



Uygulamalı jeofizikte metasezgiseller Metaheuristics in applied geophysics

Gökhan GÖKTÜRKLER^{1*}, Çağlayan BALKAYA², Yunus Levent EKİNCİ³, Seçil TURAN¹

¹Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
gokhan.gokturkler@deu.edu.tr, secil.turan@deu.edu.tr

²Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
caglayanbalkaya@sdu.edu.tr

³Arkeoloji Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis, Türkiye.
ylekinci@beu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 19.05.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 17.08.2015
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.81904
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, parçacık sürü optimizasyonu (PSO), genetik algoritma (GA), farksal evrim (FE) ve yapay ısı işlem (Yİİ) algoritmalarını kapsayan dört metasezgisel algoritma jeofiziğin bir, iki ve üç boyutlu (1B, 2B ve 3B) ters çözüm problemlerinde kullanılmıştır. Doğal uçlaşma (DU), doğru akım öz direnç (DAÖ), manyetik ve karşılıklı kuyu yer radarı uygulamalarından elde edilen kuramsal ve/veya alan veri kümeleri yukarıda değitilen metasezgisellerden biriyle değerlendirilmiştir. PSO, hem sentetik olarak üretilen hem de Güney Bavyera'da (Almanya) bir grafit yatağında ölçülen DU anomalilerinin model parametrelerinin (elektrik dipol moment, uçlaşma açısı, derinlik, biçim faktörü ve anomali orijini) belirlenmesinde kullanılmıştır. Gerçek değer kodlamalı GA, hem kuramsal hem de Bozdağ, İzmir'de (Türkiye) karstik bir ortamda toplanan düşey elektrik sondajı veri kümelerinden yatay tabakalı yer modelinin parametrelerini (tabaka öz direnç ve kalınlıklarını) kestirmek için kullanılmıştır. Sentetik bir karşılıklı kuyu yer radarı verisinden 2B'lu yeraltı radar hız dağılımının görüntülenmesi amacıyla Yİİ ve yuvarlatma kısıtlı doğrusallaştırılmış en küçük kareler yönteminin ardışık kullanılmasına dayanan melez bir yaklaşım uygulanırken; FE algoritması kuramsal olarak üretilen bir toplam alan manyetik anomali haritasının 3B'lu ters çözümünde kullanılmıştır. Her bir metasezgisel algoritmanın gerek duyduğu kullanıcı tanımlı parametreler incelenen problemler dikkate alınarak test çalışmalarıyla belirlenmiştir. Ayrıca, metasezgiseller tarafından elde edilen sonuçların güvenilirlikleri çeşitli istatistiksel ve belirsizlik analizleriyle araştırılmıştır. Burada kullanılan metasezgisellerin çeşitli jeofizik problemlerin model parametrelerinin kestiriminde başarılı sonuçlar üretmesi bu algoritmaların, jeofiziğin küçük ve görece büyük boyutlu veri kümelerine uygulanabilirliğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Metasezgisel, Parçacık sürü optimizasyonu, Genetik algoritma, Farksal evrim, Yapay ısı işlem, Uygulamalı jeofizik

Abstract

In this study, four metaheuristic algorithms including particle swarm optimization (PSO), genetic algorithm (GA), differential evolution (DE) and simulated annealing (SA) were used for one-, two- and three-dimensional (1D, 2D and 3D) geophysical inverse problems. Theoretical and/or field data sets obtained by self-potential (SP), direct current resistivity (DCR), magnetic and crosshole radar applications were interpreted by one of the above-mentioned metaheuristics. PSO was used to determine model parameters (i.e., the electric dipole moment, polarization angle, depth, shape factor and origin of the anomaly) of SP anomalies which are both synthetically generated and measured over a graphite deposit in the southern Bavarian woods, Germany. A real-valued GA was used for estimating the parameters of a horizontally-layered earth model (i.e., resistivity and thickness of each layer) from vertical electrical sounding curves via the data sets based on both theoretical and a field experiment in a karstic environment in Bozdağ, İzmir (Turkey). A synthetic crosshole radar data set was considered for 2D imaging of the subsurface radar velocity distribution by a hybrid approach based on sequential use of SA and a linearized smoothness-constrained least-squares scheme, and DE algorithm was applied for a 3D inversion of a synthetically produced total field magnetic anomaly map. User-defined parameters required by each metaheuristic algorithm were determined by test studies considering the problems studied. Confidences in the results obtained by the metaheuristics were also examined by various uncertainty and statistical analyses. Since the metaheuristics used here produced satisfactory results for estimating the model parameters of a variety of the geophysical problems, it can be concluded that these algorithms can be applied to low- and relatively high-dimensional geophysical data.

Keywords: Metaheuristic, Particle swarm optimization, Genetic algorithm, Differential evolution, Simulated annealing, Applied geophysics

1 Giriş

Bir modele veya sisteme ait parametrelerin en uygun değerlerinin saptanması olarak tanımlanabilecek olan optimizasyon (en iyileme) uygulamaları, bilimsel araştırmalarda ve mühendislik çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Son yıllarda sezgisel (heuristic) yani deneme-yanılma yöntemi olarak tanımlanabilecek olan yaklaşımlar parametre kestirim problemlerinin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bir başlangıç modelinden hareket edip onun iyileştirilmesine dayanan belirlenimci (deterministik) algoritmaların (örn. türev temelli yöntemler) aksine sezgisel yöntemler stokastik (rastgele) süreçleri temel alan bir arama yöntemiyle parametre uzayında problemin

çözümünü doğrudan bulmaya çalışırlar. Bu bağlamda bir metasezgisel ise bu arama sürecine yön veren, kılavuzluk eden bir strateji olarak tanımlanabilir. Çoğunlukla doğadaki süreçlerden esinlenerek geliştirilen metasezgisel algoritmaların iyi bir başlangıç noktasına ihtiyaç duymadan çözüm üretebilmeleri ve yerel (lokal) optimumlardan çıkarak genel (global) optimumlara ulaşabilmeleri en önemli özellikleridir. Bir metasezgiselle yeteri kadar süre verilirse algoritma, global optimuma (en iyiye) veya onun yakınındaki bir noktaya genellikle ulaşmaktadır [1]-[4]. Metasezgisel yaklaşımların jeofizikteki kullanımı da giderek artmaktadır. Bu çalışma kapsamında doğaları birbirinden farklı ve yaygın olarak tercih edilen metasezgisel algoritmaların jeofiziksel parametre kestirimindeki kullanımına güncel literatür bilgisiyle birlikte örnekler verilmektedir.

Yeraltının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve böylece çeşitli mühendislik ve jeoloji problemlerinin çözümü için doğal uçlaşma (DU), doğru akım öz direnç (DAÖ), manyetik ve yere nüfuz eden radar (ground-penetrating radar, GPR) gibi uygulamalı jeofiziğin zarar vermeyen (nondestructive) yöntemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. DU yöntemi, yer içinde doğal olarak oluşan elektrik potansiyellerinin yer yüzeyi boyunca ölçülmesi esasına dayanır. Bu potansiyeller, elektrokimyasal, termoelektrik ve akma potansiyeli gibi mekanizmalarla ilişkili süreçler tarafından üretilirler [5]. Hızlı ve düşük maliyetli bir ölçüm yöntemi olması nedeniyle heyelan, çevre problemleri, yeraltı suyu, jeotermal ve mineral arama çalışmaları gibi çok sayıda uygulamada tercih edilen bir yöntemdir [6]-[10]. DAÖ yöntemi, temelde yere uygulanan bir elektrik akımına yerin tepkisinin ölçülmesi ilkesine dayanır. Buna göre yeraltındaki elektrik öz direnç dağılımı, yerin yüzeyi boyunca alınan görünür öz direnç ölçümlerinden elde edilebilir. Bu amaçla, iki elektrot yardımıyla yerin yüzeyine bir elektrik akımı uygulanır ve diğer iki elektrot arasındaki potansiyel farkı (volta) ölçülür. Bu yöntemde genellikle, yüzeyden derine doğru olan öz direnç değişimlerinin saptanmasında düşey elektrik sondajı (DES) tekniği kullanılır. Bu teknik yeraltı suyu araştırmaları, yeraltı suyu kirlilik çalışmaları, tatlı/tuzlu su girişimi problemleri ve jeotermal aramalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [11]-[14].

Yerin manyetik alanında, manyetik özelliğe sahip mineraller ve cisimlerin neden olduğu anomalilerin (belirtilerin) incelenerek çeşitli jeolojik problemlerin çözümü ve yeraltında gömülü haldeki nesnelere saptanması jeofizikte manyetik aramalarının ilgi alanına girer. Manyetik araştırmalar, arkeolojik prospeksiyon gibi küçük ölçekli araştırmalardan [15]-[17] farklı manyetik özelliklere sahip kayaçların sınırlarının belirlenmesi gibi büyük ölçekli araştırmalara uzanan geniş bir yelpazeye sahiptir [18]-[20]. GPR yeraltının elektriksel özelliklerinin araştırılmasında kullanılan girişimsel olmayan (noninvasive) bir tekniktir. Bu yöntem yüksek frekanslı bir elektromanyetik sinyalin (radar sinyali) bir verici antenden yere iletilmesi ve tabaka sınırlarından ve/veya gömülü nesnelere yansıtılarak/saçılarak geri gelen ve şekil değiştiren bu sinyalin alıcı antenler tarafından varış zamanının bir fonksiyonu olarak kaydedilmesi esasına dayanır. GPR yöntemi; buzul araştırmaları, donmuş toprak, boşluk, sığ akifer araştırmaları gibi jeolojik, hidrojeolojik, mühendislik, çevre, arkeolojik prospeksiyon ve adli bilimlere ilişkin çok geniş bir aralıkta kullanılmaktadır [21]-[26]. GPR sinyalinin ayrımlılığı derinlikle hızlı bir şekilde azaldığından, yeraltının ayrıntılı çalışılmasının gerektiği ve yeraltı suyu seviyesinin sığ olduğu durumlarda karşılıklı kuyu dizilimini temel alan bir GPR çalışması daha uygundur [27]-[29].

Parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization, PSO), genetik algoritma (genetic algorithm, GA), farksal evrim (differential evolution, FE) ve yapay ısıl işlemi (simulated annealing, Yİ) içeren dört farklı metasezgisel algoritma DU, DES, manyetik ve karşılıklı kuyu radar çalışmalarına ait jeofizik verilerin model parametre kestirimi çalışmalarında kullanılmıştır [30]-[33]. Bunlardan PSO, GA ve FE popülasyon (topluluk) temelli tekniklerken literatürde *tavlama benzetimi* olarak da bilinen Yİ, metalürjide bir eriyiğin soğutulması sürecinde kristal yapısının kontrollü bir şekilde yeniden oluşturulması esasına dayanan stokastik bir algoritmadır [34],[35]. GA biyolojideki genetik ve evrim kavramlarını kullanan gelişimsel (evrimsel) bir algoritmadır [36]. PSO sürüler halinde yaşayan hayvanların davranışlarını temel alır. Türkçe literatürde *diferansiyel gelişim* olarak da

adlandırılan FE doğadaki bir süreci kendine temel almak yerine topluluk içinden rastgele seçilmiş iki bireyin ağırlıklı farkını alıp bir üçüncüsüne ekleyerek yeni bireyler ve yeni bir topluluk oluşturur [37].

Bu çalışmada çeşitli veri kümeleri kullanılarak çözümler yapılmıştır. Bir boyutlu (1B) örnekler kapsamında hem kuramsal (yapay) hem de arazi verileri içeren DU verileri PSO kullanılarak [2],[38]-[40] ve DAÖ verileri de GA kullanılarak [41]-[43] model parametre kestirimleri yapılmıştır. İki boyutlu (2B) örnek için sentetik (yapay) karşılıklı kuyu GPR verisi Yİ ve doğrusallaştırılmış, yuvarlatma kısıtlı en küçük kareler algoritmalarının kullanıldığı sıralı melez (hibrit) tomografik ters çözüm yaklaşımıyla modellenerek iki kuyu arasındaki radar hız dağılımı saptanmıştır [44]. Üç boyutlu (3B) örnek kapsamında ise yine kuramsal olarak üretilmiş olan toplam alan manyetik anomali (belirti) haritası FE algoritmasıyla modellenmiştir [45],[46]. Algoritmalar ile uygulandıkları jeofizik problemin seçiminde algoritmanın performansı ve problemin zorluk derecesi dikkate alınarak bir eşleştirme yapılmış ve problemler göreceli olarak kolaydan zora doğru olan bir sıralamayla incelenmiştir. Metasezgisel bir algoritmanın performansı ile ele alınan problemdeki model parametre (bilinmeyen) sayısı arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Tomografik ters çözüm gibi bilinmeyen sayısının çok fazla olduğu bir problemin sadece metasezgisel bir algoritmayla çözümü hesaplama ekonomisi açısından yüksek maliyetli ve zor bir işlem olduğundan; GPR verisinin modellenmesinde sıralı bir hibrit yaklaşım tercih edilmiştir.

2 Metasezgisel algoritmalar

2.1 Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), [30] tarafından kuş ve balık gibi sürüler halinde yaşayan canlıların yiyecek ararken sergiledikleri davranışlardan esinlenerek geliştirilen topluluk temelli ve sürü zekâsına dayalı metasezgisel bir yöntemdir. PSO'da, rastgele bir süreçle oluşturulmuş bir başlangıç topluluğu (aday çözümler kümesini temsil eden bir parçacık topluluğu) arama uzayında rastgele bir şekilde konumlandırılır. Bu yöntemde parçacıklara konum (x) bilgilerinin yanında bir de hız (v) bilgisi atanır ve yineleme her parçacığın uygunluk değerinin bir amaç fonksiyonuna göre hesaplanmasıyla başlatılır.

