan sonra dogrusal denklem sistemi iki adimda çözülebilir:

$$Ry = b, \quad (4.4a)$$

$$R^T x = y. \quad (4.4b)$$

A dizeyi, ag geometrisi ve fiziksel parametre dagilimina bagli oldugundan, kaynagin farkli konumlari için yeniden hesaplanmasi ve ayristirilmesi gerekmez. Ancak k_y dönüşüm degiskeninin farkli degerleri için A ve R yeniden hesaplanmalidir.

Cholesky ayrisimi ve dogrusal denklem sistemlerinin çözümünü yapan alt programlar bu tez kapsamında da kullanılan yeni nesil programlama dillerinin çoğunun kütüphanelerinde bulunmaktadır. Örneğin Matlab programlama ortamında, A dizeyinin Cholesky ayrisimi ile parçalanmasi $R = chol(A)$ komutuyla; benzer sekilde, $Af = S$ denklem sisteminin çözümü Cholesky ayrisimindan sonra $PHI = R \setminus (R \setminus S)$ komutu ile gerçekleştirilebilir. R dizeyinin elamanlari, $i = 1, 2, \dots, NM$ ve $j = 1, \dots, NM$ olmak üzere izleyen denklemler ile de hesaplanabilir:

$$R_{ji} = (A_{ji} - \sum_{k=1}^{i-1} A_{jk} A_{ik}) / A_{ii}, \quad (4.5)$$

$$R_{ii} = \sqrt{(A_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} R_{ik}^2)}. \quad (4.6)$$

4.2.4. Dönüşük Gerilimin Ters Fourier Dönüşümü ile Gerilime Dönüştürülmesi

Sonlu-farklar ağıının tüm düğüm noktalarında $f(x, k_y, z)$ dönüşük gerilim değerlerinin hesaplanması önceki bölümde anlatılmıştır. Gerilimin (x, y, z) bölgesinde hesaplanabilmesi için, $f(x, k_y, z)$ 'nin $0 < k_y < \infty$ aralığını temsil etmek üzere, belirli sayıdaki k_y değeri için çözülmesi gereklidir. Bu tez kapsamında geliştirilen modelleme yazılımında 7 adet k_y değeri kullanılmış ve doğrusal denklem sistemi her bir k_y için yeniden çözülmüştür. Dönüşüm değişkeni k_y 'nin değerleri ağ boyutlarına bağlıdır. Bir ağ için optimize edilen değerler farklı ağ tasarımı için geçerli olmayacaktır. Çizelge 4.2'de boyutları verilen sonlu-farklar ağı için seçilen k_y katsayıları [0.0008 0.0026 0.0161 0.0476 0.2002 0.4160 5.0955] şeklindedir. Verilen değerler, birim elektrot aralığı için optimize edilmiş ve elektrot aralığı ya da toplam profil boyuna bağlı bir katsayı ile çarpılarak farklı ağ boyutları için genelleştirilmiştir.

$f(x, k_y, z)$ 'nin ters Fourier dönüşümü (4.2.b) denkleminin sayısal integrasyonu ile bulunabilir. Sayısal integral alma işlemi ardisik her iki k_y aralığında ($k_{y1} \leq k_y \leq k_{y2}$) $f(k_y)$ 'nin zarfının bir üstel fonksiyona çakıştırılması ve izleyen denklem ile verilen genel bağıntının kullanılması ile yürütülebilir:

$$\int_{k_{y1}}^{k_{y2}} e^{-ak_y} \cos(k_y b) dk_y = \frac{e^{-ak_y}}{(a^2 + b^2)} \cdot [b \sin(bk_y) - a \cos(bk_y)] \Big|_{k_{y1}}^{k_{y2}}. \quad (4.7)$$

$f(x, y, z)$, (4.7) denkleminin $k_{y_{i-1}} \leq k_y \leq k_{y_i}$ aralıklarındaki parçali integralin sayisal degerlerinin toplamından bulunabilir. Ters Fourier dönüşümü için yazılan Matlab alt programi EK-2’de verilmistir.

4.2.5 Görünür Özdirenç Yapma-kesitinin Elde Edilmesi

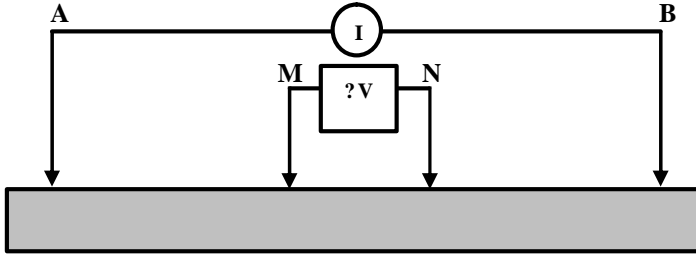
İki boyutlu yer modelinin nokta akim kaynagından dolayi olusturdugu gerilim dagiliminin hesaplanmasi önceki bölümlerde anlatilmistir. Ancak elektrik yöntem uygulamalarında kullanılan fiziksel parametre özdirençtir. DAÖ yönteminde ölçülen nicelik olan gerilim farki ile özdirenç arasında tekdüze yarisonsuz uzay için geçerli izleyen baginti yazilir:

$$\mathbf{r} = k \frac{\Delta V}{I} . \quad (4.8)$$

(4.8) denkleminde ρ , özdirenci, k , elektrotların konumuna bagli geometrik faktörü, ΔV gerilim farkini, I ise akimi göstermektedir. Gerçekte yer içi tekdüze degildir ve fiziksel özellikler genellikle üç boyutlu olarak degismektedir. Bu nedenle ölçülen gerilim farklarının (4.8) denkleminde yerine konulmasi ile hesaplanilacak özdirenç, yerin gerçek özdirencini vermez. Bu sekilde hesaplanan özdirenç “görünür özdirenç” olarak adlandırilir. Dört elektrotlu genel bir elektrot dizilimi için (Sekil 4.3) görünür özdirenç bagintisi,

$$\mathbf{r}_a = \frac{2\rho}{\frac{I}{AM} - \frac{I}{AN} - \frac{I}{BM} + \frac{I}{BN}} \cdot \frac{V_M - V_N}{I} \quad (4.9)$$

ile verilir.



Sekil 4.3 Dört elektrotlu öz direnç ölçüm düzenegi

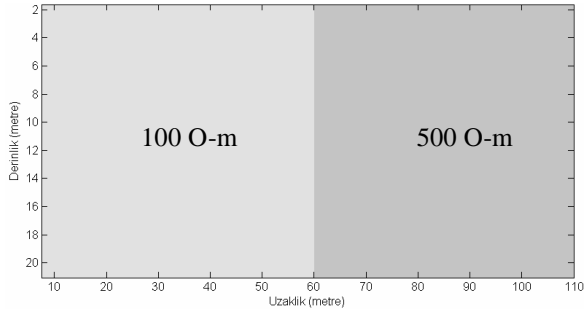
DAÖ yönteminde 2-B veri toplama, bir profil boyunca yerleştirilen dikey elektrik sondajı istasyonlarında akım elektrotlarının aralarındaki uzaklığın profil doğrultusunda açılması ile yürütülür. Tüm veri noktalarında (4.9) denklemi ile hesaplanan görünür öz direnç değerlerinden, yer içindeki öz direnç dağılımı hakkında genel bir bilgi vermek üzere yer yapma-kesitleri hazırlanarak sunulur. Yapma-kesitler genellikle, dikey eksen elektrot dizilimine bağlı olarak $AB/2$, $AB/3$ ya da $AB/4$, yatay eksen ise profil doğrultusunda uzaklık olmak üzere görünür öz direnç değerlerinin konturlanması ile oluşturulur. Yapma-kesitlerin dikey eksen için bir diğer seçenek ise yapma-derinliktir (Edwards, 1977). Yapma-derinlik, etkin derinlik ya da araştırma derinliği olarak adlandırılır ve elektrotların konum ve dizilimlerine bağlıdır (Çizelge 4.2).

4.2.6 Gelistirilen Modelleme Yazılımının Denenmesi

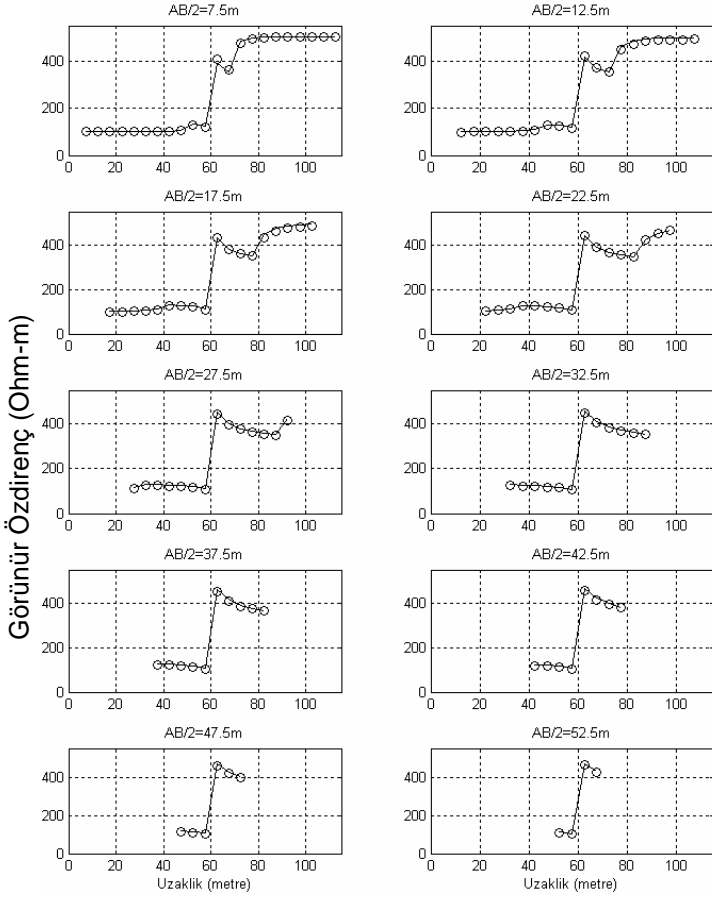
Bu tez kapsamında, DAÖ yönteminde 2-B modellemenin bilgisayar ortamında sayısal olarak yürütülmesi amacıyla bir yazılım geliştirilmiştir. Bu asamada, yeni kusak bir programlama dili olan Matlab kullanılmıstir.

Modelleme, aynı zamanda ters-çözümün bir parçasıdır. Geleneksel ters-çözüm yöntemlerinde hesaplama zamanının büyük bölümünü parametrelerin kısmi türevlerinin hesaplanması almaktadır. Genetik algoritmada parametrelerin kısmi türevleri hesaplanmaz ancak, bazen

binlerce kez düz çözüm yapılması gerekebilir. Özellikle genetik algoritmanın hesaplama zamanının azaltılması için düz çözüm yazılımın çalışma süresinin azaltılması düşünülmüştür. Bu noktada programlama ortamının kütüphanelerinden faydalanılmıştır. Dizey işlemleri ve doğrusal denklem sisteminin çözülmesi için tasarlanmış alt programlar ilgili kütüphanelerden çağırılarak kullanılmıştır. Bu sayede Şekil 4.2’de verilen yer modeli ve 22 istasyonlu ölçüm düzenegi için model yanıtının hesaplanma süresi Pentium IV işlemcili bir bilgisayarda 1 saniyenin altına (0.7-0.8 sn) düşürülmüştür. Yazılımın optimizasyonu aşamasında tekdüze yarı sonsuz yer modeli kullanılmıştır. Tekdüze, yarı sonsuz yer modelinde hesaplanan görünür özdirenç gerçek özdirence esit olmalıdır. Bundan dolayı, hesaplanan görünür özdirençlerin model hücrelerine atanan özdirençlere esit olması beklenir. Sonlu sayıda ayrik nokta ile çalışıldığından tekdüze ortam için hesaplanacak görünür özdirenç değerleri hiçbir zaman ortamın özdirençine esit olmayacaktır. Bununla birlikte doğru tasarlanmış bir sonlu-farklar ağı ve uygun Fourier dönüşüm (k_y) katsayılarının seçilmesi durumunda gerçek özdirence oldukça yakın değerler hesaplanır. Geliştirilen yazılımda, tekdüze ortam için, hesaplanan ve gerçek özdirençler arasındaki fark %3 civarındadır. 2-B yer modellerinin yanıtının doğru hesaplanıp hesaplanmadığının denemesi amacıyla ise düşey fay blokları modeli (Şekil 4.4) kullanılmıştır. Verilen modelin yanıtı analitik olarak hesaplanabilmektedir. Hesaplamalarda kullanılan elektrot dizilimi es merkezli dört elektrot dizilimi (Wenner-Schlumberger) ve elektrot aralığı 5 m’dir. Analitik olarak ve geliştirilen yazılım ile hesaplanan görünür özdirenç profil eğrileri Şekil 4.5’de verilmiştir. Tüm seviyelerde iki eğri arasında uyum gözlenmektedir.



Şekil 4.4 Düşey fay modeli



— Analitik ○ SF ile hesaplanan

Şekil 4.5 Deneme amaçlı kullanılan yer modeli için profil eğrileri

5. DOGRUSAL OLMAYAN PROBLEMLERİN TERS-ÇÖZÜMÜ

Jeofizikte ters-çözüm, ölçülen bir veri kümesi ile uyumlu kuramsal veriyi üreten modeli bulma işlemi olarak tarif edilebilir. Model, bir yer kesiti ya da hacminin sayısal parametreler ile temsil edilen gösterimidir. Geleneksel ters-çözüm yöntemlerinde ölçülen veri ile uyumlu kuramsal veriyi üreten model, bir başlangıç modelinin yinelemeli olarak iyileştirilmesi yoluyla bulunulmaya çalışılır. Modeldeki iyileştirme, parametrelerin kuramsal veriye göre türevleri kullanılarak yapılır. Doğrusal olmayan problemlerde, parametreler doğrudan hesaplanamadığından, model parametreleri için bir ön-kestirimde bulunulur. Model parametrelerinin gerçek değerleri ile yorumcu tarafından sağlanan ön-kestirim değerleri arasındaki fark, yapılacak düzeltmeler ile azaltılabilir. Parametreler için sağlanan ön-kestirimler, p^o ve ön-kestirime yapılacak düzeltmeler Δp ile gösterilirse, parametrelerin gerçek değerlerine bir yaklaşım izleyen düzey denklemi ile bulunabilir:

$$p = p^o + \Delta p . \quad (5.1)$$

Parametre düzeltme düzeyi, çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir. Bunların başlıcaları, en-dik inis, Gauss-Newton ve sönümlü en-küçük kareler yöntemleridir.

En-dik inis yöntemi, ön-kestirim modelinin yanlış enerji haritası üzerinde düştüğü noktadan başlayarak yanlış enerji haritasında eğim aşağı ilerleme ve bu sayede yanlışlığın daha düşük olduğu bir noktaya ulaşma temeline dayanır. En-dik inis yönteminde, adım büyüklüğünü belirleyen katsayı C , kuramsal verinin ön-kestirim parametrelerine göre kısmi türevleri J , ve ölçülen - kuramsal veriler arasındaki fark d ile gösterilmek üzere parametre düzeltme düzeyi,

$$\Delta p = CJ^T \Delta d \quad (5.2)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Hesaplanan düzeltmeler, ön-kestirim değerlerine eklenerek yeni parametre değerleri elde edilir. Yeni parametre değerleri yanlış enerji haritasında daha düşük yanlışlığı gösteren bir kontura yaklaşıyor. Ancak parametrelerin gerçek değerlerinin bulunması için, düzeltilmiş değerler, yeni bir adımın ön-kestirim değerleri olarak verilmek

üzere yineleme yapılarak yanlış enerji haritasında eğim aşağı ilerlenmeye devam edilmelidir. En-dik iniş yöntemi, yanlış enerji konturlarına dik yönde eğim aşağı ilerlediğinden en yakın minimuma yönlenecek ve minimuma ulaştığında duracaktır. Bu sebeple en-dik iniş yöntemi ile parametrelerin gerçek değerlerinin bulunabilmesi için, parametreler için sağlanan ön-kestirim değerlerinin parametrelerin gerçek değerlerine yakın olması başka bir deyişle yanlış enerji haritasında global minimumu kapsayan vadi civarına düşmesi gerekmektedir.

Parametre düzeltme düzeyinin hesaplanmasında kullanılan bir diğer yöntem Gauss-Newton yöntemidir. En-dik iniş yönteminden farklı olarak Gauss-Newton yöntemi, parametreler için sağlanan ön-kestirimlerin, parametrelerin gerçek değerlerine yakın olduğu varsayımı ile doğrudan çözüme yönelme temelinde geliştirilmiştir. Buna göre kuramsal verinin üretildiği düz çözüm bağıntisi çözüm civarında Taylor serisine açılarak ikinci ve daha yüksek dereceli terimler ihmal edilir. Bu sayede parametrelerin gerçek değerlerinden hesaplanacak veriye bir yaklaşım yapılır. Bu yaklaşımın, ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki farkların karelerinin toplamı olarak tanımlanan yanlış enerji bağıntisinde yerine konulması ve bu bağıntinin parametre düzeltme düzeyine göre kısmi türevlerinin alınarak sifra esitlenmesi ile,

$$\Delta p = (J^T J)^{-1} J^T \Delta d \quad (5.3)$$

elde edilir. En-dik iniş yöntemine benzer olarak, hesaplanan düzeltmeler ön-kestirim değerlerine eklenerek parametrelerin yeni değerleri bulunur. Bulunan değerlerin, yanlış enerjisini düşürüp düşürmediği denenerek yineleme işlemine devam edilir. Yeni parametre değerlerinin yanlış enerjisini artırması durumunda algoritma durarak başarılı son yinelemenin sonuçlarını verecektir.

Geleneksel ters-çözüm yöntemlerinde parametre düzeltme düzeyi, kuramsal veri kümesinin parametrelere göre kısmi türevlerine dayanılarak hesaplandığından, verinin parametrelerle ilgili yeterli bilgiyi içermesi gerekir. Eğer veri parametrelerin bazılarının çözümü için yeterli bilgiyi kapsamıyorsa, kısmi türevler düzeyinin o parametrelerle ilgili elamanları sifra yaklaşıp. Bu durum düzey tersleme işlemlerinde sayısal duragansızlıklara neden olur. Duraganlığın sağlanması amacıyla (5.3) denklemde, kısmi türevler düzeyi ve onun dönüğünün çarpımı olan $J^T J$

dizeyinin köşegenine sayısal bir değer eklenerek parametre düzeltme dizeyini veren denklem,

$$\Delta p = (J^T J + \mathbf{e}^2 I)^{-1} J^T \Delta d \quad (5.4)$$

şeklinde yeniden yazılabilir (Lines and Treitel, 1984). Burada, \mathbf{e}^2 sönüm faktörü, (Marquardt parametresi) I ise birim dizeydir. (5.4) denklemi doğrusal olmayan problemlerin sönümlü en-küçük kareler ya da Levenberg-Marquardt çözümü olarak adlandırılır.

(5.3) ve (5.4) denklemleri ile verilen Gauss-Newton ve sönümlü en-küçük kareler yöntemlerinde parametre düzeltme dizeyinin hesaplanabilmesi için, dizey tersleme işlemlerine gereksinim vardır. Burada ve jeofizik problemlerin bir çoğunun ters-çözümünde dizey tersleme işlemleri için tekil değer ayrışımı (SVD) yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Yöntem, $M \times N$ boyutlarında ve satır sayısı, sütun sayısına eşit ya da büyük olan bir dizeyin, U , S ve V^T gibi üç dizeyin çarpımı olarak yazılabileceği kuramına dayanır. U , $M \times N$ boyutlarında dik (ortogonal) bir dizey, S , $N \times N$ boyutlarında köşegen bir dizey ve V , $N \times N$ boyutlarında dik bir dizeydir.

(5.4) denkleminde, J dizeyi tekil değer ayrışımı ile parçalanır ve yerine yazılırsa izleyen sönümlü en-küçük kareler SVD çözümü elde edilir:

$$\Delta p = V \operatorname{diag} \left\{ \frac{I_j}{(I_j^2 + \mathbf{e}^2)} \right\} U^T \Delta d . \quad (5.5)$$

V ve U dizeyleri sırasıyla parametre ve veri özdeğerlerini içerir. S , S dizeyinin köşegeninde yer alan parametre özdeğerleridir.

Bir dizeyin SVD ile parçalanmasını yapan alt programlar bir çok programlama dili için yazılmış ve yayınlanmıştır. Yeni nesil programlama dillerinde SVD, programlama ortamının kütüphanesinde bulunan hazır alt programlar ile kolayca yapılabilir. Dizey tersleme işlemi için SVD dışında Gaussian eksiltme ve LU ayrışımı gibi yöntemler de kullanılmaktadır.

5.1 DAÖ Verilerinin 2-B Sönümlü En-küçük Kareler Ters-çözümü

Ters-çözüm işlemi, ön-kestirim modelinden hesaplanan kuramsal veri ile ölçülen veri arasındaki farkların en-küçüklenmesi temelinde yapılmaktadır. Ters-çözüm işleminin son adımında bir yer kesitindeki fiziksel parametre dağılımının belli bir geometriye göre bulunduğu varsayılır. 2-B yer elektrik modellerine ait verilerin ters-çözümünde bulunulmaya çalışılan parametreler model hücrelerinin özdirençleridir. Model geometrisini tanımlayan hücre boyutları, ters-çözüm işleminde değişken parametreler değildir. DAÖ yönteminin temel parametresi olan özdirenç doğada çok büyük aralıklarda değişim gösterdiğinden, parametre ve veri uzaylarının logaritmik ortamda tanımlanması problemin bir miktar doğrusallaştırılması için başvurulan genel bir yoldur.

Bir yer kesitindeki iki-boyutlu özdirenç dağılımını incelemek üzere yapılan DAÖ ölçümlerinden elde edilen n adet veri,

$$d = [d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_n]$$

yöneyi ile gösterilsin. Benzer şekilde kuramsal veri

$$f = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n]$$

ile verilen f yöneyi ile gösterilebilir. Ölçülen ve kuramsal veri kümesi arasındaki fark,

$$\Delta d = \log(d) - \log(f)$$

ile verilir ve veri fark dizeyi olarak adlandırılır. En-küçük kareler yöntemi, izleyen denklem ile tanımlanan amaç fonksiyonunun en-küçüklenmesi üzerine kuruludur:

$$E(p) = \Delta d^T \Delta d = \sum_{i=1}^n (\log(d_i) - \log(f_i))^2 \quad (5.6)$$

(5.6) denklemi ile verilen yanilgi değerinin küçültülmesi için parametrelerde yapılması gereken düzeltmeler (5.5) denklemi ile hesaplanabilmektedir. (5.5) denkleminin kurulabilmesi için, parametrelerin

veriye göre kısmi türevlerini içeren Jacobian dizeyinin hesaplanması gereklidir.