Hesaplanan uygunluk değerinin parçacığın önceki en iyi değerinden ($pbest_i$) daha iyi olması durumunda $pbest_i$, yeni uygunluk değerine ve parçacığın önceki en iyi konumu (p_i)'de güncel geçerli konum (x_i)'ye eşitlenir. $pbest_i$ 'ler arasında en küçük amaç fonksiyonunu üreten değer global en iyi değer $gbest_i$ olarak atanır ve her bir yinelemede güncellenir. Bu ana kadar arama uzayında en iyi uygunluk değerine sahip parçacık bulunduktan sonra, onun konumu global en iyi konum (g_i) olarak güncellenir.

$$v_i = \omega v_i + c_1 rand() (p_i - x_i) + c_2 rand() (g_i - x_i), \quad (1a)$$

$$x_i = x_i + v_i. \quad (1b)$$

Burada, ω atalet ağırlık katsayısı ($0 < \omega < 1$), c_1 ve c_2 sırasıyla parçacığın bilişsel ve sosyal davranışını kontrol eden katsayılar (kullanıcı tanımlı kontrol parametreleri) ve $rand()$ ise $[0, 1]$ arasında tekdüze (uniform) dağılımlı rastgele sayıdır. Algoritma, önceden belirlenen bir yineleme sayısına veya amaçlanan bir uygunluk değerine ulaşıncaya sonlandırılır [1],[51]-[53]. Şekil 1a'da yukarıda açıklanan algoritma adımları bir akış diyagramı şeklinde verilmektedir.

2.2 Genetik algoritma

Evrimsel bir algoritma olan ve biyolojideki genetik ve evrim olgularından esinlenerek geliştirilmiş genetik algoritma (GA), topluluk tabanlı metasezgisel algoritmaların genel bir özelliği olarak başlangıç topluluğunun (aday çözümler kümesinin) rastgele bir süreçle oluşturulmasıyla başlar. Her bir bireyin (aday çözüm) uygunluk değeri (fitness) amaç fonksiyonu dikkate alınarak saptanır. Doğal olarak GA bu uygunluk değerlerini en büyükmeye amaçlar, ancak hata enerjisinin en küçükleneceği çalışıldığı bir problemde, bireylerin uygunlukları amaç fonksiyonunun tersi alınarak hesaplanır. Değerlendirme aşamasında algoritma seçim, çaprazlama ve mutasyondan oluşan genetik operatörleri kullanarak başlangıç topluluğundan yeni bir topluluk üretir (Şekil 1b). Başlangıç topluluğundaki bireyler arasından uygunluk değerleri dikkate alınarak en az iki birey ebeveyn olarak seçilir ve yeni iki bireyin (yeni iki çözümün) üretilmesi için bir çaprazlama olasılığıyla (P_c) çaprazlanırlar. Çaprazlamanın ardından çözümün yerel en iyiden çıkabilmesini sağlamak ve toplulukta çeşitliliğin sürdürülebilmesi amacıyla bu yeni bireyler bir mutasyon olasılığıyla (P_m) mutasyona uğratılırlar. Bu şekilde üretilen yeni nesil yukarıda değinilen adımlar tekrarlanarak bir sonraki neslin elde edilmesinde kullanılır. Algoritma, genellikle önceden belirlenen bir maksimum nesil sayısına ulaşıncaya sonlandırılır. En iyi uygunluk değerine sahip birey problemin çözümü olarak değerlendirilir [1],[54].

Bu çalışmada, parametre kestirimi için gerçek değerli bir GA yaklaşımı kullanılırken yeni topluluğun oluşturulmasında seçkin (elitist) yaklaşım ve konveks çaprazlama yöntemi kullanılmıştır.

2.3 Farksal evrim algoritması

Topluluk tabanlı, metasezgisel bir algoritma olan farksal evrim (FE) algoritması [32] genel olarak araştırmacılar tarafından basit, etkili ve kararlı bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Algoritma, kolay uygulanabilir olması, GA gibi sadece birkaç kontrol parametresi gerektirmesi ve hızlı yakınsama özelliği nedeniyle matematik, fizik, biyoloji, akustik, mekanik, medikal görüntüleme, optik ve sismoloji gibi oldukça farklı disiplinlerde kullanılmıştır [55]. FE topluluktan rastgele seçilen iki birey arasındaki ağırlıklandırılmış farkın bir üçüncüsüne eklenerek her nesilde yeni bireyler bulunmasını amaçlar [37]. GA'ya benzer olarak algoritma rastgele bir başlangıç topluluğunun oluşturulmasından sonra önceden belirlenen bir sonlandırma ölçütü gerçekleşene kadar bu topluluğun sırasıyla mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleriyle (Şekil 1c) bir nesilden diğerine evrilmesi temeline dayanmaktadır [56]. Bununla birlikte, FE ve GA arasındaki en önemli fark evrim döngüsünde genetik operatörlerin yukarıda belirtildiği gibi GA'dan farklı bir sırada kullanılmasıdır (bk. Şekil 1b). Çaprazlamadan önce gerçekleştirilen mutasyon FE'nin başarısında en önemli rolü üstlenen operatördür. FE, üstel ve binominal olmak üzere iki farklı çaprazlama yaklaşımı ve beş farklı mutasyon operatörü sayesinde çoklu strateji seçeneği sunmaktadır [57].

Bu çalışma kapsamındaki model parametre kestirimlerinde, FE algoritmasında yaygın olarak uygulanan stratejilerden biri olan "DE/best/1/bin" jeofizik problemlerin modellenmesindeki başarısı nedeniyle tercih edilmiştir [63]. Burada *bin*, binominal çaprazlamayı; *1*, bir adet fark vektörünün ve *best* ise elitist seçimi uygulayan mutasyon operatörünün kullanıldığını göstermektedir. Diğer stratejiler ve bunlar hakkında daha detaylı bilgiler [57]'de bulunabilir. Uygulanan stratejiye ait mutasyon bağıntısı aşağıda yer almaktadır.

$$v_{i,G} = x_{best,G} + F (x_{r_1,G} - x_{r_2,G}) \quad (2)$$

Burada i topluluk içindeki birey indeksini; G geçerli olan nesli; x_{best} geçerli nesildeki en iyi bireyi (parametre vektörünü); F mutasyon sabitini (ağırlık katsayısını); x_{r_1} ve x_{r_2} fark hesabında kullanılan vektör (yöney) çiftini; $v_{i,G}$ ise mutasyon sonucu elde edilen bireyi temsil etmektedir.

2.4 Yapay ısı işlem algoritması

Yapay ısı işlem algoritması, bir en iyileme problemiyle metalürjideki tavlama sürecini (bir eriyiğin kontrollü bir şekilde katılma sürecini) ilişkilendiren stokastik bir yöntemdir. Bu algoritmada katılma sürecindeki yüksek enerjili düzeye (eriyik hal) düşük enerjili düzeye (katı hal) geçiş ve cismin katılma süreciyle ulaştığı minimum enerji düzeyi esas alınır. Bu yaklaşımda amaç fonksiyonunun ve parametrelerin değerleri sırasıyla erimiş metaldeki enerji seviyelerine ve moleküllerin konumlarına karşılık gelmektedir. E_0 yanılıgına sahip bir parametre kümesinden rastgele yürüyüşle (random walk) yeni bir küme elde edilir. Eğer yeni küme bir E yanılıgına sahipse ve $E < E_0$ ise yeni küme bir öncekinin yerine geçer böylece yeni bir parametre kümesi elde edilmiş olur. Ters durumda, yani $E \geq E_0$ ise, yeni kümenin kabul edilme olasılığı aşağıda verilen Boltzman dağılımına göre belirlenir:

$$f(\Delta E) = \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) \quad (3)$$

Burada, $\Delta E = E - E_0$, k Boltzman sabiti ve T sıcaklıktır. Yukarıda belirtilen adımlar sabit bir sıcaklıkta minimum enerji seviyesine (yani denge durumuna) ulaşmış bir parametre kümesi elde edilinceye kadar tekrarlanır ve bu yöntem Metropolis algoritması olarak bilinir [58]. [33] bu algoritmayı kontrollü bir soğutma yaklaşımıyla genelleştirerek tavlama benzetimi (erimiş metallerin kontrollü bir şekilde katılma) veya yapay ısı işlem olarak bilinen yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemde ait akış diyagramı Şekil 1d'de verilmektedir. Bu yaklaşımda, sıcaklık belli bir soğutma izlencesiyle azaltılırken, minimum yanılıgı değeri üreten model parametreleri global bir minimuma ulaşılan kadar her bir sıcaklıkta araştırılır [1],[35],[59]. Soğutma izlencesinde [60]'daki yaklaşım kullanılmıştır. Burada Denklem 3'teki Boltzman sabiti k ile sıcaklık T çarpımı (paydadaki kT terimi) kontrol parametresi K olarak adlandırılan tek bir terim olarak dikkate alınmış ve çözüm esnasında bu parametrenin değeri azaltılarak soğutma uygulanmıştır. Aşağıda tanımlandığı haliyle yalın bir soğutma izlencesi uygulanmıştır:

$$K_{n+1} = v K_n \quad (4)$$

Burada v soğutma faktörü olup sayısal değeri deneysel olarak belirlenir. Bu parametreye genellikle 1.0'e yakın bir değer atanması önerilir [60]. Böylece algoritmaya, tavlama (annealing) simüle eden bir yavaş soğutma özelliği kazandırılmak amaçlanır. Bu nedenle soğutma faktörüne deneme-yanılmayla 0.998 değeri atanmıştır.

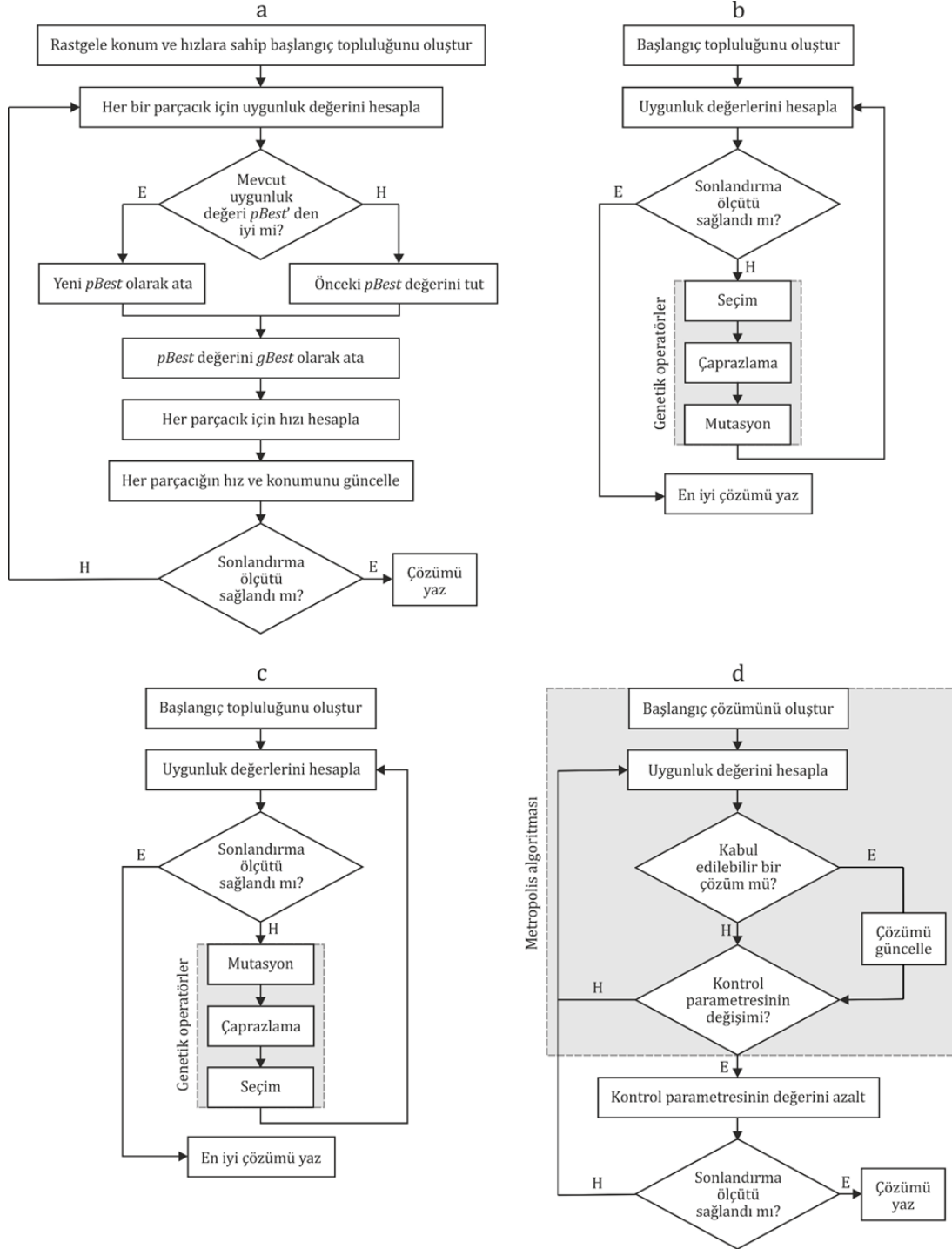
3 Parametre kestirim çalışmaları

Buradaki çalışmalar kapsamında hata enerjisini en küçükmeye amaçlayan en iyileme problemleri dikkate alındığından gözlenen ile hesaplanan veri arasındaki hata enerjisinin bir ölçüsünü veren aşağıdaki amaç fonksiyonu kullanılmıştır:

$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (d_i^{göz} - d_i^{hes})^2 \quad (5)$$

Burada, M veri sayısını, $d_i^{göz}$ ve d_i^{hes} ise gözlenenle hesaplanan verileri göstermektedir. Bu çalışmada parametre kestirimi için kullanılan topluluk temelli algoritmalar (GA, PSO ve FE) her bir parametre için önceden belirlenen alt ve üst sınırları dikkate alıp stokastik bir süreçle bir başlangıç topluluğu oluşturarak çözüme başlamakta ve her problem birden fazla kez

çözülmemektedir (kaç defa çözüm yapılacağı probleme göre değişebilmektedir). Mevcut çözümler içinde en iyi olan (en küçük amaç fonksiyonu değerine sahip olan) problemin çözümü olarak atanmaktadır. Buradaki test çalışmalarında gözlenenle hesaplanan veri arasındaki uyumun bir ölçütü olarak amaç fonksiyonunun (hata enerjisinin) karekök ortalama değeri (rms) hesaplanmıştır. Bu da Denklem 5 yardımıyla hesaplanan E değerinin karekökünün alınmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 1: Akış diyagramları, (a): PSO [47]'den, (b): GA [48]'den, (c): FE [49]'dan, (d): YII [50]'den değiştirilerek alınmıştır.