5.1.1 Kısmi Türevler Dizeyinin Hesaplanması

Kısmi türevler dizeyinin elemanları,

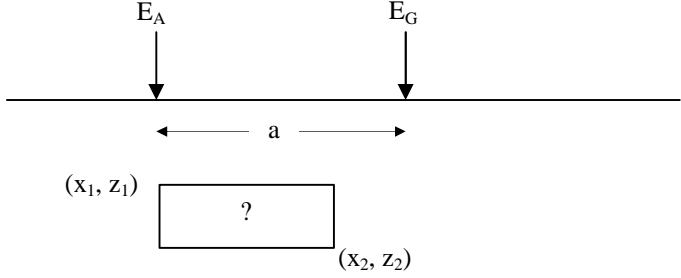
$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial p_j}$$

ile verilir ve j numaralı parametredeki değişimin, i numaralı kuramsal veride meydana getirdiği değişimi gösterir. M veri sayısını, N ise parametre sayısını göstermek üzere Jacobian dizeyi $M \times N$ boyutundadır. DAÖ yönteminde, kısmi türevler dizeyinin hesaplanması ile ilgili çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Loke and Barker (1995) tarafından önerilen yol, tekdüze bir yer modeli için kısmi türevler dizeyinin analitik olarak hesaplanmasıdır. Bu yöntemde bir dikdörtgen hücrenin kısmi türevi, yalnızca hücre köşelerinin x ve z koordinatlarının, elektrot aralığına oranına bağlıdır. Elektrot aralıkları eşit tutulur ve ters-çözüm modeli de benzer şekilde parametrelendirilirse bu oran elektrotlar arası uzaklığın farklı değerleri için değişmez. Bu durumda kısmi türevler dizeyi bir kez hesaplanıp diskte saklanır ve gerektiğinde buradan çağrılarak kullanılabilir. Loke and Barker (1995) tarafından önerilen yöntemde yineleme işlemine, tekdüze yer modeli ön-kestirimi ile başlanır. Tekdüze yer modeli için hesaplanıp saklanmış olan kısmi türevler dizeyi okunarak parametre düzeltme dizeyi hesaplanır. Buna göre Şekil 5.1'de verilen model hücresi için $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{r}$ kısmi türevi,

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{I_s}{4\mathbf{p}^2} \int_{z_j}^{z_i} \int_{x_j}^{x_i} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} dy dx dz \quad (5.7)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. (5.7) bağıntısının basit bir analitik çözümü bulunmadığından hesaplamalar sayısal integrasyon ile yürütülür (Loke and Barker, 1995). (5.7) denkleminin değerlerinin pol-pol dizilimi için hesaplanıp diske kaydedilmesi yeterlidir. Diğer elektrot dizilimleri için kısmi türevler dizeyi elektrot dizilimleri için ölçülen görünür özdirençlerin birbirine çevrilmesine benzer şekilde bu değerlerden hesaplanabilir.



Sekil 5. 1 Bir model hücrenin kısmi türevinin hesaplanması için gerekli parametreler. E_A ve E_G , sırasıyla akım ve gerilim elektrotlarını göstermektedir

Sonraki yineleme adımlarında kısmi türevler dizeyi, parametrelerde ve kuramsal verideki değişime bağlı olarak güncellenir (Quasi-Newton yöntemi, Broyden, 1965). Jacobian dizeyinin güncellenmesi izleyen bağıntı ile yürütülür:

$$J_{i+1} = J_i + (((f_{i+1} - f_i) - J_i \Delta p_i) / (\Delta p_i^T \Delta p_i)) \Delta p_i^T . \quad (5.8)$$

(5.8) denkleminde i , yineleme numarasını göstermektedir. Yöntem, ters-çözüm işleminin hesaplama zamanının büyük bölümünü oluşturan, Jacobian dizeyinin hesaplanma süresini çok büyük oranda kısaltmaktadır. Ancak yalnızca, öz direnç değişimlerinin keskin olmadığı yer modellerinde başarılı sonuçlar vermektedir.

Kismi türevler dizeyinin hesaplanması için önerilen bir diğer yöntem, düz çözüm için kurulan sonlu-farklar ağı için kullanılmasıdır (Sasaki, 1992). Sonlu-farklar ağı için oluşturulan doğrusal denklem sisteminin, i numaralı parametreye göre türevi alınırsa,

$$\mathbf{f} \frac{\partial A}{\partial \mathbf{r}_i} + A \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{r}_i} = 0 \quad (5.9)$$

elde edilir. Tirnak isareti ∂_i parametresine göre kısmi türevi göstermek üzere (5.9) denklemi

$$A\mathbf{f}' = -A'\mathbf{f} \quad (5.10)$$

şeklinde yazılabilir. (5.10) denkleminde gerilim yöneyi \mathbf{f} ve katsayı dizeyi A , doğrusal denklem sistemi çözüldüğünden, bilinmektedir. A' hesaplanabilir ise bilinmeyen \mathbf{f}' yöneyi, $-A'\mathbf{f}$, (4.3) denklemindeki kaynak dizeyi (S) gibi düşünülerek, benzer şekilde çözülebilir. A' , dizeyinin i numaralı parametre ile bağlantılı olanlar dışında tüm elamanları sıfırdır. Katsayı dizeyinin parametrelere göre kısmi türevleri, katsayı dizeyinin hesaplanması için çağrılan alt programın, i numaralı parametreye 1 diğer tüm parametrelere 0 atanarak bir kez daha çağrılması ile hesaplanabilir. Bu işlem modeldeki parametre sayısı kadar tekrarlanır. Bahsedilen işlemler Fourier bölgesinde gerçekleştirildiğinden, kullanılan k_y katsayısı sayısı kadar da tekrarlanması gerekir. Bu işlem oldukça uzun hesaplama zamanı gerektirmektedir. Model hücrelerinin Şekil 4.1'deki gibi yerleştirilmesi durumunda katsayı dizeyinin birçok parametreyi göre kısmi türevi esit olur. Bu durumda katsayı dizeyinin bazı parametrelere göre kısmi türevinin hesaplanması gerekmez. Kısmi türevleri esit olan parametrelerden biri için hesaplama yapılarak diğerlerine hesaplanan değerler atanabilir. Bu durum, katsayı dizeyinin parametrelere göre kısmi türevlerinin hesaplanma süresini oldukça kısaltır.

Katsayı dizeyinin tüm parametrelere göre kısmi türevleri hesaplanıp (5.10) denkleminde yerine yazılması ile elde edilecek yeni doğrusal denklem sistemi çözümlenerek \mathbf{f}' , hesaplanmış olur. Gerilimin parametrelere göre kısmi türevlerinin uzay bölgesine taşınması, dönüşük gerilimin uzay bölgesine taşınması için kullanılan alt program ile yürütülebilir (EK-2). Uzay bölgesine taşınan $\partial\mathbf{f}/\partial\mathbf{r}$ değerlerinden Jacobian dizeyinin elemanlarının hesaplanması ise gerilim değerlerinden, görünür öz dirençlerin hesaplanmasına benzer şekilde yapılır. $\partial\mathbf{f}/\partial\mathbf{r}$ uzay bölgesinde $N \times M \times N_I$ boyutlarındadır. N ve M sırasıyla yatay ve dikey yöndeki düğüm sayısını ve N_I , istasyon sayısını göstermektedir. Gerilim ve gerilimin parametrelere göre kısmi türevlerinin yalnızca elektrotların bulunduğu düğüm noktalarındaki değerlerine ihtiyaç olduğundan diğer düğüm noktalarındaki değerlerin bellekte tutulmasına gerek yoktur. Bu durumda gerilimin parametrelere göre kısmi türevlerini içeren dizeyin boyutları NE elektrotların yerleştirildiği toplam düğüm sayısını göstermek üzere $NE \times N_I$

olur. Jacobian dizeyinin tüm elemanlarının hesaplanabilmesi için, parametrelerin kısmi türevlerinin tüm ölçüm noktaları için hesaplanması gereklidir. $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{r}$ 'nin değerleri her istasyonda her bir elektrot için bilindiğinden elektrotların konumuna bağlı olarak her bir veri noktası için parametrelerin kısmi türevleri,

$$J_{ij} = k_i \frac{\partial \mathbf{f}_{M_i} / \partial \mathbf{r}_j - \partial \mathbf{f}_{N_i} / \partial \mathbf{r}_j}{I} \quad (5.11)$$

bagintisi ile hesaplanabilir. Burada, J_{ij} , i numaralı veri için j numaralı parametrenin kısmi türevini, k_i , i numaralı veri noktası için geometrik faktörü, I , akimi ve $\partial \mathbf{f}_{M_i} / \partial \mathbf{r}_j$ ise i numaralı veri için M elektrotunda gerilimin j numaralı parametreye göre kısmi türevini temsil etmektedir.

DAÖ verilerinin ters-çözümünde veri ve parametre uzayı logaritmik tanımlandığı için Jacobian dizeyi de,

$$\frac{\partial \log(\mathbf{r}_{ai})}{\partial \log(\mathbf{r}_j)} = \frac{\mathbf{r}_j}{\mathbf{r}_{ai}} \frac{\partial \mathbf{r}_{ai}}{\partial \mathbf{r}_j} \quad (5.12)$$

ve

$$J_{ij}^L = \frac{\mathbf{r}_j}{\mathbf{r}_{ai}} J_{ij} \quad (5.13)$$

bagintilari yardimi ile logaritmik uzaya tasinir.

DAÖ yönteminde 2-B kısmi türevler dizeyinin hesaplanması ile ilgili olarak Trip et al., (1984), ve McGillivray and Oldenburg'a (1990) da bakilabilir. Kısmi türevler dizeyi hesaplandıktan sonra (5.5) denkleminde yerine konularak parametre düzeltme dizeyi hesaplanabilir. Parametre düzeltme dizeyinin hesaplanmasında sönüm faktörünün seçimi de son derece önemlidir. 2-B DAÖ verilerinin ters-çözümünde sönüm faktörü verinin gürültü içerigine bağlı olarak seçilir ve ilerleyen yineleme adımlarında değeri küçültülür. Sönüm faktörünün her yinelemede 1/5 oranında küçültülmesi bir çok örnek için basarili sonuçlar vermistir. Parametre

düzeltilme düzeyi logaritmik uzayda hesaplandığından parametrelerin düzeltilmiş değerleri,

$$p = p^o \exp(\Delta p) \quad (5.14)$$

denklemleri ile bulunur. Hesaplanan yeni model parametrelerini yanilgi enerjisini düşürüp düşürmediği kontrol edilir. Yanilgi enerjisi düşmedi ise sönüm faktörü değiştirilerek (5.5) denklemi yeniden çözülür. Bu işlem kısmi türevler düzeyinin yeniden hesaplanmasını gerektirmez. Yeteri kadar sönüm faktörü denendiği halde yanilgi enerjisi düşmez ise yineleme işlemi durdurulur. Yineleme işlemi bir çakisma ölçütü sağlanıncaya, ya da önceden belirlenen yineleme sayısına ulaşılıncaya kadar sürdürülür.