3.1 DU verilerinin PSO ile ters çözümü

Yeraltında polarize olmuş basit geometrik şekle sahip cisimlerin yeryüzünde oluşturdukları DU anomalisi (Şekil 2a ve b), elektrik dipol moment ($K, mV m^{2q-1}$), polarizasyon açısı ($\theta, ^\circ$), derinlik (z_0, m), biçim faktörü (q) ve anomali orijininin (x_0, m) oluşan parametreler yardımıyla aşağıdaki gibi tanımlanır [61],[62]:

$$V(x, x_0, K, \theta, z_0, q) = K \frac{(x - x_0) \cos \theta + z_0 \sin \theta}{[(x - x_0)^2 + z_0^2]^q} \quad (6)$$

Burada, x (m) yatay uzaklıktır. Birimsiz bir büyüklük olan biçim faktörü q ise yarı sonsuz düşey silindir için 0.5, ölçüm profiline dik sonsuz uzunlukta yatay silindir için 1.0 ve küre için 1.5 değerini alır (Şekil 2c).

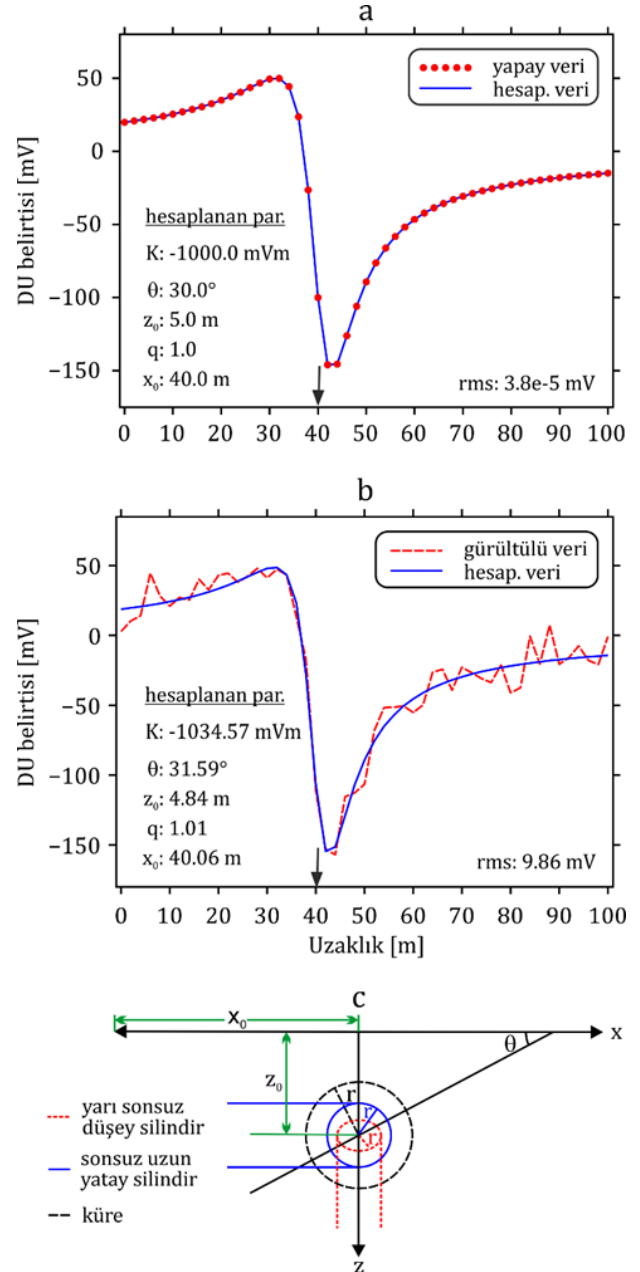
PSO algoritması yardımıyla yapılan parametre kestirim çalışmasında ilk aşamada Denklem 6 yardımıyla üretilen kuramsal veri ve buna sıfır ortalamalı ve standart sapması ± 10 mV olan rastgele (pseudo random) sayı eklenerek elde edilen gürültülü veri kümeleri kullanılmıştır. Şekil 2a ve b sırasıyla, Tablo 1'de kuramsal veri için verilen doğru model parametre değerleri kullanılarak [63] elde edilen yapay ve gürültülü DU verilerini göstermektedir.

PSO algoritmasının başarısı, büyük ölçüde, ele alınan probleme uygun olarak PSO katsayılarına ait değerlerin saptanmasına (parameter tuning) bağlıdır. Bu nedenle, model parametrelerinin kestiriminde kullanılacak bu katsayıların (ω, c_1 ve c_2) belirlenmesi amacıyla çeşitli araştırmacılar ([30], [51], [65]-[70]) tarafından önerilen katsayıların performansı gürültüsüz DU verisi (Şekil 2a) kullanılarak test edilmiştir. Bu test çalışmaları Tablo 1'de belirtilen parametre arama uzayı sınırları içinde ve 25 parçacıktan (Np) oluşan bir topluluk kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmalara ait sonuçlar Tablo 2'de yer almaktadır. Çözümler, her biri 50 nesilden (G) oluşan birbirinden bağımsız 20 ayrı çözüm arasında en iyi amaç fonksiyonu karekök ortalama (rms) değerine sahip olanlardır. Önerilen katsayıların performanslarının daha iyi ortaya konulabilmesi için çözümler görece az sayıda parçacık ve nesil sayısı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde [68] tarafından önerilen katsayıların (bk. Tablo 2'de set 6) hem en küçük amaç fonksiyonu değeri ($0.239 mV$) diğer bir deyişle en küçük hata enerjisi hem de amaç fonksiyonu istatistiği açısından diğerlerinden daha başarılı olduğu görülmektedir. Tablo 3 incelendiğinde ise bu katsayıların 100 parçacık ve 200 nesil kullanılarak yapılan çözümlerde daha da başarılı sonuçlar ürettiği gözlenmektedir. Dolayısıyla hem kuramsal hem de arazi verilerini içeren DU belirtilerinin ters çözümünde yukarıda belirtilen PSO katsayıları ve $Np = 100$ ile $G = 200$ 'den oluşan bir PSO yapılandırması kullanılmıştır. 20 bağımsız çözüm arasından istatistiksel ve CPU zamanı anlamında en iyi rms değerine sahip parametre kümesi çözüm olarak atanmıştır. Kuramsal veriye ait her iki çözümde de (Şekil 2a ve b) kestirilen parametre değerleriyle doğru değerler arasında iyi bir uyum vardır. Gürültülü veriye ait çözüm (Şekil 2b) verideki gürültü düzeyi oldukça yakın bir rms değeriyle ($9.86 mV$) elde edilmiştir.

Şekil 3'te, model parametrelerinin (Şekil 3a-e) ve hata enerjisinin (Şekil 3f) nesil sayısına göre değişimini gösteren grafikler yer almaktadır. Bu grafiklerde model parametrelerinin yaklaşık 40 nesilden sonra yakınsama eğilimine girdikleri görülmektedir. Benzer şekilde hata enerjisindeki değişim de, PSO algoritmasının hem gürültülü

hem de gürültüsüz DU verisinin çözümünde hızlı bir yakınsama özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 4'te gürültüsüz kuramsal veri kullanılarak yapılan çözümün (Şekil 2a) istatistiksel değerlendirmesi verilmektedir. Burada 20 ayrı çalışma sonunda elde edilen en iyi çözümdeki (modeldeki) her bir parametre için %95 güven aralığı içinde hesaplanmış olasılık yoğunluk fonksiyonu (normal dağılım için), ortalama değer ve ona ait %95 olasılıkla hesaplanmış güven aralığı sınırlarıyla PSO'dan elde edilmiş en iyi değer yer almaktadır. Buradaki gösterimler incelendiğinde her bir parametreye ait en iyi çözümlerin çok dar bir aralıkta değiştiği gözlenmektedir.



Şekil 2: Kuramsal DU belirtisinin PSO ile ters çözüm sonuçları, (a): Gürültüsüz, (b): Gürültülü veri, (c): Model. Yatay eksen üzerindeki düşey ok x_0 noktasını göstermektedir.

Tablo 1: Kuramsal DU verisine ait doğru model parametre değerleri ve PSO'da hem kuramsal hem de arazi verisi model parametre kestiriminde kullanılan arama uzayı sınırları.

Model par.	Kuramsal veri ¹			Alan verisi ² (Bavyera, Almanya)	
	Doğru değer	Min.	Max.	Min.	Max.
K [mVm]	-1000	-5000	1000	5000	40000
θ [°]	30	0	90	-80	-40
z_0 [m]	5	0.1	50	30	60
q	1	0.1	2	0.7	10.3
x_0 [m]	40	10	70	240	280

¹: [63], ²: [64].

Tablo 2: Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen PSO katsayılarının performanslarının karşılaştırılması. Her bir katsayı kümesine karşılık gelen amaç fonksiyonunun karekök ortalaması (*rms*) istatistikleri gürültüsüz kuramsal DU anomalisi kullanılarak 25 birey ve 50 nesillik bir PSO yapılandırmasıyla gerçekleştirilen 20 bağımsız parametre kestirimindeki en iyi çözümlerden elde edilmiştir.

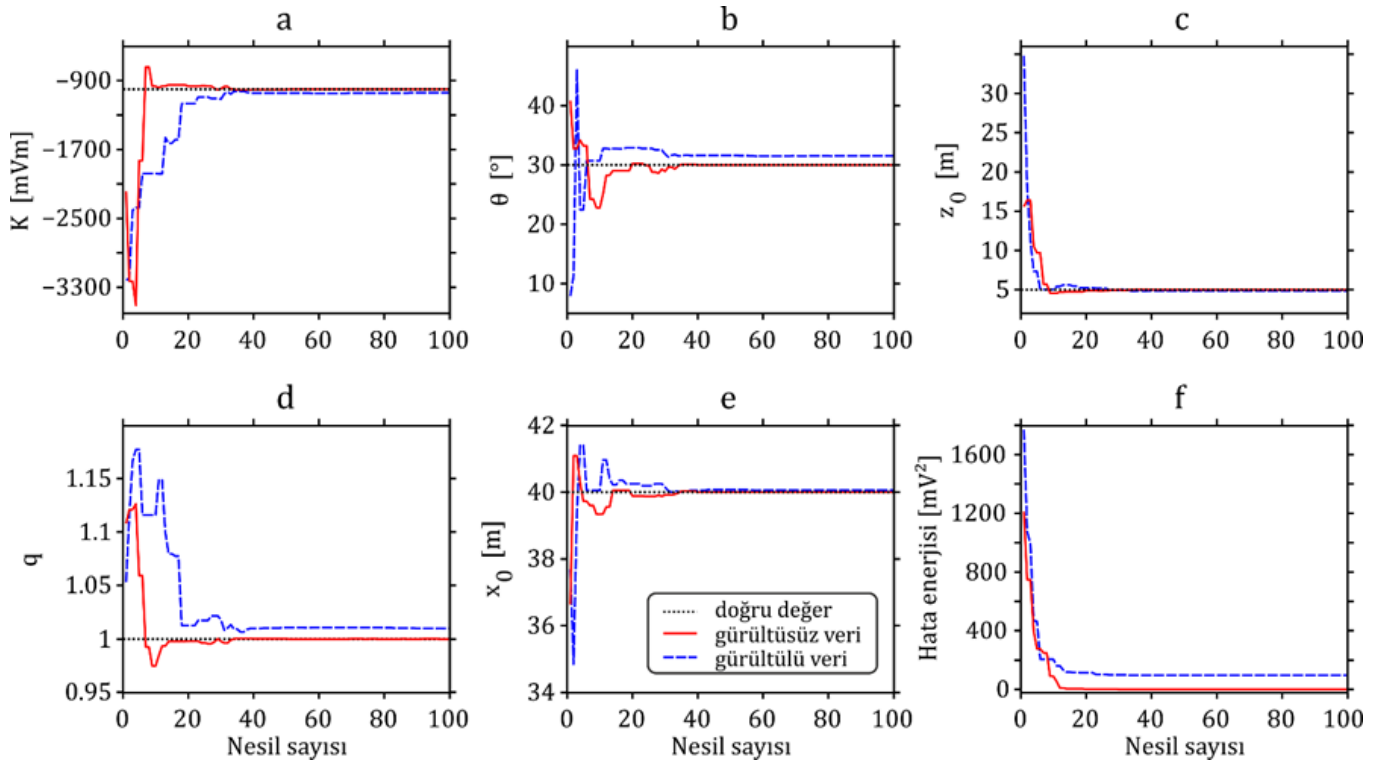
Set	Kaynak	w	c_1	c_2	<i>rms</i> (mV)			
					Min.	Max.	Ort.	Std. S.
1	[30] Kennedy ve Eberhart (1995)	1	2	2	12.425	41.135	26.997	7.572
2	[51] Shi ve Eberhart (1998)	0.9-0.4	2	2	2.797	16.292	9.624	3.762
3	[65] Eberhart ve Shi (2000)	0.729	2.05	2.05	4.063	23.853	13.031	6.333
4	[66] Carlisle ve Dozier (2001)	0.729	2.041	0.948	0.659	7.091	4.135	1.507
5	[67] Clerc ve Kennedy (2002)	0.729	1.494	1.494	1.613	7.757	4.351	1.676
6	[68] Trelea (2003)	0.6	1.7	1.7	0.239	6.517	3.381	1.652
7	[69] Jiang vd. (2007)	0.715	1.7	1.7	0.983	10.021	4.881	1.832
8	[70] Fernández-Martinez vd. (2010)	0.8	1.8	2	6.505	29.886	16.747	7.366

Tablo 3: Parçacık (Np) ve nesil (G) sayılarındaki değişimlerin çözüm üzerindeki etkileri. (Np, G) çiftlerine ait çözümler [68] tarafından önerilen katsayılar (bk. Tablo 2'de set 6) kullanılarak elde edilmiştir. Amaç fonksiyonunun karekök ortalaması (*rms*) istatistikleri gürültüsüz kuramsal DU anomalisi kullanılarak gerçekleştirilen 20 bağımsız parametre kestirimindeki en iyi çözümlerden elde edilmiştir.

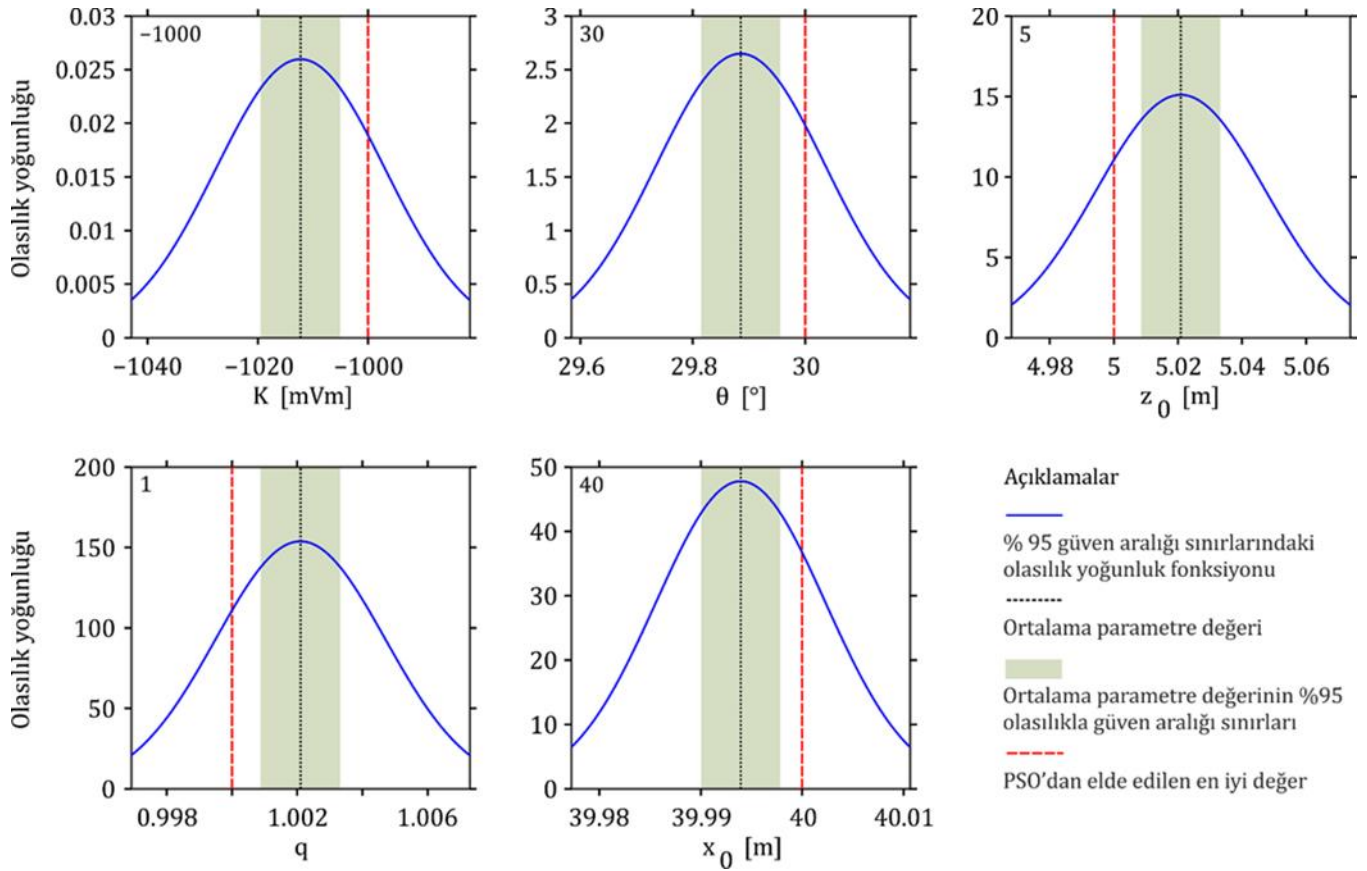
Np	G	Model parametreleri					<i>rms</i> (mV)				CPU süresi [s]
		K [mV m]	θ [°]	z_0 [m]	q	x_0 [m]	Min.	Max.	Ort.	Std. S.	
25	50	-1083.14	29.18	5.14	1.01	39.94	0.387	6.341	3.303	1.830	23.98
	100	-1021.60	29.81	5.04	1.00	39.99	0.098	5.564	2.370	1.304	50.67
	200	-1000.74	29.99	5.00	1.00	40.00	0.004	1.728	0.546	0.443	113.11
	300	-999.17	30.01	5.00	1.00	40.00	0.004	1.201	0.277	0.284	180.05
50	50	-940.26	30.38	4.86	0.99	39.99	0.433	5.013	2.520	1.479	28.69
	100	-964.10	30.34	4.94	0.99	40.02	0.177	4.042	1.657	1.140	60.75
	200	-1006.93	29.93	5.01	1.00	39.99	0.045	1.154	0.349	0.313	144.31
	300	-1001.45	29.98	5.00	1.00	40.00	0.008	0.334	0.082	0.081	246.31
75	50	-873.15	31.30	4.79	0.98	40.06	0.665	5.209	2.706	1.316	30.81
	100	-1027.45	29.66	5.05	1.00	39.98	0.141	2.586	0.840	0.643	69.67
	200	-999.64	30.00	5.00	1.00	40.00	0.002	0.552	0.152	0.160	174.77
	300	-999.65	30.00	5.00	1.00	40.00	0.002	0.087	0.026	0.023	246.70
100	50	-1007.74	29.97	5.01	1.00	40.00	0.069	4.217	1.682	1.222	35.64
	100	-1001.89	29.65	5.01	1.00	39.99	0.036	2.829	0.679	0.699	83.77
	200	-1000.01	30.00	5.00	1.00	40.00	3.8e-5	0.266	0.058	0.071	215.84
	300	-999.92	30.00	5.00	1.00	40.00	4.3e-4	0.074	0.013	0.017	386.55

Jeofizikteki ters çözüm problemlerinin *ill-posed* doğası sebebiyle farklı parametre kümelerinden aynı hata sınırları içinde gözlemsel veriyle çıkışma sağlayan model tepkileri elde edilebilmektedir. Daha önce de değinildiği gibi sezgisel yöntemler yerel en iyilere takılmamak için parametre uzayında rastgele örnekleme yapmaktadır. Bu durumda ulaşılan sonuçların güvenilirliğinin yanında gerçekleştirilen örneklemin doğruluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli belirsizlik değerlendirme analizleri (uncertainty appraisal analysis) uygulanmaktadır. Böyle bir analiz Markov zinciri Monte Carlo algoritmalarıyla gerçekleştirilebilir [34],[71]-[73]. Bu çalışmada, örnekleme ve model parametrelerinin sonrasal olasılık dağılımını (posterior probability distribution) belirlemek için [58] tarafından geliştirilen ve [74] tarafından genelleştirilen Metropolis-

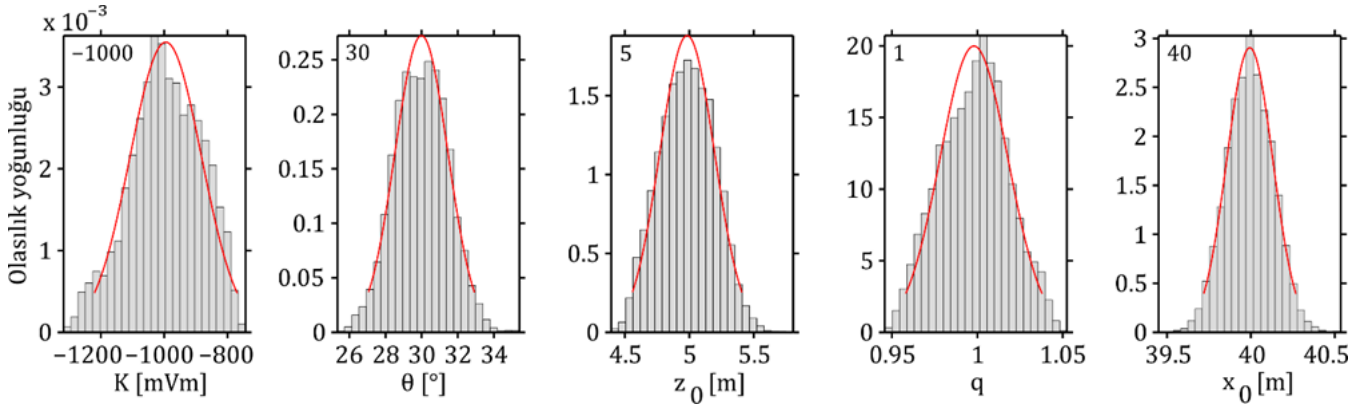
Hastings (M-H) algoritması (bk. [75]) kullanılmıştır. Sabit bir sıcaklıkta ($T = 1$) yani soğutma olmadan YII'in uygulanması esasına dayanan algoritma [63],[72], parametrelerdeki güven aralıklarını sağlayan model kestirimlerinin doğruluğunun araştırılmasına olanak vermektedir. Şekil 5'te, değinilen belirsizlik analizi kapsamında M-H örneklemesinden elde edilen histogramlar ve onlara ait olasılık yoğunluk fonksiyonları yer almaktadır. Olasılık yoğunluk fonksiyonları %95 güven aralığında hesaplanmış olup PSO'dan elde edilen en iyi değerler ayrıca grafikler üzerinde belirtilmektedir. Bu karşılaştırma, PSO'nun güven aralıkları içinde kalan çözümler üretirek başarılı bir örnekleme gerçekleştirdiğini açıkça göstermektedir.



Şekil 3: (a-e): Model parametrelerinin nesil sayısına göre değişimi, (f): Hata enerjisinin nesil sayısına göre değişimi.

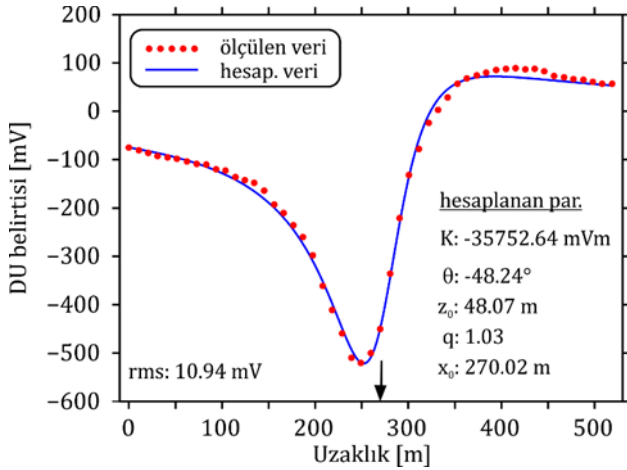


Şekil 4: Gürültüsüz kuramsal DU verisi kullanılarak yapılan 20 ayrı PSO çalıştırması sonunda elde edilen en iyi çözümlere ait parametrelerin istatistiksel değerlendirilmesi. Her bir parametreye ait en iyi PSO çözümünü değerleri ayrıca grafikler üzerinde verilmektedir.



Şekil 5: Metropolis-Hastings yöntemiyle elde edilen histogramlar ve onlara ait %95 güven aralığında çizilen olasılık yoğunluk fonksiyonları. PSO ile ulaşılan parametre değerleri histogramlar üzerinde belirtilmektedir.