6. DAÖ VERİLERİNİN LGA İLE 2-B TERS-ÇÖZÜMÜ

Bölüm 2 ve Bölüm 3’de ayrıntılı olarak anlatılan ve kuramsal bir örnek üzerinde denenen basit (GA) ve Lamarckian genetik algoritmalar (LGA), canlıların evrimi üzerine ortaya atılan iki kuramdan esinlenerek geliştirilmiştir. Bunlardan ilki Darwin’in ‘Origin of Species’ (1869) isimli kitabında ortaya attığı, doğal seçim kuramıdır. Buna göre canlılarda nesiller boyu ortaya çıkan özellikler rastlantısaldır. Rastlantısal olarak ortaya çıkan özelliklerden çevre koşullarına uyumlu olanları taşıyan bireyler hayatta kalma ve çoğalma şansını yakalarken bu özellikleri taşımayanlar ölür. Bu kurama göre bir evrim söz konusu değildir ve bir yasama ortamındaki canlı topluluğunda, çevre koşullarına uyumlu özellikler taşıyan bireylerin çoğalması çok uzun zaman gerektirir. Doğal seçim, basit genetik algoritmanın temelini oluşturur ve doğadaki benzer olarak global minimum ya da onun civarında bir noktadaki çözümün bulunması oldukça uzun zaman gerektirir. Çözülmesi gereken parametre sayısının artması durumunda bu süre daha da uzar. Bu tez kapsamında doğadaki işleyişine benzetirilerek kullanılan diğer evrim kuramı J. P. Lamarck’a aittir. Lamarck, ‘Philosophie Zoologique’ (1809) adıyla yayınlanan kitabında ortaya koyduğu kuramında, canlıların davranışlarını, çevre koşullarına uyum sağlayacak şekilde değiştirdiğini öne sürmektedir. Değişen davranışlarla birlikte daha sık kullanılan organ ve özellikler gelişir. Kullanılmayan organ ve özellikler ise zayıflar ya da kaybolur. Bu da evrimin bir yönü olduğunu gösterir. Kazanılan özelliklerin kalıtım yoluyla sonraki nesillere aktarılması ile tür mükemmelliğe doğru evrimleşir. Evrimin bir yönü olduğu için çevre koşullarını uyumlu bireylerin toplulukta çoğalmaları çok daha hızlı gerçekleşir. Bu kuram da Lamarckian genetik algoritmanın temelini oluşturmaktadır. LGA’da, canlıların davranış ve organlarındaki gelişme, genetik işlemlerle ortaya çıkan bireylerin, türeve dayalı bir yöntem ile geliştirilmesi şeklinde benzetilmiştir.

Özetlenen evrim kuramlarının benzesimi ile geliştirilen GA ve LGA global arama yöntemleri, 2-B DAÖ verilerinin ters çözümüne uyarlanmış, kuramsal ve arazi verileri ile denenmiş, elde edilen sonuçlar izleyen bölümde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu süreçte kullanılan yazılımın genetik işlemleri tanımlayan bölümleri Carroll (1997)’den alınmıştır. DAÖ problemi için modelleme ve ters çözüm yazılımları ise bu tezin yazarı tarafından geliştirilmiştir. Algoritmalar, önceden belirlenen bir çıkarma ölçütünün sağlanması için gerekli hesaplama zamanı ya da belirlenen bir

nesil sayisi sonunda hesaplanan çakismazlik degeri isiginda karsilastirilmistir.

2-B DAÖ verilerinin LGA ile ters-çözümünde izleyen adimler takip edilir:

1. Ölçülen veri okunur, verideki bilgi içeriği ve veri sayısına göre 2-B yer modeli kurulur ve parametrelestirilir. Modelin kurulmasi ve parametrelestirilmesi Bölüm 4'de verilmistir.

2. Parametrelerin alabilecegi degerlerin, alt ve üst sinirlari belirlenir. DAÖ yönteminde, fiziksel parametre olan özdirenç dogada oldukça genis bir aralikta degistigidinden, arama uzayi logaritmik seçilir. Arama uzayinin alt ve üst sinirlarinin belirlenmesi için üç öneri yapılabilir. Bunlardan ilki, parametrelerin tamamı için oldukça genis bir arama araliginin herhangi bir kabul ve kisitlama yapılmaksizin belirlenmesidir. Bu yol, olasi model sayisini oldukça artirdigindan yakinsamayi geciktirecektir. Arama uzayinin alt ve üst sinirlarinin ölçülen veriden yola çıkılarak belirlenmesi ikinci yol olarak önerilebilir. Buna göre ölçülen en-küçük ve en-büyük görünür özdirenç degerinin sirasiyla bir logaritmik dönem alti ve bir logaritmik dönem üstü arama uzayinin alt ve üst sinirlari olarak belirlenebilir. Önerilen son yöntem, parametre arama uzayinin, tekdüze yer modeli ön-kestirimi ile yapılacak bir ters-çözüm adimindan kestirilecek parametre degerlerinden yola çıkılarak belirlenmesidir. Bunlarin disinda, verinin ait oldugu çalisma bölgesi ile ilgili mevcut jeolojik bilgiler ve varsa kuyu bilgileri de kullanılabilir.

3. Algoritmanin genetik isleçleri tanımlayan bölümleri ile ilgili parametreler (topluluk büyüklüğü, maksimum nesil sayisi, çaprazlama ve mutasyon olasilikleri) girilir. Bu parametrelerin algoritmanin davranisini nasıl etkiledigi Bölüm 2'de verilmistir. Parametre sayisinin fazla ve parametreler için tanımlanan çözüm araliklarinin oldukça genis olması nedeniyle topluluk büyüklüğü, hesaplama zamani ve algoritmanin bir minimuma yakinsamasinda dogrudan belirleyici bir etkidir.

4. Tanımlanan arama uzayında rastgele dagılan baslangıç toplulugunun bireyleri (olasi çözümleri temsil eden parametre kümelerinin her biri) olusturularak ikili sistemde kodlanir.

5. Baslangıç toplulugunun tüm bireyleri sönümlü en-küçük kareler yönteminin kullanildigi ters çözüm algoritmasına ön-kestirim olarak

verilerek geliştirilir (çözüm uzayında yanlış enerji daha düşük bir noktaya tasinir).

6. Gelistirilen bireylerin çakismazliklari hesaplanir. Çakismazlik ölçütü isiginda seçilim, çaprazlama ve mutasyon işleçleri çalistirilerek bireyler genetik evrim sürecinden geçirilir.

7. Türeve dayali bir ters-çözüm algoritmasi ile gelistirilen ve genetik evrim sürecinden geçen topluluk, bir sonraki neslin baslangiç toplulugunu olusturmak üzere 5. adima dönülerek işlem önceden belirlenen nesil sayisina ulasilincaya kadar tekrarlanir.

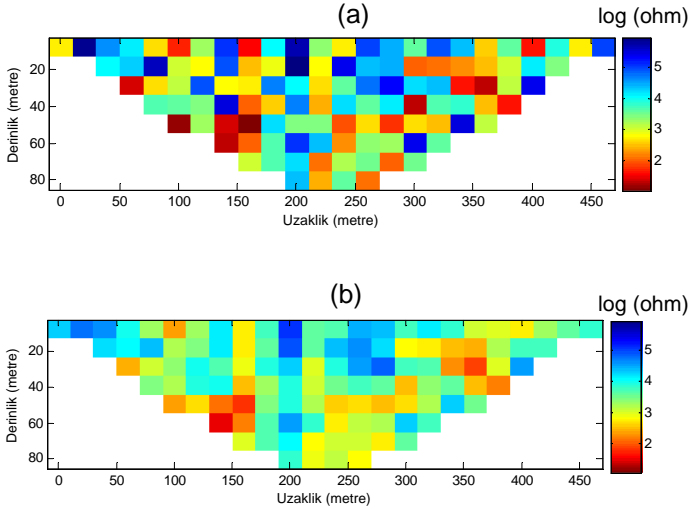
6.1 Uygulamalar

Lamarck'in evrim kuramının benzesimi ile gelistirilen LGA, basit genetik algoritma ile türeve dayali bir ters-çözüm yönteminin birlikte kullanımına dayanan melez bir global arama yöntemidir. İzleyen bölümde, çeşitli modellerden kuramsal olarak hesaplanan ve arazide ölçülen gerçek veriler, DAÖ verilerinin LGA ile ters çözümü için gelistirilen yazilim ile degerlendirilmistir. Karsilastirma amaciyla ayni veriler basit genetik algoritma ile de degerlendirilmistir. Sonuçlar, her iki algoritma için degisik nesillerde elde edilen en-küçük çakismazlik üreten modeller grafiklenerek, yine her iki algoritma için her nesilde hesaplanan en-düşük ve ortalama çakismazliklar çizilerek sunulmustur.

Kuramsal veriler, 25 elektrottan olusan çok kanalli bir özdirenç ölçüm sistemi ile 10 seviye ölçüm yapıldığı varsayimiyla hesaplanmistir. Hesaplamalarda, elektrot dizilimi olarak es merkezli dört elektrot dizilimi seçilmistir. Kuramsal verilere %5 oranında rastgele gürültü eklenmistir.

Genetik algoritma ile baslangiçta rastgele üretilen ve ara adimlarda ortaya çıkan modellerin birbirine komsu hücreleri arasında çok keskin özdirenç farklari olusabilir. Bu durum hem, model yanitinin, hem de parametrelerin veriye göre kısmi türevlerinin hesaplanmasında sayisal hataların olusmasına neden olabilir. Bu sorunun önüne geçmek amaciyla bir yuvarlatma işleci ile model parametreleri arasındaki keskin degisimler engellenmeye

çalışılmıştır. Yuvarlatma işlemi, bir model hücresine atanan öz direncin yuvarlatılmış değerini, hücrenin öz direnci ve komşu model hücrelerinin hücre boyutları ile ağırlıklandırılmış öz dirençlerinin ortalamasını olarak hesaplamaktadır. Şekil 6.1’de rastgele üretilen bir modelin yuvarlatma işlemi ile nasıl değiştiği verilmiştir.



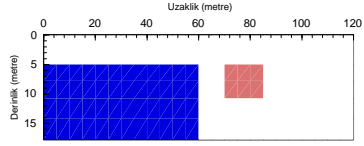
Şekil 6. 1(a) Genetik işlemlerle üretilen bir model (b) aynı modelin yuvarlatıldıktan sonraki görünümü

Tüm denemeler için Çizelge 6.1’ de verilen değerler aynı alınmıştır.

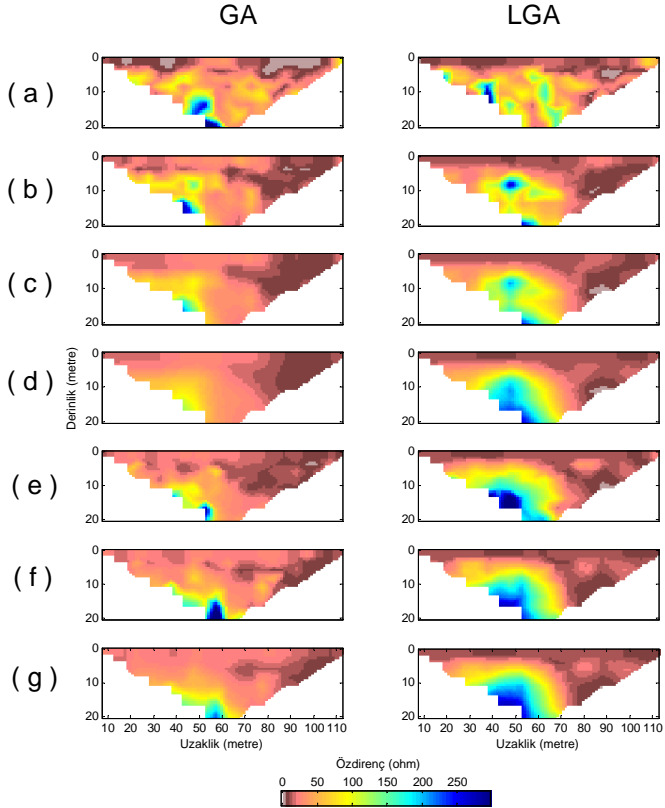
Çizelge 6. 1 GA parametreleri

Parametre sayısı	Topluluk Büyüklüğü	Nesil Sayısı	Çaprazlama Olasılığı	Mutasyon olasılığı
114	100	20	0.6	0.01

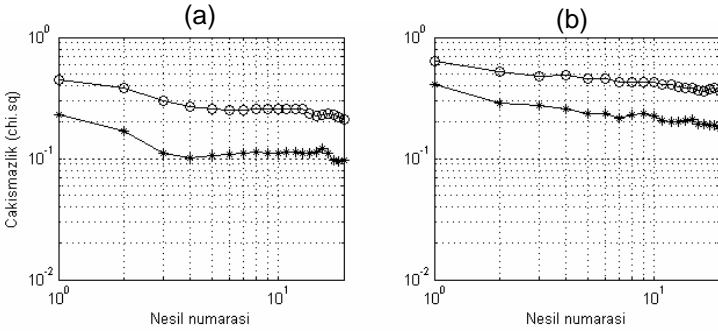
6.1.1 Model 1



Sekil 6. 2 Model 1



Sekil 6. 3 GA ve LGA'nin (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 5, (e) 10, (f) 15 ve (g) 20nci nesillerinde en-küçük çakışmazlık üreten bireyleri. Son adımdaki çakışmazlıklar $\eta_{GA}=0.2120$ ve $\eta_{LGA}=0.0097$

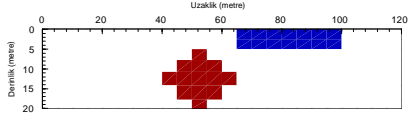


Sekil 6. 4 Model 1 için nesiller boyunca (a) en-küçük ve (b) ortalama çakismazliklar. Dairelerle isaretlenen egriler GA, yıldız ile isaretlenen egriler LGA ile elde edilen sonuçları göstermektedir

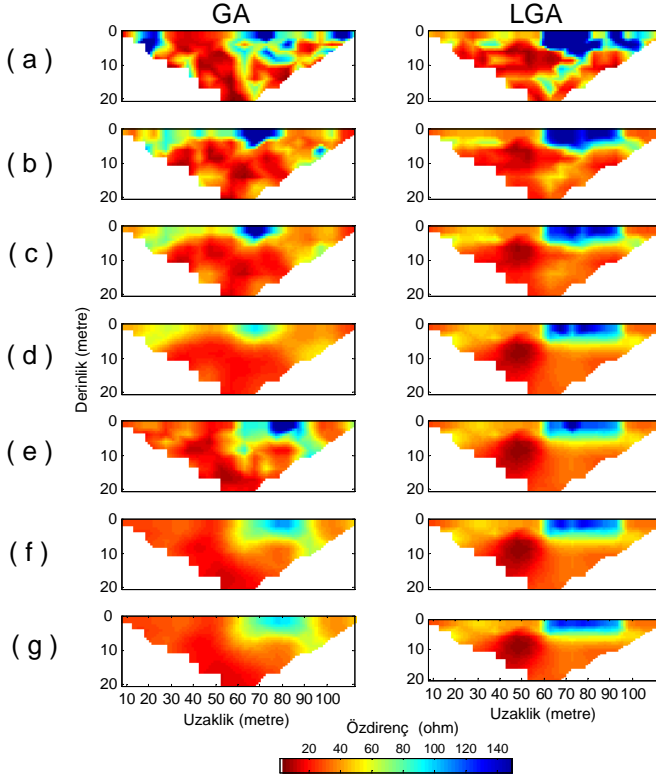
Model 1, öz direnci 10 Ohm olan ortam içerisinde, öz direnci 500 Ohm olan bir fay blogu ve öz direnci 100 Ohm olan bir cisimden oluşmaktadır (Sekil 6.2). Kuramsal veri, 5m elektrot aralığı için hesaplanmıştır.

Parametre arama uzayının alt ve üst sınırları, tekdüze yer modeli önkestimimi ile çalıştırılan en-küçük kareler ters-çözüm algoritmasından kestirilen parametre değerlerinden faydalanılarak belirlenmiştir. Buna göre parametreler için tanımlanan arama uzayının alt ve üst sınırları sırasıyla 0.1 ve 800 Ohm'dur. Model 1 için GA ve LGA uygulamalarının sonuçları, önceden belirlenen bir çakisma ölçütünün sağlanması için gerekli hesaplama zamanı ya da belirlenen bir nesil sayısı sonunda hesaplanan çakismazlık değeri göz önüne alınarak incelendiğinde LGA'nın beklenildiği gibi, daha başarılı olduğu söylenebilir.

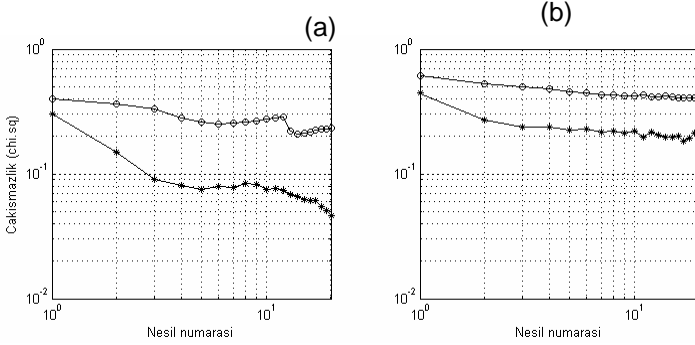
6.1.2 Model 2



Sekil 6. 5 Model 2



Sekil 6. 6 GA ve LGA'nin (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 5, (e) 10, (f) 15 ve (g) 20nci nesillerinde en-küçük çakismazlik üreten bireyleri. Son adımdaki çakismazliklar $\rho_{GA}=0.2091$ ve $\rho_{LGA}=0.0464$

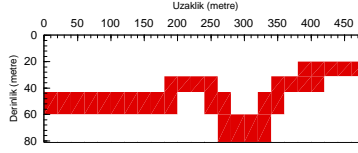


Sekil 6. 7 Model 2 için nesiller boyunca (a) en-küçük ve (b) ortalama çakismazliklar. Dairelerle isaretlenen egriler GA, yıldız ile isaretlenen egriler LGA ile elde edilen sonuçlari göstermektedir

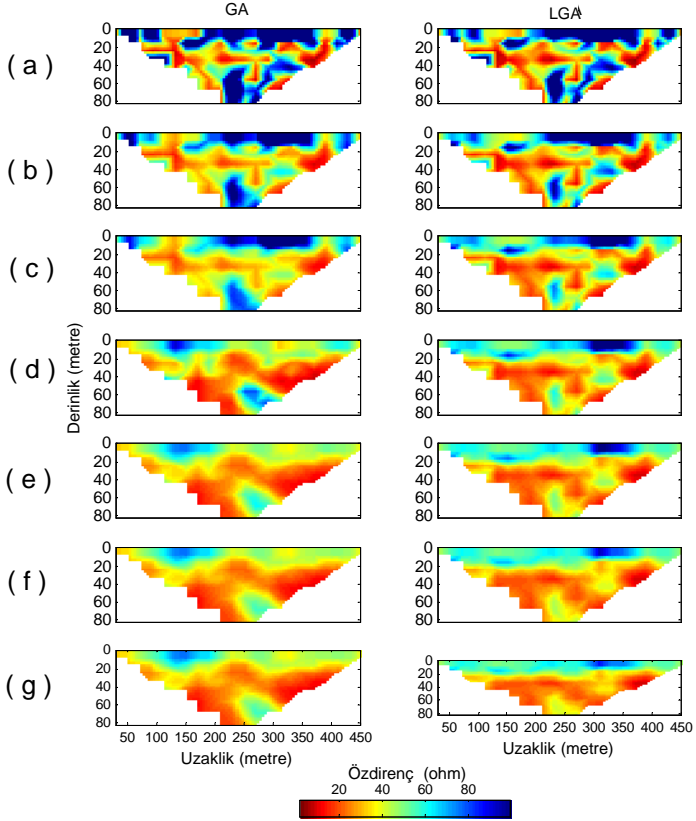
Model 2, yüzeyden 5 metre derine kadar inen, özdirenci 100 Ohm olan sig bir yapı ile düşük özdirençli (1 Ohm) gömülü bir cisimden oluşmaktadır. Ortamin genel özdirenci 40 Ohm'dur (Sekil 6.5).

Parametre arama uzayinin alt ve üst sinirlari, tekdüze yer modeli önkestimimi ile çalistirilani en-küçük kareler ters-çözüm algoritmasindan kestirilen parametre degerlerinden faydalanilarak belirlenmistir. Buna göre parametreler için tanimlanan arama uzayinin alt ve üst sinirlari sirasiyla 1 ve 850 Ohm'dur. Model 2 için GA ve LGA uygulamalarinin sonuçlari, incelendiginde LGA'nin kuramsal verinin hesaplandigi model parametrelerine oldukça yakin degerler hesapladigi, çakismazligi baslangiçtan itibaren GA ile karsilastirildiginda daha hizli düsürdüğü gözlenmistir.

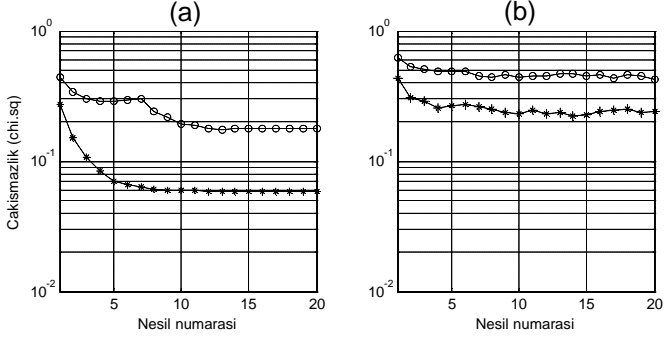
6.1.3 Model 3



Sekil 6. 8 Model 3



Sekil 6. 9 GA ve LGA'nin (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 5, ve (e) 10, (f) 15 ve (g) 20nci nesillerinde en-küçük çakismazlik üreten bireyleri. Son adimdaki çakismazliklar $\gamma_{GA}=0.17815$ ve $\gamma_{LGA}=0.0588$