Şekil 6 DU arazi verisine ait çözümü göstermektedir. Bu veri [64] tarafından güney Bavyera' da (Almanya) bir grafit yatağı üzerinde ölçülmüştür. Negatif değerlerin baskın olduğu anomali 520 m'lik bir profil boyunca -500 mV ile 100 mV arasında değişim gösteren değerlere sahiptir. Bu çözüm, model parametreleri için Tablo 1'de belirtilen alt ve üst sınırlar kullanılarak elde edilmiştir. 10.94 mV'luk bir rms değeriyle kestirilen model parametreleri kullanılarak hesaplanan model tepkisi, 350-450 m uzaklıkları arasındaki çakışmazlık dışında gözlemsel değerlerle iyi bir uyum göstermektedir.



Şekil 6: Güney Bavyera'da (Almanya) gözlenen DU anomalisinin PSO ile ters çözüm sonucu (veri kümesi [76]'dan uyarlanmıştır).

3.2 DES Verisinin GA ile ters çözümü

DES verisinin ters çözümünde yatay tabakalı bir yer modeli dikkate alınır. Model parametreleri tabaka öz direnç (ρ) ve kalınlıklarından (t) oluşur. Bu yaklaşımda model parametre değerlerinin sadece derinlikle yani düşey yönde değiştiği kabul edilir. GA ile parametre kestirim çalışmalarında hem yapay hem de arazi verileri kullanılmıştır. Yapay veri kümesi, üç tabakadan oluşan bir yer modeli (Şekil 7a) ve Schlumberger dizilimi temel alınarak üretilmiştir. Arazi verisi ise karstik bir ortamda Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak toplanmış bir DES verisinden [43] oluşmaktadır. Kuramsal modele ait doğru parametre değerleri ve arama uzayı sınırları Tablo 4'te verilmektedir.

GA kullanılarak yapılan bir parametre kestiriminde, çözümlen istenen probleme en uygun çaprazlama (Pc) ve mutasyon (Pm) olasılıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla

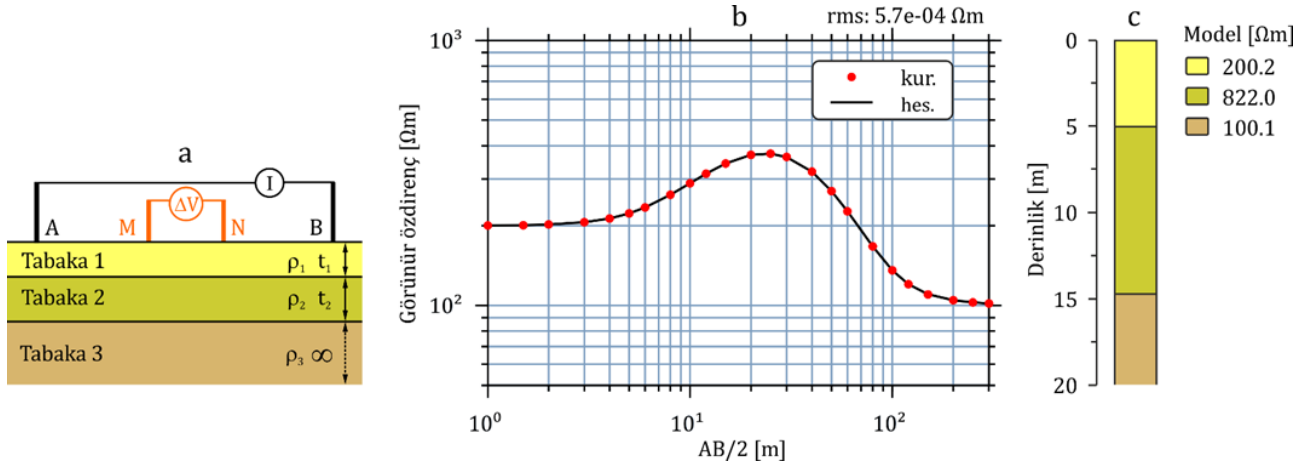
kuramsal veri kümesi kullanılarak test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 25 bireyden (Np) oluşan bir topluluk kullanılmış ve 50 nesillik (G) bir çözüm yapılmıştır. DES için düz çözüm algoritması CPU zamanı anlamında maliyetli olduğundan çeşitli (Np, G) çiftlerinin çözüm üzerindeki etkilerini incelemek yerine bu değerler tecrübelerimize dayalı olarak belirlenmiştir. Tablo 5'te elde edilen sonuçlar verilmektedir. Buradaki çözümlerin her biri 10 ayrı GA çalıştırmasından elde edilen en iyi çözümlerdir. Bu çalışma kapsamında uygulanan tüm metasezgisel algoritmalar için genel olarak verilen amaç fonksiyonunda (Denklem 5) ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki farkları gösteren ifade ($d_i^{göz} - d_i^{hes}$), DES verisinin GA ile ters çözümünde görünür öz direnç değerlerinin logaritmaları alınarak kullanılmıştır. Tablo 5 incelendiğinde istatistiksel olarak en iyi çözümün $Pm = 0.15$ ve $Pc = 0.7$ olarak alındığında elde edildiği görülmektedir. Şekil 7b ve c bu değerler kullanılarak ulaşılan çözümü göstermektedir. Bu şekil incelendiğinde kestirilen parametre değerleriyle doğru değerler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

Şekil 8'de bu çözümlerin (Şekil 7b ve c) istatistiksel değerlendirmesi yer almaktadır. Burada 10 ayrı çalıştırma sonunda ulaşılan en iyi modeldeki her bir parametre için %95 güven aralığı içinde hesaplanmış olasılık yoğunluk fonksiyonu (normal dağılım için), ortalama değer ve ona ait %95 olasılıkla hesaplanmış güven aralığı sınırlarıyla GA'dan elde edilmiş en iyi değer yer almaktadır. Buradaki grafikler incelendiğinde her bir parametreye ait en iyi çözümlerin DU verisinde olduğu gibi dar bir aralıkta değiştiği görülmektedir.

Tablo 4: Kuramsal DES verisine ait doğru model parametre değerleri ve GA'da hem kuramsal hem de arazi verisi model parametre kestiriminde kullanılan arama uzayı sınırları.

Model par.		Sentetik veri ¹		Alan verisi ² (Bozdağ, İzmir)		
		Doğru değer	Min.	Max.	Min.	Max.
Öz direnç [Ωm]	$\rho 1$	200	150	250	400	900
	$\rho 2$	800	600	1000	30	500
	$\rho 3$	100	50	300	500	5000
	$\rho 4$	-	-	-	5000	30000
Kalınlık [m]	$t 1$	5	1	10	0.1	5
	$t 2$	10	5	15	8	30
	$t 3$	-	-	-	3	30

¹: [63], ²: [43].



Şekil 7: (a): Yatay tabakalı yer modeli (A, B: Akım elektrotları; M, N: Potansiyel elektrotları), (b): Kuramsal DES anomalisinin [63] GA ile ters çözüm sonucu, (c): Elde edilen yer modeli.

Tablo 5: Mutasyon (Pm) ve çaprazlama (Pc) olasılıklarındaki değişimlerin çözüm üzerindeki etkileri. Buradaki çözümler $Np = 25$, $G = 50$ alınarak elde edilmiştir. Amaç fonksiyonunun karekök ortalaması (rms) istatistikleri kuramsal DES anomali kullanılarak gerçekleştirilen 10 bağımsız parametre kestirimindeki en iyi çözümlerden elde edilmiştir. Doğru model parametre değerleri ayrıca tabloda belirtilmektedir.

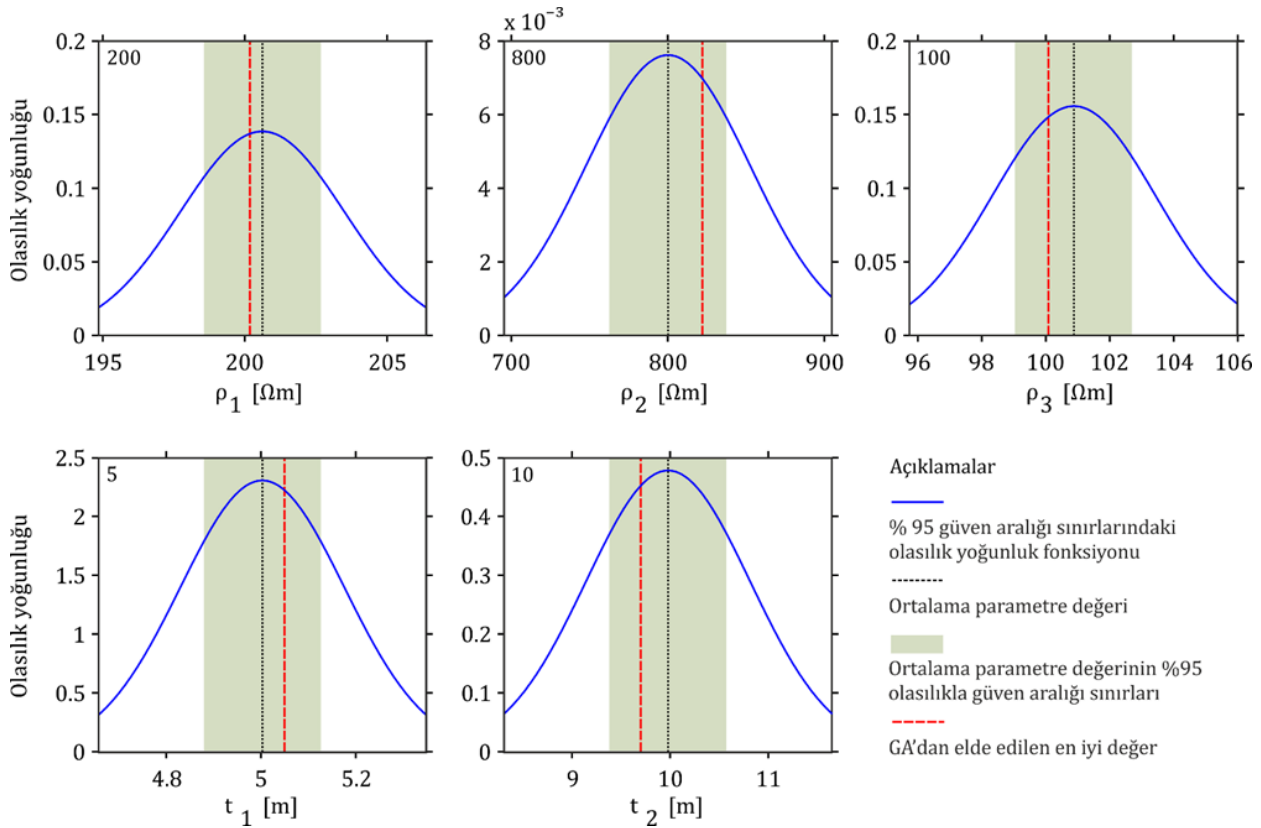
Pm	Pc	Model katman parametreleri					rms [Ωm]			
		Özdirenç [Ωm]			Kalınlık [m]		Min.	Max.	Ort.	Std. S.
		ρ_1 [200]	ρ_2 [800]	ρ_3 [100]	t_1 [5]	t_2 [10]				
0.01	0.5	198.58	813.40	100.87	5.08	9.91	0.0038	0.0535	0.0203	0.0180
	0.6	204.38	718.39	99.11	5.00	11.23	0.0110	0.0431	0.0207	0.0103
	0.7	200.27	771.94	99.66	4.95	10.43	0.0017	0.0528	0.0187	0.0170
	0.8	200.62	806.62	99.91	5.05	9.90	0.0016	0.0343	0.0167	0.0129
	0.9	199.93	777.21	99.97	4.95	10.32	6.2e-4	0.0324	0.0109	0.0097
0.02	0.5	200.74	795.68	99.95	5.02	10.06	0.0016	0.0904	0.0204	0.0262
	0.6	200.62	748.38	99.96	4.91	10.76	0.0025	0.0374	0.0183	0.0139
	0.7	200.17	784.42	99.97	4.98	10.23	7.5e-4	0.0433	0.0153	0.0151
	0.8	199.93	807.92	100.01	5.01	9.89	4.3e-4	0.0667	0.0144	0.0199
	0.9	199.86	759.73	99.78	4.91	10.59	0.0013	0.0538	0.0210	0.0155
0.05	0.5	201.09	661.61	99.37	4.69	12.38	0.0068	0.0944	0.0302	0.0277
	0.6	200.21	828.64	99.98	5.06	9.64	8.5e-4	0.0415	0.0134	0.0135
	0.7	200.66	770.34	99.82	4.96	10.43	0.0020	0.0333	0.0131	0.0122
	0.8	199.68	746.68	99.87	4.87	10.80	0.0015	0.1026	0.0229	0.0301
	0.9	199.68	812.30	100.13	5.00	9.83	0.0010	0.0636	0.0153	0.0197
0.1	0.5	199.06	840.51	100.11	5.03	9.58	0.0011	0.0304	0.0158	0.0114
	0.6	199.90	795.97	99.96	4.99	10.06	3.5e-4	0.0673	0.0176	0.0212
	0.7	200.78	799.91	100.15	5.02	9.99	0.0018	0.0524	0.0182	0.0186
	0.8	200.39	821.70	100.04	5.06	9.71	8.0e-4	0.0326	0.0125	0.0112
	0.9	200.46	898.97	100.24	5.18	8.80	0.0020	0.0076	0.0045	0.0018
0.15	0.5	200.01	811.49	100.03	5.02	9.85	3.5e-4	0.0722	0.0127	0.0214
	0.6	200.42	836.82	100.17	5.09	9.52	0.0011	0.0943	0.0208	0.0289
	0.7	200.18	822.00	100.08	5.05	9.70	5.7e-4	0.0371	0.0068	0.0109
	0.8	200.03	789.55	100.00	4.98	10.15	4.2e-4	0.0366	0.0107	0.0134
	0.9	200.56	812.11	100.18	5.05	9.82	0.0013	0.0459	0.0138	0.0153
0.2	0.5	199.44	743.48	99.89	4.85	10.85	0.0018	0.0400	0.0148	0.0128
	0.6	200.35	838.46	100.37	5.10	9.47	0.0017	0.0373	0.0141	0.0130
	0.7	200.13	848.55	100.14	5.09	9.38	0.0011	0.0182	0.0060	0.0053
	0.8	200.33	810.80	100.09	5.03	9.84	7.4e-4	0.0302	0.0107	0.0109
	0.9	198.32	793.04	100.00	4.98	10.10	2.4e-4	0.0601	0.0170	0.0185

Şekil 9 M-H örneklemeyle oluşturulan histogramları ve %95 güven aralığında hesaplanan olasılık yoğunluk fonksiyonlarını göstermektedir. GA'dan elde edilen en iyi değerler ayrıca grafikler üzerinde belirtilmektedir. Bu karşılaştırma, GA'nın güven aralıkları içinde kalan çözümler ürettiğini göstermektedir.

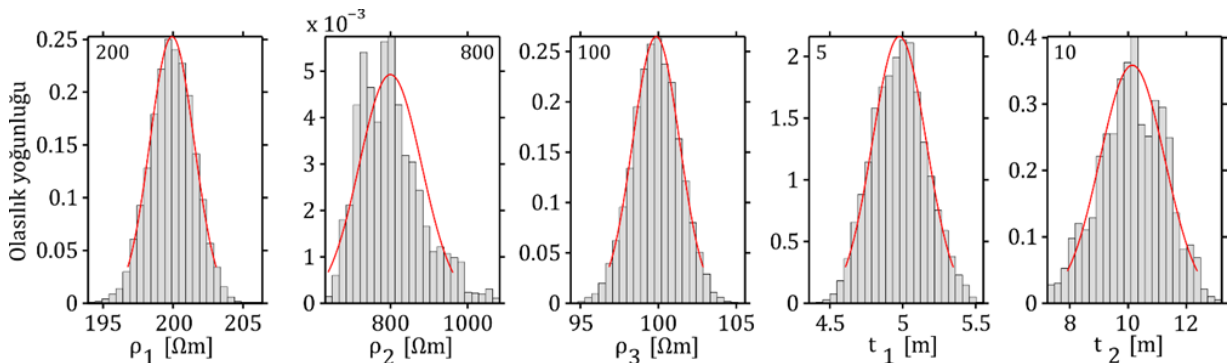
DES arazi verisine ait sonuçlar Şekil 10'da verilmektedir. Bu çözüm kuramsal veri için kullanılan aynı GA parametreleriyle ($Np = 25, G = 50, Pc = 0.7$ ve $Pm = 0.15$) elde edilmiştir. Model parametreleri arama uzayı sınırları Tablo 4'te verilmektedir. Bu DES noktası için en küçük ve en büyük elektrot aralıkları ($AB/2$ değerleri) sırasıyla 5 ve 150 m'dir. Şekilde içi dolu kırmızı noktalar görünür öz direnç arazi eğrisini göstermektedir. Dört katmandan oluşan bir HA tipi ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$) eğri olarak değerlendirilen veri kümesine ait çözümler

10 ayrı GA çözümü arasında en iyi uygunluk değerine ($rms = 0.04 \Omega m$) sahip modeldir.

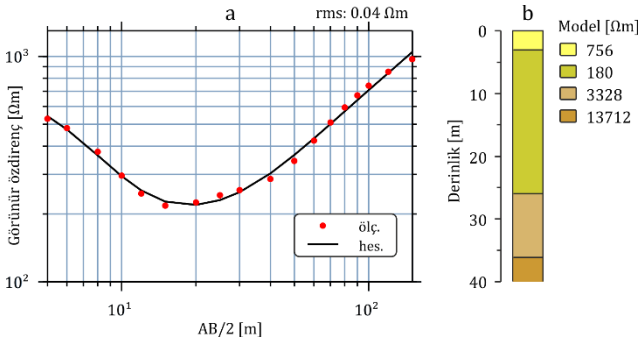
Sayısal değerler olarak ifade edilen model parametrelerinin bir anlam kazanması için jeolojik olarak yorumlanması gerekmektedir. Buna göre, göreceli olarak yüksek öz direnç değeri ($756 \Omega m$) sunan ilk katman kuru topraktan oluşan 3 m kalınlığında örtü tabakasıdır. Yaklaşık 23 m kalınlığında ve $180 \Omega m$ öz direnç değeri sunan ikinci katman karstik ortamdaki alüvyonel dolguyu temsil etmektedir. Karstik boşlukların oluşmasına olanak sağlayan 10 m kalınlığındaki üçüncü katman kireçtaşı birimdir ve görece yüksek bir öz direnç ($3328 \Omega m$) değerine sahiptir. En alt katman en yüksek öz direnç değerini ($13712 \Omega m$) sunarken içi havayla dolu olası bir karstik boşluğun varlığına işaret etmektedir.



Şekil 8: Kuramsal DES verisi kullanılarak yapılan 10 ayrı GA çalışması sonunda elde edilen en iyi çözümlere ait parametrelerin istatistiksel değerlendirmesi. Her bir parametreye ait en iyi GA çözümü değerleri ayrıca grafikler üzerinde verilmektedir.



Şekil 9: Metropolis-Hastings yöntemiyle elde edilen histogramlar ve onlara ait %95 güven aralığında çizilen olasılık yoğunluk fonksiyonları. GA ile ulaşılan parametre değerleri histogramlar üzerinde belirtilmektedir.



Şekil 10: (a): DES arazi verisinin [43] GA ile ters çözüm sonucu, (b): Tabakalı yer modeli.

3.3 Manyetik verilerin FE algoritmasıyla ters çözümü

Yaygın kullanım alanı olan manyetik yöntemde belirtiyeden kaynak yapıların model parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla kuramsal olarak üretilen manyetik toplam alan verisinin 3B ters çözümü topluluk tabanlı evrimsel bir algoritma olan FE algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Geometrik parametreleri Şekil 11a'da verilen prizmatik iki yapıdan oluşan modele (Şekil 11b) ait kuramsal veriyi üretebilmek amacıyla bir 3B düz çözüm algoritması kullanılmıştır [77]. Model yapıların, inklinasyon (I) ve deklinasyon (D) açıları sırasıyla 60 ve 0 derece olan 20×20 m'lik manyetize olmamış bir ortam içinde bulunduğu varsayılmış ve sabit alan değeri 10 nT olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır [45]. Kuramsal yapıların model parametre ($x_1, x_2, y_1, y_2, h_1, h_2, I_0, D_0, EI$) değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Burada, x_1, x_2 ve y_1, y_2 orijinden x - ve y - doğrultularındaki uzaklıkları, h_1 ve h_2 yeryüzünden prizmaların alt ve üst yüzeylerine olan derinlikleri (Şekil 11a), I_0 ve D_0 manyetizasyon vektörünün derece cinsinden inklinasyon ve deklinasyon açılarını, EI ise manyetizasyon şiddetini (cgs) ifade etmektedir. Kuramsal benzetimlerde manyetizasyon ve alan vektörlerinin birbirlerine paralel yönlendiği varsayılmıştır.

FE algoritması hem gürültüsüz hem de gürültü içeriği olan sentetik veri için denenmiştir. Şekil 12a, model parametreleri Tablo 6'da verilen yapıların ürettikleri kuramsal belirti haritasını; Şekil 12b ise bu veri kümesine normal dağılıma sahip sıfır ortalamalı ve standart sapması ± 3 nT olan rastgele sayılar eklenerek elde edilen gürültülü belirti haritasını göstermektedir. Parametre kestirim çalışmalarına başlamadan önce yukarıda incelenen diğer metasezgisel yöntemlerde de uygulandığı gibi FE algoritmasının temel kontrol parametreleri olan mutasyon katsayısı (sabit) (F) ve çaprazlama olasılığı (Cr) için çözülmek istenen problem dikkate alınarak en uygun değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla gürültüsüz

toplam manyetik alan anomali haritası kullanılarak çeşitli (F, Cr) çiftleri için test çalışmaları yapılmıştır. FE algoritmasında, genel bir kural olmamakla birlikte, yaygın olarak topluluk sayısı parametre sayısının katlarıyla ilişkilendirilir ve bu aralık çoğunlukla $[D, 20D]$ arasındadır [56]. Bu nedenle, literatürde önerilen yaklaşıma ($Np = 15D, D$: modeldeki parametre sayısı) uygun olarak 270 (15×18) bireylik bir topluluk oluşturulmuştur (bk. [63]). Her bir (F, Cr) çifti için 20 nesillik (G) çözüm yapılmıştır. Her bir parametre için arama uzayı sınırları Tablo 6'da verilmektedir. Ulaşılan sonuçlar Tablo 7'de verilmekte olup buradaki çözümlerin her biri 5 bağımsız FE çözümünden elde edilen en iyi sonuçlardır. Yukarıda incelenen problemlere kıyasla bilinmeyen (parametre) sayısının fazla olması ve 3B düz çözüm algoritmasının hesaplama zamanı açısından maliyetli olması sebebiyle nesil sayısı ve bağımsız çalışma sayısı görece küçük tutulmuştur. Bu tablo incelendiğinde istatistiksel anlamda en iyi çözümün $F = 0.5$ ve $Cr = 0.95$ için elde edildiği görülmektedir. Gürültüsüz ve gürültülü manyetik veriler üzerinde yapılan model parametre kestirimlerinin sonuçları Tablo 6'da verilmektedir ($Np = 270, G = 75, F = 0.5, Cr = 0.95$ olarak alınmış ve 5 bağımsız çalışma yapılmıştır).

Gürültüsüz durum için kestirilen parametrelerden hesaplanan manyetik belirti haritası Şekil 13a'da verilmiştir. Şekil 13b ve c'de sırasıyla gözlenen ve hesaplanan manyetik veriler arasındaki fark ve nesil sayısına göre yanlıgı enerjisinin değişimi sunulmuştur. Bu benzetimlerden elde edilen 0.39 nT gibi düşük rms değerinden de anlaşılacağı üzere FE algoritması gürültüsüz manyetik veriler üzerinde başarılı sonuçlar üretmiştir. Gürültü içeriği olan durum için ters çözüm sonucunda belirlenen model parametreleri Tablo 6'da verilmiş ve bu parametrelerden elde edilen manyetik belirti haritası ise Şekil 14a'da sunulmuştur. Hem bu belirti haritası hem de Şekil 14b'de verilen nesil sayısına göre yanlıgı enerjisi değişimi FE algoritmasının gürültülü manyetik veriler üzerinde de başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir. Elde edilen rezidüel değeri (3.04 nT) veri kümesine eklenen gürültü içeriğinin standart sapma değeri ile de uyumludur.

3.4 Karşılıklı kuyu yer radarı verisinin melez tomografik ters çözümü

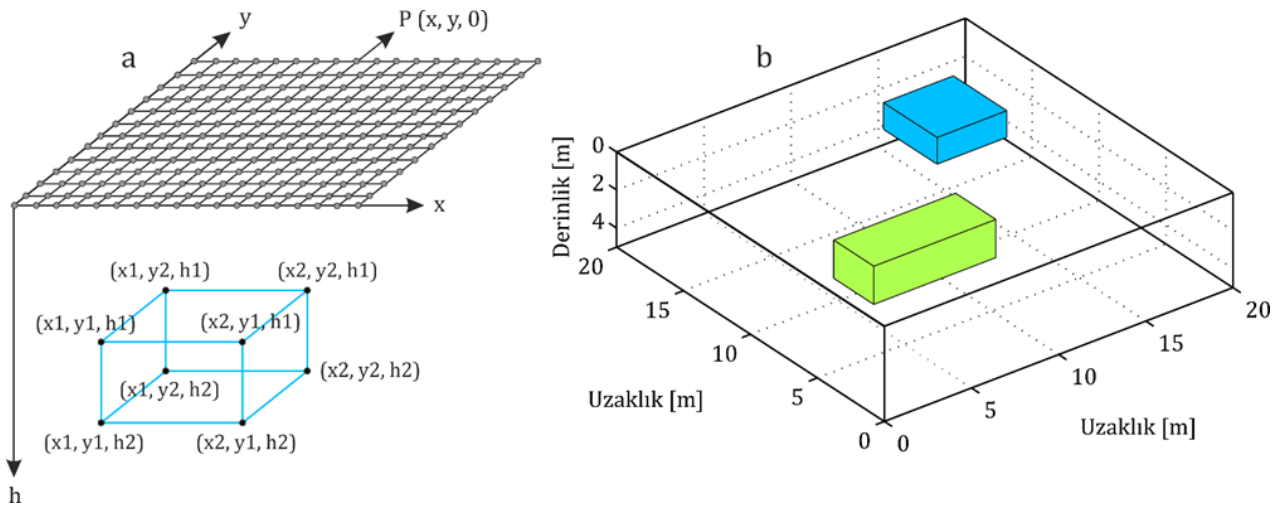
Karşılıklı kuyu yer radarı ilk varış sürelerinin tomografik ters çözümü için sıralı (sequential) melez bir yaklaşım uygulanmıştır. Yer içindeki fiziksel parametre değişimlerinin görüntülenmesi amacıyla yapılan tomografik ters çözüm çalışmaları gerek gözlemsel veri sayısının gerekse bilinmeyen sayısının fazla olması sebebiyle zaman alıcı yani CPU süresi anlamında yüksek maliyetli işlemlerdir.