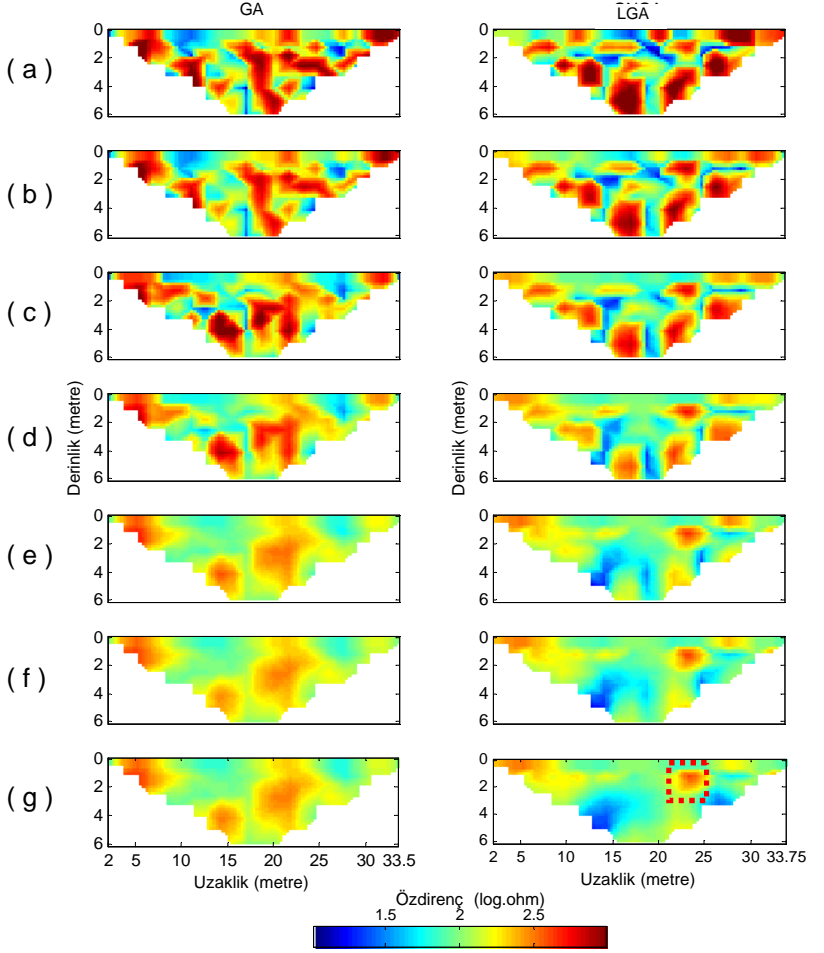


Sekil 6. 10 Model 3 için nesiller boyunca (a) en-küçük ve (b) ortalama çakismazliklar. Dairelerle isaretlenen egriler GA, yildiz ile isaretlenen egriler LGA ile elde edilen sonuçlari göstermektedir

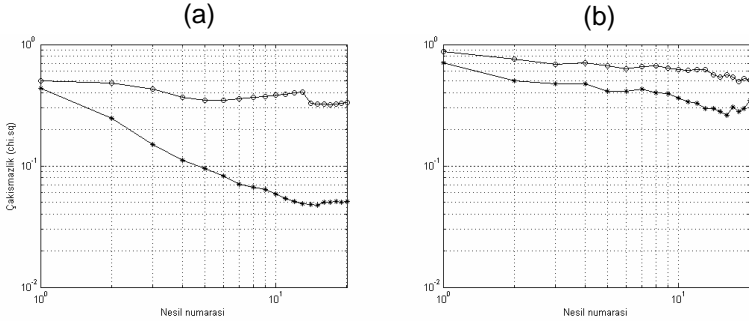
Model 3, özdirenci 100 Ohm olan tekdüze ortam içerisinde derinligi yatay yönde degisen, özdirenci 5 Ohm olan bant yapisindan olusmaktadır (Sekil 6.8).

Parametreler için tanımlanan arama uzayinin alt ve üst sinirlari sirasiyla 2 ve 530 Ohm'dur. Model 3 için GA ve LGA uygulamalarinin sonuçlari, incelendiginde her iki algoritmanin modeli genel yapı olarak çözebildigi ancak, derinlik ve konum konusunda LGA algoritmasinin daha basarili oldugu gözlenmistir. Bunun disinda her iki algoritmada en-küçük çakismazlik ve ortalama çakismazlik degerlerinin belirli bir nesil sayisindan sonra düsmedigi göze çarpmaktadır.

6.1.4 Arazi verisi

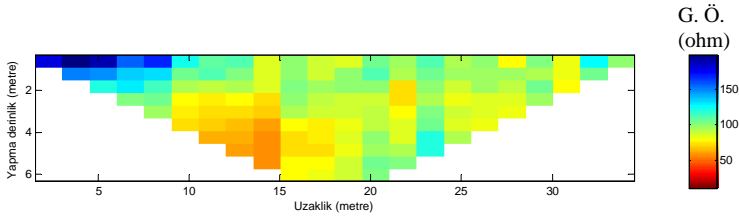


Şekil 6. 11 Arkeolojik yapıların aranması ile ilgili bir çalışmada ölçülen verinin, GA ve LGA ile ters-çözümünde (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 5, (e) 10, (f) 15 ve (g) 20nci nesillerde en-küçük çakışmazlık üreten bireyler. Son adimdaki çakışmazlıklar $\tau_{GA}=0.3192$ ve $\tau_{LGA}=0.0506$



Sekil 6. 12 Arazi verisi için nesiller boyunca (a) en-küçük (b) ortalama çakismazliklar. Dairelerle isaretlenen egriler GA, yıldız ile isaretlenen egriler LGA ile elde edilen sonuçları göstermektedir

Bu çalışma kapsamında degerlendirilen arazi verisi, Samsun ilinde bulunan iki adet tümülüs civarında yapılan arkeolojik yapıların aranmasına yönelik jeofizik araştırmalarda toplanmıştır (Sekil 6.13). Elektrot dizilimi Wenner-Schlumberger, elektrot aralığı 1.5 metredir.



Sekil 6. 13 Görünür öz direnç yapma-kesiti

GA yöntemin ile yapılan denemelerde nesiller boyunca ortalama ve en-küçük çakismazlığın oldukça yavaş azaldığı ve belirli bir nesil sayısından sonra bu degerlerin değısmemiş olduğu gözlenmiştir. GA ile son adımda elde edilen en-küçük çakismazlığı üreten model, ortamın genel yapısı hakkında kabaca bilgi verebilecek durumdayken, LGA yöntemi ile son adımda elde edilen model, yapılan kazı çalışmaları sonucu ortaya çıkan yer kesiti ile büyük oranda uyum göstermektedir. Sekil 6.11'de kırmızı dikdörtgenlerle

isaretlenen bölgede önerilen kazi alanında izleyen resimde verilen duvar ortaya çıkarılmıştır.



Sekil 6. 14 Kullanılan arazi verisinin toplandığı bölgede, önerilen kazi alanında bulunan duvar

7. TARTISMA VE SONUÇ

Geleneksel ters-çözüm ve global arama yöntemleri, ölçülen veriden yola çıkılarak veriyi üreten modelin parametrelerinin bulunmasında kullanılan dolaylı yöntemlerdir. Parametrelerin gerçek değerlerinin bulunup bulunmadığının ölçütü ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki uyumun denetlenmesidir. Gerçekte, bir problem için global minimuma ulaşılıp ulaşılmadığı hiçbir zaman bilinemeyeceğinden, bulunan çözümlerden en uygununun seçilmesi, modelin ürettiği veri ile ölçülen veri arasındaki uyum ışığında, mesleki bilgi ve tecrübelerle dayanılarak yapılacaktır.

Türeve dayalı geleneksel ters-çözüm yöntemleri, global minimum civarına düşen bir başlangıç modeli için genel olarak birkaç yineleme ile problemin global çözümüne ulaşmaktadır. Jeofizik yöntemlerde ölçülen verilerin, iç içe geçmiş bir çok olay ve sürecin sonucu olarak kaydedildiği düşünülürse, ölçülen veriden yola çıkılarak problemin global minimumu civarında bir önkestimde bulunmak oldukça güçtür. Bunun yanında ölçülen veri ile uyum gösteren yalnızca bir model bulunmaz. Aynı veri farklı modeller ile açıklanabilir. Esdeğerlilik ilkesi olarak adlandırılan bu durum jeofizik verilerin yorumlanmasında sıkça karşılaşılan bir durumdur. Esdeğerlilik ilkesinden kaynaklanan yorumlama hatalarının en aza indirilmesi amacıyla, çalışma alanındaki yer kesimine ait bilgiler göz önüne alınarak, ters-çözüm işleminde parametrelerin bazıları için kısıtlamalara gidilebilir.

Türeve dayalı ters-çözüm yöntemlerinde, başlangıç modelinden başlamak üzere, her yinelemede parametre değerlerine bir düzeltme uygulanarak ölçülen veri ile uyumlu kuramsal veriyi üreten bir model bulunmaya çalışılır. Parametre düzeltme düzeyinin hesaplanması, kuramsal verinin parametrelere göre kısmi türevlerinin hesaplanmasını ve düzey tersleme işlemlerinin yapılmasını gerektirir. Veri ve parametre sayısının artması ile birlikte kısmi türevler düzeyinin boyutları, hesaplanma süresi ve bilgisayar belleğinde kapladığı yer artar. Düzey tersleme işlemlerinde çeşitli düzleştiricilerin kullanılmasını gerektiren sayısal duragansızlıklar ortaya çıkabilir.

Üstün ve zayıf yönleri özetlenen türeve dayalı ters-çözüm yöntemleri, jeofizik verilerin ters çözümünde zayıf yönlerinin giderilmeye çalışıldığı

Çesitli düzgünleyici ve duraganlastiricilarin kullanildiği uyarlamalari ile sika kullanılmaktadır.

Geleneksel ters zm yöntemlerinin özetlenen zayıf yönlerinden dolayı, parametre kestirim problemlerinin zm için, genisletilmiş bir arama uzayında global arama yapan yöntemler geliştirilmiştir. Global arama yöntemlerinden biri olan ve bu tez kapsamında incelenen basit genetik algoritma, dogada canliların yasama kosullarına göre seçilimi ve yasam kosullarına uygun özellikler taşıyan bireylerin özelliklerini sonraki nesillere aktarma sansini yakalamasi sürecinden benzetirilerek geliştirilmiştir. Basit genetik algoritma, Darwin'in "dogal seçilim" kuramının temel aldigından, kuramdakine benzer olarak ölçülen veri ile uyumlu kuramsal veriyi üreten modellerin ortaya ikması ve toplulukta ogalması süreci, rastlantisal olarak gelişmektedir. Bu sürecin rastlantisal olması algoritmanın, problemin global zm civarında bir noktaya yakınsama sürecinin çok yavaş gelişmesine neden olur. Bunun yanında genel olarak bulunan zm, global minimum civarında bir noktaya dsmesine karsın, parametre değerleri duyarlı biçimde zlememektedir. Bu tez alısması kapsamında değisik problemlerin GA ile ters-zm için yapılan denemelerden, problemi tanımlayan parametre sayısının artması ile birlikte yakınsama süresinin uzadığı görülmüstür. Yine parametre sayısının artması durumunda, parametredeki değisimlerin veride ne tür bir değisiklige neden olduğuna iliskin bir bilgi bulunmadığından parametrelerin bazıları için iyileştirme sağlanamamıştır. Bunlardan dolayı, basit genetik algoritmanın, karmaşık düz zm bağıntıları ile ifade edilebilen ve model parametre sayısının fazla olduğu problemlerde, dogrudan zm için kullanılması yerine, türeve dayalı bir ters-zm yöntemine global minimum civarında bir ön-kestirim sağlamak amacıyla kullanılması önerilebilir.