Tablo 6: Kuramsal verilerin üretilmesinde kullanılan doğru parametre değerleri; FE ile ters çözümde kullanılan arama uzayı sınırları ve elde edilen çözümler. Buradaki çözümler $Np = 270, G = 75, F = 0.5$ ve $Cr = 0.95$ alınarak gerçekleştirilen 5 bağımsız parametre kestirimindeki en iyi çözümlerden elde edilmiştir.

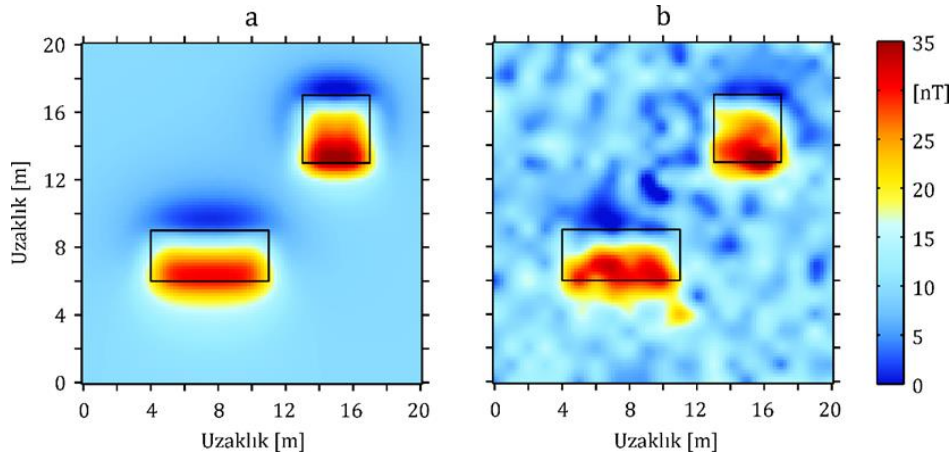
Yapı	Açıklama	x_1 [m]	x_2 [m]	y_1 [m]	y_2 [m]	h_1 [m]	h_2 [m]	I_0 [°]	D_0 [°]	EI [cgs] $\times 10^{-2}$
1	Doğru değerler	4	11	6	9	1	3	60	0	10
	Arama uzayı	1-7	8-14	3-9	6-12	0.1-4	1-7	0-90	0-30	1-30
	Gürültüsüz veri	4.12	11.07	6.03	8.84	0.85	4.17	63.02	8.67	7.65
	Gürültülü veri	4.12	10.98	5.76	8.52	0.84	4.08	78.50	9.46	7.55
2	Doğru değerler	13	17	13	17	0.6	2	60	0	10
	Arama uzayı	10-16	14-20	10-16	14-20	0.1-4	1-7	0-90	0-30	1-30
	Gürültüsüz veri	13.14	17.14	12.77	16.69	0.67	1.88	70.42	27.24	11.11
	Gürültülü veri	13.15	17.32	12.86	16.82	0.70	2.26	63.43	23.88	9.86

Tablo 7: Mutasyon katsayısı (F) ve çaprazlama olasılığındaki (Cr) değişimlerin çözüm üzerindeki etkileri. Buradaki çözümler $Np = 270, G = 20$ alınarak elde edilmiştir. Amaç fonksiyonunun karekök ortalaması (rms) istatistikleri gürültüsüz anomalisi haritası kullanılarak gerçekleştirilen 5 bağımsız parametre kestirimindeki en iyi çözümlerden elde edilmiştir.

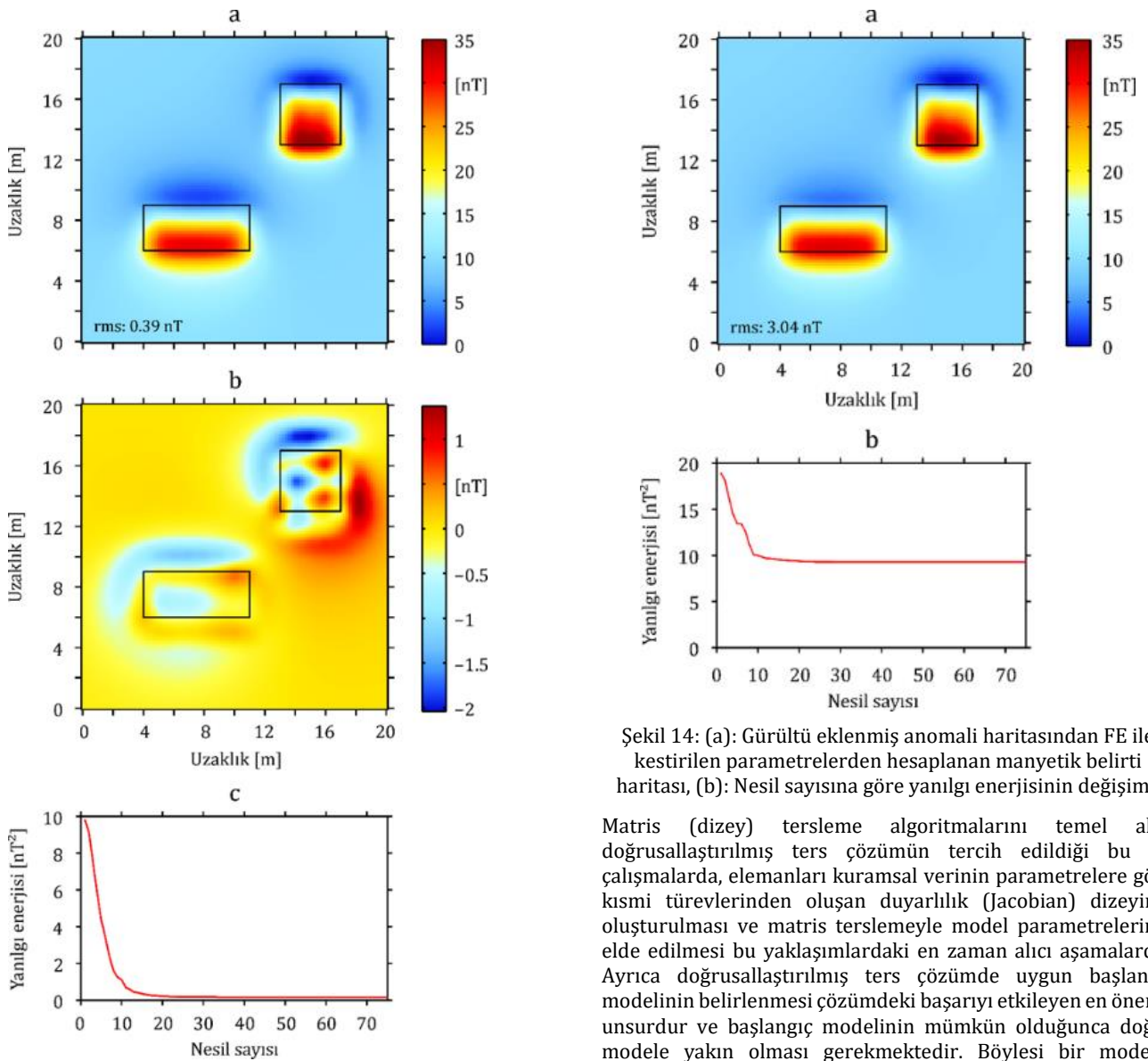
F	Cr	$rms [nT]$			
		Min.	Max.	Ort.	Std. S.
0.4	0.75	0.3717	1.1445	0.7101	0.2773
	0.8	0.4451	0.9579	0.6567	0.2059
	0.85	0.5888	1.2864	0.9541	0.2537
	0.9	0.7219	1.2404	1.0910	0.2147
	0.95	0.6508	1.5128	1.1556	0.3610
0.5	0.75	0.5442	1.1442	0.8102	0.2251
	0.8	0.4687	1.2149	0.7376	0.2839
	0.85	0.4128	0.9896	0.7184	0.2335
	0.9	0.4090	1.1533	0.6238	0.3019
	0.95	0.3756	0.8502	0.5941	0.1775
0.6	0.75	1.2113	1.4796	1.3599	0.1179
	0.8	0.9822	1.4588	1.2632	0.1855
	0.85	0.9196	1.1772	1.025	0.1047
	0.9	0.8193	1.1419	0.9799	0.1302
	0.95	0.6271	0.8869	0.7517	0.0960
0.7	0.75	1.7887	2.2999	2.0379	0.2138
	0.8	1.8136	1.9975	1.8881	0.0840
	0.85	1.7580	1.9769	1.8580	0.1052
	0.9	1.1156	1.9680	1.6608	0.3258
	0.95	1.098	1.6325	1.3575	0.2307
0.8	0.75	1.9683	2.6580	2.3773	0.2915
	0.8	1.9647	2.6159	2.2430	0.2936
	0.85	2.1177	2.6352	2.2988	0.1991
	0.9	1.8157	2.3956	2.0849	0.2507
	0.95	1.9027	2.3766	2.1224	0.1780
0.9	0.75	2.3137	2.8331	2.5720	0.2057
	0.8	2.4450	2.8872	2.6349	0.1757
	0.85	2.2012	2.7311	2.5513	0.2042
	0.9	2.1197	2.6982	2.4549	0.2819
	0.95	2.3143	2.7859	2.5125	0.1930



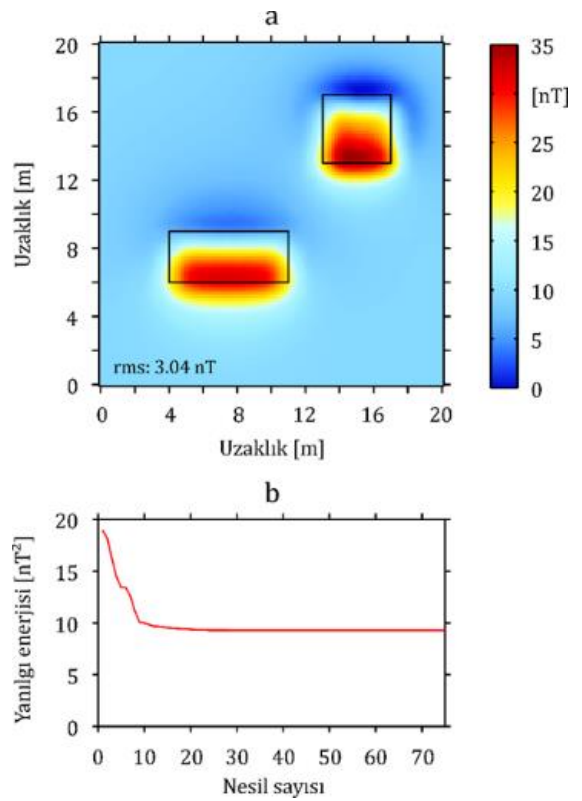
Şekil 11: (a): 3B manyetik veriye ait geometrik model parametreleri ([77]'den uyarlanmıştır), (b): İki prizmatik yapıdan oluşan model.



Şekil 12: Kuramsal toplam manyetik alan anomali haritaları, (a): Gürültüsüz, (b): Gürültü eklenmiş anomaliler.



Şekil 13: (a): Gürültüsüz anomali haritasından FE ile kestirilen parametrelerden hesaplanan manyetik belirti haritası, (b): Gözlenen ve hesaplanan manyetik veriler arasındaki fark haritası, (c): Nesil sayısına göre yanılığın değişimi.



Şekil 14: (a): Gürültü eklenmiş anomali haritasından FE ile kestirilen parametrelerden hesaplanan manyetik belirti haritası, (b): Nesil sayısına göre yanılığın değişimi.

Matris (dizey) tersleme algoritmalarını temel alan doğrusallaştırılmış ters çözümün tercih edildiği bu tip çalışmalarda, elemanları kuramsal verinin parametrelere göre kısmi türevlerinden oluşan duyarlılık (Jacobian) dizeyinin oluşturulması ve matris terslemeyle model parametrelerinin elde edilmesi bu yaklaşımlardaki en zaman alıcı aşamalardır. Ayrıca doğrusallaştırılmış ters çözümde uygun başlangıç modelinin belirlenmesi çözümdeki başarıyı etkileyen en önemli unsurdur ve başlangıç modelinin mümkün olduğunca doğru modele yakın olması gerekmektedir. Böylesi bir modelin kullanılması durumunda görece az sayıda yinelemeyle çözüme ulaşabilmektedirler. Diğer yandan, metasezgisel algoritmalar iyi bir başlangıç modeline ihtiyaç duymadan çözüm üretebilmektedirler. Ancak çok fazla sayıda deneme yanılma

yaparak çözüme ulaştıkları için veri ve bilinmeyen sayısının fazla olduğu tomografik ters çözüm gibi problemlerde etkin olarak sonuç üretmede sorun yaşayabilirler. Bu sebeplerden hareketle doğrusallaştırılmış ters çözüm ve metasezgisel algoritmaların başarılı yönlerini bir araya getiren hibrit bir yaklaşım tercih edilmiş ve bu amaçla yalın bir Yİİ algoritmasıyla yuvarlatma kısıtlı doğrusallaştırılmış en küçük kareler algoritmasının birleşiminden oluşan bir ters çözüm algoritması kullanılmıştır. Burada Yİİ, doğrusallaştırılmış ters çözüm için bir arka plan hız dağılımı yani bir başlangıç modeli oluşturmak için kullanılmıştır [35]. Doğrusallaştırılmış ters çözümde yeraltı radar hız dağılımı aşağıdaki dikdörtgen sistemin çözülmesiyle elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} W_d A \\ \lambda_1 W_1 \\ \lambda_2 W_2 \end{bmatrix} \Delta p = \begin{bmatrix} W_d \Delta d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Burada, A Jacobian dizeyi, W_d veri ağırlıklandırma dizeyi, W_1 ve W_2 sırasıyla yatay ve düşey doğrultulardaki model ağırlıklandırma dizeyleridir. λ_1 ve λ_2 model ağırlığının göreceli önemini kontrol eden sırasıyla yatay ve düşey yöndeki düzgünleyici parametreleridir. Δp parametre düzeltme yöneyi ve Δd ölçülen hesaplanan veri arasındaki fark yöneyidir [78].