Bu tez kapsamında, basit genetik algoritmanın hesaplama süresinin azaltılması ve parametre değerlerinin hassas olarak hesaplanması amacıyla "Lamarckian Genetik Algoritma" adıyla yeni bir yöntem önerilmiştir. "Lamarckian" ifadesi, basit genetik algoritma ile üretilen modellerin, türeve dayalı bir yöntemle iyileştirilmesi ve bir sonraki neslin bireylerinin, iyileştirilen bireylerin genlerinin çaprazlanması ile elde edildiğini belirtmek için kullanılmıştır. Algoritmadan beklenen, global minimum civarında bir zm bulunması olasılığı yükseltilirken, stokastik evrim sürecinin hızlandırılması, parametre değerlerinin daha hassas hesaplanması, bu sayede GA ve türeve dayalı yöntemlerin ayrı ayrı kullanımında ortaya çıkan

sorunların giderilmesidir. Degisik problemler için yapılan uygulamalarda, sayılan beklentilere ulasildiği görülmüştür. Lamarck'ın, canlılarda, yaşam kosullarına uygun özellik ve davranisların sık kullanımı ile bu özellik ve davranisların gelistigi ve sonraki nesillere aktarildiginda, türün evriminin hizlandigi konusundaki kurami isiginda gelistirilen LGA yönteminin, kuramdakine benzer sekilde çalistigi söylenilebilir.

LGA'nin, DAÖ verilerinin 2-B ters-çözümü için denenmesi amacıyla yapılan uygulamaların hemen tamamında, GA ile karsilastirildiginda stokastik evrim sürecinin hizlandigi, kuramsal verilerin üretildiği modellerin, parametrelerinin gerçek degerlerine yakin olarak çözülebildiği görülmüştür. Ancak LGA'nin, bir nesildeki tüm modellerin genetik evrimi için basit genetik algoritmadan farklı olarak, gerekli hesaplama zamanına, fazladan en az bir düz çözüm için gerekli süre ve kısmi türevler düzeyinin hesaplanması için gerekli süre de eklendiginden yalnız bir neslin evrimlestirilmesi göz önüne alindiginda LGA'nin daha uzun hesaplama zamanı aldığı söylenilebilir. Bu durum, çok sayıda parametre ile temsil edilen ve kısmi türevler düzeyinin analitik olarak hesaplanamadığı problemler için geçerlidir. Parametre sayısının görecel olarak az olması ve kısmi türevler düzeyinin analitik olarak hesaplanabilmesi durumunda GA ve LGA algoritmalarının hesaplama zamanları arasında kullanıcı tarafından algılanabilecek bir fark oluşmamaktadır.

Nesiller boyu hesaplanan en-küçük ve ortalama çakismazlıklar incelendiginde, LGA'nin stokastik evrim sürecinin ilk bölümlerinde kabul edilebilir bir çakismazlığa ulastigi gözlenmektedir. LGA, rastlantisallik ve yönlendirilmislik özelliklerini bir arada tasidigindan birkaç nesil sonunda topluluğu olusturan modellerin büyük bölümü global minimum civarında toplanmaktadır. Bu noktadan sonra algoritmanın çözüm uzayında aramaya devam etmesi model parametrelerinde çok küçük degisimlere neden olmaktadır. LGA'nin optimum kullanımı için, algoritmanın, topluluk duraganlaşmaya basladiginda ya da bir çakisma ölçütü sağlandiginda durdurularak son adımda bulunan modellerin türeve dayalı bir yöntemin birkaç yinelemesi ile iyileştirilmesi yoluna gidilebilir.

KAYNAKLAR

- Baker, J. E. 1987. Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm. Proc. of the 2nd Intl. Conference on Genetic Algorithms, pp.14-21.
- Basu, A., Frazer, L. N. 1990. Rapid determination of critical temperature in simulated annealing inversion, Science, 249, 1409-1412.
- Basokur, A. T., 1983. Transformation of resistivity sounding measurements obtained in one electrode configuration to another configuration by means of digital linear filtering, Geophysical Prospecting, 31, 649-663.
- Basokur, A. T., 2002, Dogrusal ve dogrusal olmayan problemlerin ters çözümlü, JFMO Egitim yayinlari No : 4.
- Brierly, P. D. 1998. Genetic inspired optimisation. Eng. D. Thesis. Cranfield University UK.
- Broyden, C.G. 1965. A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations. Mathematics of Computation, 19, 577-593.
- Caroll, D.L., 1997. Genetic algorithms and optimizing chemical oxygeniodine lasers, Developments in theoretical and applied mechanics, Vol. XVIII, 411-424.
- Chunduru, R. K., Sen, M. K., Stoffa, P. L., Nagendra, R. 1995. Nonlinear inversion of resistivity profiling data for some regular geometrical bodies. Geophysical Prospecting, 43, 979-1003.
- deGroot-Hedlin C., Constable, S.C. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, 55, 1613-1624.
- Demirsoy, A. 1998. Yasamin temelleri, Cilt 1. 551-559, Hacettepe Ün. Fen Fak. Yay. Ankara
- Dey. A., Morrison. H.F. 1979. Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, 27, 106-136.
- Dosso, S. E., Oldenburg D.W. 1991. Magnetotelluric appraisal using simulated annealing Geophys. J. Int., 106, 370-85.
- Edwards, L. S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics, 42, 1020-1036.
- Goldberg, D. E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley.
- Holland, J. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, Ann Arbor, MI: The University of Michigan Pres.

- Landa, E., Beydoun, W., Tarantola, A. 1989. Reference velocity model estimation from prestack waveforms: coherency optimization by simulated annealing, *Geophysics*, 54, 984-990.
- Lines, L.R., Treitel, S. 1984, Tutorial: a review of least-squares inversion and its application to geophysical problems: *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.
- Loke M.H., Barker, R.D. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudo-sections. *Geophysics*, 60, 499-523.
- Loke M.H., Barker R.D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- McGillivray, P. R., Oldenburg D. W. 1990. Methods for calculating Fréchet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: a comparative study. *Geophysical Prospecting*, 38, 499-524.
- Perez-Flores, M. A., Schultz, A. 2002. Application of 2-D inversion with genetic algorithms to magnetotelluric data from geothermal areas. *Earth Planets Space*, 54, 607-616.
- Ramillien, G., 2001. Genetic algorithms for geophysical parameter inversion from altimeter data. *Geophysical Journal International*, 147, 393-420.
- Sakawa, M., Kato, 2003. K. Genetic algorithms with double strings for 0-1 programming problems. *European Journal of Operational research*, 144, 581-597.
- Sasaki, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- Sen, M. K., Stoffa, P., 1995. *Global optimization methods in geophysical inversion*, Elsevier Publ.
- Sen, M. K., Bhattacharya, B. B., Stoffa, P. L. 1993. Nonlinear inversion of resistivity sounding data. *Geophysics*, 58, 496-507.
- Sharma, S.P., Kaikkonen, P. 1999. Appraisal of equivalence and suppression problems in 1D EM and DC measurements using global optimization and joint inversion *Geophysical Prospecting*, 47, 219-249.
- Siyam N. 2002, Elektrik ve elektromanyetik verilerinin genetik algoritma ile birlesik ve ardisik ters çözümleri. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara
- Stoffa, P. L., Sen, M. K. 1991. Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane wave seismograms, *Geophysics*, 56, 1794-1810.

- Stoffa, P. L., Sen, M. K. 1992. Seismic waveform inversion using global optimization. *J. Seis. Exp.*, 1, 9-27.
- Szu, H., Hartley, R. 1987. Fast Simulated Annealing, *Physical Letters A*, 122, No. 3, 157-162.
- Vestergaard, P. D., Mosegaard, K. 1991. Inversion of post-stack seismic data using simulated annealing, *Geophysical Prospecting* 39, 613 -624.

EK-1

Izleyen bölümde verilen sonlu-farklar denklemleri ve bağlantı katsayılarını veren bağlantılar Dey and Morrison'dan alınmıştır (1979). Bağlantı katsayıları, $A\mathbf{f} = \mathcal{S}$ doğrusal denklem sistemindeki A dizeyinin elemanlarını oluşturur. N yatay, M dikey yöndeki düğüm sayısı olmak üzere ağda toplam $NM = N \times M$ adet düğüm bulunur. A dizeyi $NM \times NM$ boyutundadır.

a. Sınırlar dışındaki düğüm noktaları için bağlantı katsayılarının hesaplanması

Sonlu-farklar ağının sağ, sol, alt ve üst sınırlarındaki dışındaki düğüm noktalarında ($i = 2, 3, \dots, N - 1$ ve $j = 2, 3, \dots, M - 1$) geçerli sonlu-farklar denklemi,

$$C_L^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i-1,j} + C_R^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i+1,j} + C_T^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j-1} + C_B^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j+1} + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j} = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.1)$$

ile verilir. (1.1) denkleminde C_L^{ij} , (i, j) ve ($i-1, j$) numaralı, C_R^{ij} , (i, j) ve ($i+1, j$) numaralı, C_T^{ij} , (i, j) ve ($i, j-1$) numaralı, C_B^{ij} , (i, j) ve ($i, j+1$) numaralı düğüm noktaları arasındaki bağlantı katsayılarıdır. Ağın sınırlar dışında kalan düğüm noktaları için bağlantı katsayıları,

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1} + \Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i-1,j}}{2\Delta x_{i-1}} \right], \quad (1.2)$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i,j-1} + \Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i,j}}{2\Delta x_i} \right], \quad (1.3)$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1} + \Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right], \quad (1.4)$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j} + \Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j}}{2\Delta z_j} \right], \quad (1.5)$$

ve

$$P = k_y^2 \cdot \left(\frac{\mathbf{s}_{i-1,j-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\mathbf{s}_{i,j-1} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\mathbf{s}_{i,j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_j}{4} + \frac{\mathbf{s}_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_j}{4} \right)$$

olmak üzere,

$$C_P^{ij} = -(C_L^{ij} + C_R^{ij} + C_T^{ij} + C_B^{ij} - P) \quad (1.6)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

b. Üst sınırdaki düğüm noktaları için bağlantı katsayılarının hesaplanması

Ağının üst sınırındaki düğüm noktaları ($i = 2, 3, \dots, N-1$ ve $j = 1$) için sonlu-farklar denklemi,

$$C_L^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i-1,j} + C_R^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i+1,j} + C_B^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j+1} + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j} = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.7)$$

ile verilir. Bağlantı katsayıları,

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i-1,j}}{2 \Delta x_{i-1}} \right], \quad (1.8)$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i,j}}{2 \Delta x_i} \right], \quad (1.9)$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j} + \Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j}}{2 \Delta z_j} \right] \quad (1.10)$$

ve

$$P = k_y^2 \left[\frac{\mathbf{s}_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_j}{4} + \frac{\mathbf{s}_{i,j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_j}{4} \right] \text{ olmak üzere} \quad (1.11)$$

$$C_P^{ij} = -(C_L^{ij} + C_R^{ij} + C_B^{ij} - P)$$

bagintilari ile hesaplanabilir.

c. Sol ve sag üst kösedeki düğüm noktaları için bağlantı katsayılarının hesaplanması

Sonlu-farklar ağıнын sol üst kösesindeki düğüm noktası için ($i = I$ ve $j = I$) geçerli sonlu-farklar denklemi,

$$C_B^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j+1} + C_R^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i+1,j} + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j} = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.12)$$

ile verilir. Bağlantı katsayıları

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j}}{2 \Delta z_j} \right], \quad (1.13)$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i,j}}{2 \Delta x_i} \right] \quad (1.14)$$

ve

$$P = k_y^2 \left[\frac{\mathbf{s}_{i,j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_j}{4} \right],$$

$$R = \left[\frac{\mathbf{s}_{i,j} \cdot \Delta z_j \cdot \mathbf{a} \cos(\mathbf{q})}{2} \right], \quad (1.15)$$

olmak üzere

$$C_P^{ij} = -(C_R^{ij} + C_B^{ij} - P) + R \quad (1.16)$$

bagintilari ile hesaplanabilir. (1.15) bagintisinda

$$\mathbf{a} = \frac{k_y \cdot K_l(k_y \mathbf{g})}{K_0(k_y \mathbf{g})}$$

ile verilir. ρ , akim kaynagının bulunduğu düğüm ile (i, j) numaralı düğüm noktası arasındaki uzaklığı, \mathbf{n} ise uzaklık vektörünün x - yönünde yüzey normali ile yaptığı açıyı göstermektedir. Sonlu-farklar ağı, yapay sınırlarla uzatıldığından tüm düğüm noktalarının akim kaynağına uzaklığı, ağın orta noktasına göre hesaplanabilir (Şekil 1.1). K_0 , birinci cins sıfırinci derece değiştirilmiş Bessel fonksiyonu, K_1 birinci cins birinci derece değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur.

Sonlu-farklar ağı için sağ üst köşesindeki düğüm noktası için ($i = N$ ve $j = 1$) geçerli sonlu-farklar denklemi,

$$C_L^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i-1,j}^s + C_B^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j+1}^s + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j}^s = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.17)$$

ile verilir. Bağlantı katsayıları,

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i-1,j}}{2 \Delta x_{i-1}} \right], \quad (1.18)$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j}}{2 \Delta z_j} \right] \quad (1.19)$$

ve

$$P = k_y^2 \left[\frac{\mathbf{s}_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_j}{4} \right]$$

$$R = \left[\frac{\mathbf{s}_{i-1,j} \cdot \Delta z_j \cdot \mathbf{a} \cos(\mathbf{q})}{2} \right]$$

olmak üzere

$$C_P^{ij} = -(C_L^{ij} + C_B^{ij} - P) + R \quad (1.20)$$

bağlantıları ile hesaplanabilir.

d. Sol ve sag alt kösedeki düğüm noktaları için bağlantı katsayılarının hesaplanması

Sonlu-farklar ağıının sol alt kösesindeki düğüm noktası için ($i = 1$ ve $j = M$) geçerli sonlu-farklar denklemi,

$$C_R^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i+1,j}^e + C_T^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j-1}^e + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j}^e = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.21)$$

ile verilir. Bağlantı katsayıları,

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i,j-1}}{2\Delta x_i} \right], \quad (1.22)$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right] \quad (1.23)$$

ve

$$P = k_y^2 \left[\frac{\mathbf{s}_{i,j-1} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_{j-1}}{4} \right]$$

$$R = \left[\frac{\Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j-1} \cdot \mathbf{a} \cos(\mathbf{q}_1)}{2} + \frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i,j-1} \cdot \mathbf{a} \cos(\mathbf{q}_2)}{2} \right]$$

olmak üzere

$$C_P^{ij} = -(C_R^{ij} + C_T^{ij} - P) + R \quad (1.24)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

Sag alt kösedeki düğüm noktası için ($i = N$ ve $j = M$) fark denklemi,

$$C_L^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i-1,j}^e + C_T^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j-1}^e + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j}^e = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.25)$$

ile verilir. Bağlantı katsayıları,

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1}}{2\Delta x_{i-1}} \right], \quad (1.26)$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right], \quad (1.27)$$

ve

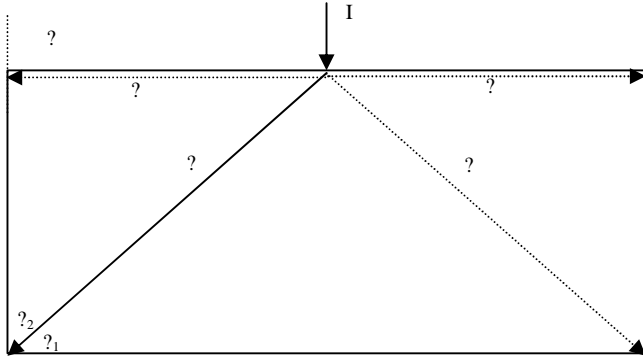
$$P = k_y^2 \cdot \left[\frac{\mathbf{s}_{i-1,j-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{4} \right]$$

$$R = \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1} \cdot \mathbf{a} \cos(\mathbf{q}_1)}{2} + \frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1} \cdot \mathbf{a} \cos(\mathbf{q}_2)}{2} \right] \quad (1.28)$$

olmak üzere

$$C_p^{ij} = -(C_L^{ij} + C_T^{ij} - P) + R \quad (1.29)$$

bagintilari ile hesaplanabilir. (1.28) denkleminde $?_2$ ve $?_1$ sirasiyla uzaklik yoneyi ile x- ve z- yonlerindeki yuzey normaleri arasindaki acilardir.



Sekil 1.1 Dügüm noktalarinin kaynaktan uzakliklari ve yuzey normali ile yaptigi açilar

e. Sol kenardaki düğüm noktaları için bağlantı katsayılarının hesaplanması

Sonlu-farklar ağının sol kenarındaki düğüm noktaları için ($i = 1$ ve $j = 2, \dots, M - 1$) geçerli sonlu-farklar denklemi,

$$C_R^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i+1,j}^e + C_T^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j-1}^e + C_B^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j+1}^e + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}_{i,j}^e = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.30)$$

ile verilir. Bağlantı katsayıları

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i,j-1} + \Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i,j}}{2\Delta x_i} \right], \quad (1.31)$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right], \quad (1.32)$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j}}{2\Delta z_j} \right] \quad (1.33)$$

ve

$$P = k_y^2 \cdot \left[\frac{\mathbf{s}_{i,j-1} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_{j-1} + \mathbf{s}_{i,j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_j}{4} \right]$$

$$R = \left[\frac{\Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i,j} + \Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i,j-1}}{2} \mathbf{a} \cos(\mathbf{q}) \right]$$

olmak üzere

$$C_P^{ij} = -(C_R^{ij} + C_T^{ij} + C_B^{ij} - P) + R \quad (1.34)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

f. Sag kenardaki düğüm noktaları için bağlantı katsayılarının hesaplanması

Sonlu-farklar ağıının sağ kenarındaki düğüm noktaları için ($i = N$ ve $j = 2, \dots, M - 1$) geçerli sonlu-farklar denklemi,

$$C_L^{ij} \cdot \mathbf{f}'_{i-1,j} + C_T^{ij} \cdot \mathbf{f}'_{i,j-1} + C_B^{ij} \cdot \mathbf{f}'_{i,j+1} + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}'_{i,j} = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.35)$$

ile verilir. Bağlantı katsayıları,

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1} + \Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i-1,j}}{2\Delta x_{i-1}} \right], \quad (1.36)$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right], \quad (1.37)$$

$$C_B^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j}}{2\Delta z_j} \right] \quad (1.38)$$

ve

$$P = k_y^2 \cdot \left[\frac{\mathbf{s}_{i-1,j-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\mathbf{s}_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_j}{4} \right]$$

$$R = \left[\frac{\Delta z_j \cdot \mathbf{s}_{i-1,j} + \Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1}}{2} \mathbf{a} \cos(\mathbf{q}) \right]$$

olmak üzere

$$C_P^{ij} = -(C_L^{ij} + C_T^{ij} + C_B^{ij} - P) + R \quad (1.39)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

g. Alt kenardaki düğüm noktaları için bağlantı katsayılarının hesaplanması

Sonlu-farklar ağının alt kenarındaki düğüm noktaları için ($i = 2, \dots, N-1$ ve $j = M$) geçerli sonlu-farklar denklemi,

$$C_L^{ij} \cdot \mathbf{f}'_{i-1,j} + C_R^{ij} \cdot \mathbf{f}'_{i+1,j} + C_T^{ij} \cdot \mathbf{f}'_{i,j-1} + C_P^{ij} \cdot \mathbf{f}'_{i,j} = \frac{I}{2} \mathbf{d}(x_s) \mathbf{d}(z_s) \quad (1.40)$$

ile verilir. Bağlantı katsayıları

$$C_L^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1}}{2\Delta x_{i-1}} \right], \quad (1.41)$$

$$C_R^{ij} = - \left[\frac{\Delta z_{j-1} \cdot \mathbf{s}_{i,j-1}}{2\Delta x_i} \right], \quad (1.42)$$

$$C_T^{ij} = - \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1} + \Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j-1}}{2\Delta z_{j-1}} \right] \quad (1.43)$$

ve

$$P = k_y^2 \cdot \left[\frac{\mathbf{s}_{i-1,j-1} \cdot \Delta x_{i-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{4} + \frac{\mathbf{s}_{i,j-1} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta z_{j-1}}{4} \right]$$

$$R = \left[\frac{\Delta x_{i-1} \cdot \mathbf{s}_{i-1,j-1} + \Delta x_i \cdot \mathbf{s}_{i,j-1}}{2} \mathbf{a} \cos(\mathbf{q}) \right]$$

olmak üzere

$$C_P^{ij} = -(C_L^{ij} + C_R^{ij} + C_T^{ij} - P) + R \quad (1.44)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

Ağdaki düğüm noktaları sol üst köşeden başlamak üzere dikey yönde artan şekilde numaralandırılmıştır. Buna göre k numaralı düğüm noktası ile ilgili bağlantı katsayıları A dizeyinin k numaralı satırında yer almaktadır.

Baglanti katsayilarinin A dizeyindeki yerleri, $n = (i-1) \cdot M + j$ olmak üzere izleyen sekilde bulunabilir:

$$A(n, n - M) = C_L^{ij},$$

$$A(n, n + M) = C_R^{ij},$$

$$A(n, n - 1) = C_T^{ij},$$

$$A(n, n + 1) = C_B^{ij},$$

$$A(n, n) = C_P^{ij}.$$

EK-2

```
function [V]=tfd(VF,yky,nky,n)
D4=1.D-40;
for IP=1:25
    VA=VF(1,IP)*yky(1);
    for IKY=2:nky
        IK1=IKY-1;
        DYK=yky(IKY)-yky(IK1);
        Y1=VF(IK1,IP);
        Y2=VF(IKY,IP);
        if abs(Y1)<D4 break
        end
        if abs(Y2)<=D4
            if Y2>=0 Y2=abs(D4); end;
            if Y2<0 Y2=-abs(D4); end;
        end
        if (Y1/Y2)<0 break
        end
        A=log(Y1/Y2)/DYK;
        if A~=0.d0
            VA=VA+(Y1-Y2)/A;
        end
    end
    V(IP)=VA/pi;
end
```

Verilen alt programa gelen degiskenler VF, nky adet Fourier dönüşüm katsayisi için hesaplanmış gerilimleri, yky, dönüşüm katsayıları, n, ise ağın x- yönündeki düğüm sayısıdır. VF, nky x n boyutundadır. Programın çıkışı ise uzay ortamında yalnızca yüzeydeki düğüm noktalarındaki gerilimleri içeren V dizeyidir. V, 1xn boyutundadır.

ÖZGEÇMİS

1976 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ankara'da tamamladıktan sonra 1994 yılında lisans eğitimine başladığı Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nden 1998 yılında Jeofizik Mühendisi unvanıyla mezun oldu. 2002 yılında Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2003 yılından bu yana Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.