Bu problemde model parametrelerini sabit yavaşlık (hızın çarpmaya göre tersi) değerine sahip hücreler oluşturmaktadır. Her bir hücrenin yavaşlık değerine ait güncellemeler, bir yinelemeli eşlenik türev yöntemi olan LSQR tekniğine dayanan bir düzey terslemesiyle elde edilmiştir [79]. Kuramsal seyahat sürelerinin model parametrelerine (hücre yavaşlıklarına) göre kısmi türevlerinden oluşan Jacobian dizeyi, model hücre yavaşlık değerlerinin pertürbe edilmesine dayanan bir sonlu farklar yaklaşımıyla oluşturulmuştur [60].

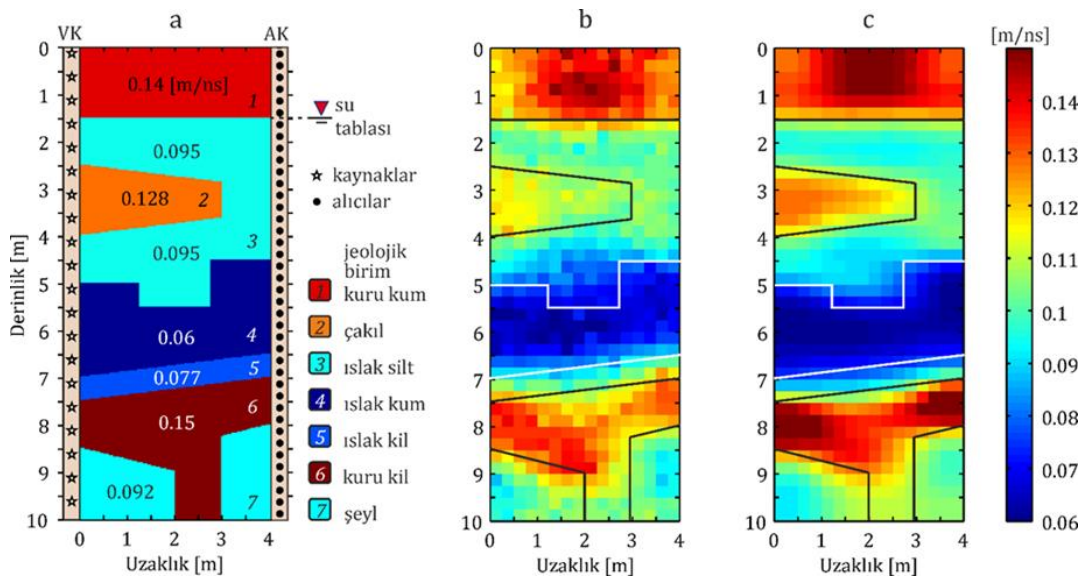
Seyahat zamanları bir sonlu fark Eikonal çözücüsü kullanılarak hesaplanmıştır [80]. Uygulanan melez yaklaşım Yİİ ve LSQR algoritmalarının iki ardışık kullanımını içermektedir. Bunlar: (i) her biri 250 yinelemeden oluşan dört Yİİ çözümünü izleyen bir LSQR yinelemesi ve (ii) bir diğer dört Yİİ çözümünü izleyen üç LSQR yinelemesidir. Yİİ uygulaması için basit bir soğuma izlencesi takip edilmiş ve yukarıda da belirtildiği gibi soğutma

faktörü 0.998 alınarak sıcaklık düşürülmüş ve böylece yavaş soğuyan bir ısı işlem benzetimi yapılmıştır. Doğrusallaştırılmış ters çözümde λ_1 ve λ_2 birbirine eşit ve 10 olarak alınmıştır. Burada kısaca açıklanan melez yaklaşımla ilgili ayrıntılar [35]'de yer almaktadır.

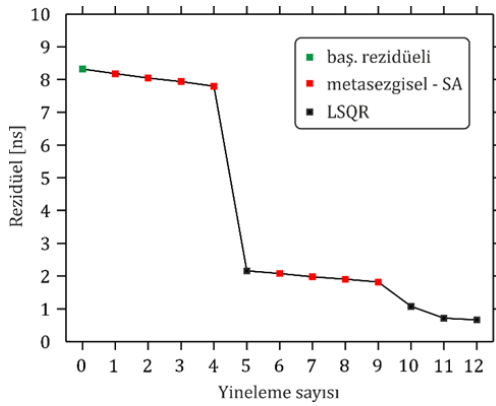
Şekil 15a'da verilen hız dağılımı hidrojeolojik bir modeli temsil etmektedir. 1.5 m derinliğindeki sığ su tablasının altındaki suya doygun zon sırasıyla silt, çakıl, kum ve kil tabakalarından oluşmaktadır. Eğimli ince kil tabakası, suya doygun zon nedeniyle ıslak olmasına karşın suyu alt tabakalara sızdırmayan geçirimsiz bir tabakadır. Bu tabakanın altındaki kuru kilse modelin en alt tabakasını oluşturan şeyl katmanına nüfuz etmektedir. İlk varış sürelerinden oluşan veri kümesi, 20 kaynak ve her bir kaynak için 40 alıcı olmak üzere, 800 seyahat zamanından oluşmaktadır. Alıcılar alıcı kuyusunda her 0.25 m, vericilerse verici kuyusunda her 0.5 m'de bir konumlandırılmıştır. Seyahat süreleri ilgili hız modeli ve kaynak-alıcı dizilimi (Şekil 15a) kullanılarak Eikonal çözücü ile hesaplanmıştır. Şekil 15a'da verilen kuramsal hidrojeolojik model 0.25 m × 0.25 m boyutlarında toplam 640 hücreyle tanımlanmıştır. Uygulanan melez yaklaşım her bir hücrenin hız (yavaşlık) değerinin kestirilmesini amaçlamaktadır.

Hibrit tomografik algoritmayla elde edilen çözümler Şekil 15b ve c'de yer almaktadır. Burada ilk dört Yİİ çözümünün sonunda yaklaşık 8 ns seyahat süresi rezidüeliyle ulaşılan radar hız dağılımı Şekil 15b'de verilmektedir. Toplam 1000 yineleme neticesinde oluşan bu hız dağılımında modele ait (bk. Şekil 15a) karakteristik arka plan hız değişimlerinin başarılı bir şekilde ortaya çıkarıldığı gözlenmektedir.

Şekil 15b'de yer alan hız dağılımı doğrusallaştırılmış ters çözüm için başlangıç modeli olarak kullanılmış ve sadece bir yineleme sonunda rezidüel 2 ns civarına inmiştir (Şekil 16). Bu aşamadan sonra yeniden dört Yİİ çözümü ve bunu takip eden 3 LSQR yinelemesiyle Şekil 15c'de gösterilen hız dağılımı elde edilmiş ve algoritma 0.8 ns civarında bir rezidüel değeriyle yakınsamıştır (Şekil 16). Bu hız tomogramı incelendiğinde melez ters çözüm yaklaşımının modeli, geometri ve radar hızları anlamında başarılı bir şekilde yeniden oluşturarak (reconstruction) görüntülediği görülmektedir.

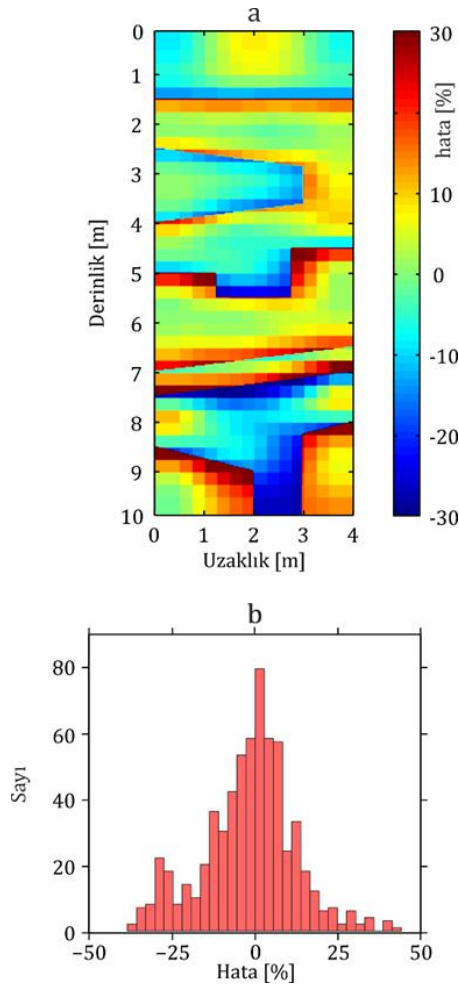


Şekil 15: (a): Karşılıklı kuyu yer radarı verisinin melez ters çözümünde kullanılan kavramsal hidrojeolojik model. Melez tomografik algoritmayla elde edilen çözümler, (b): İlk dört Yİİ çözümü sonucu elde edilen hız dağılımı, (c): Yİİ ve doğrusallaştırılmış ters çözüm algoritmalarının ardışık kullanımı sonucu ulaşılan çözüm.



Şekil 16: Melez çözümün yakınsama karakteristiği.

Ayrıca her bir hücre için hesaplanan hız değeri, sonuçların güvenilirliğinin araştırılması için sentetik modelin doğru değerleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen hücre hızı hataları görüntüsü (Şekil 17a) incelendiğinde, hataların tabaka ara yüzelerinde yüksek olduğu ve göreceli olarak daha yüksek hız zıtlığına sahip ara yüzelerdeki hücreler için daha büyük hücre hızı hata değerleri sunduğu gözlenmektedir. Bu hataların histogramı Şekil 17b'de gösterilmektedir. Her iki şekil birlikte incelendiğinde hataların $\pm 30\%$ mertebesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 17: (a): Tomografik çözüme ait hücre hızı hataları görüntüsü, (b): Hücre hızı hataları histogramı.

4 Sonuçlar

PSO, GA, FE ve Yİ algoritmalarını içeren dört metasezgisel sırasıyla SP, DAÖ, manyetik ve karşılıklı kuyu yer radarından oluşan dört farklı uygulamalı jeofizik yöntemle ait belirtilerin ters çözümünde kullanılmıştır. Her bir metasezgisel algoritmaya ait kullanıcı tanımlı parametre değerleri uygulandıkları problem dikkate alınarak yapılan test çalışmaları ve bunlardan elde edilen sonuçlara ait istatistiksel değerlendirmeler sonucunda belirlenmiştir. Buna göre, DU verilerinin PSO ile ters çözümünde $w = 0.6$, $c_1, c_2 = 1.7$, $Np = 100$ ve $G = 200$ değerlerinden; DES verilerinin GA ile modellenmesinde ise $Pc = 0.7$, $Pm = 0.15$, $Np = 25$ ve $G = 50$ değerlerinden oluşan bir yapılandırma kullanılmıştır. Manyetik verilerin 3B ters çözümünde kullanılan FE algoritmasına ait temel parametreler ise $F = 0.5$, $Cr = 0.95$ olarak belirlenmiş ve değerlendirilmede $Np = 270$ ve $G = 75$ olarak kullanılmıştır. Karşılıklı kuyu radar verisinin modellenmesinde uygulanan melez yaklaşımın metasezgisel bileşeni olan Yİ algoritmasında soğutma faktörü $K = 0.998$ olarak alınmış ve toplam 1000 yinelemeden oluşan bir çözüm yapılmıştır. Diğer bileşen olan doğrusallaştırılmış en küçük kareler yaklaşımında ise LSQR algoritması kullanılmış düzgünleyici parametreleri λ_1 ve λ_2 birbirine eşit ve 10 olarak alınmıştır. Model parametre sayısının görece az olduğu DU ve DES verilerinin çözümünde ilgili algoritmaların birden fazla sayıda çalıştırılmasıyla elde edilen en iyi çözümlere ait olasılık yoğunluk fonksiyonları %95 güven aralığında oluşturulmuştur.

Bunlar dikkate alındığında çözümlerin ortalama değer etrafında çok dar bir aralıkta dağılım gösterdiği yani birbirine yakın değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Yine aynı veri kümelerinden elde edilen çözümler üzerinde M-H örneklemeyle yapılan analizler PSO ve GA'nın %95 güven aralığı içinde yer alan çözümler ürettiğini göstermektedir. Sentetik veri kümeleri üzerindeki metasezgisel uygulamaların (FE-manyetik, Yİ-yer radarı) sonuçları dikkate alındığında doğru değerlere oldukça yakın model parametre değerleri kestirilmiştir. Ayrıca, bu algoritmaların arazi verileri üzerindeki uygulamalarından da (PSO-DU ve GA-DAÖ) jeofizik belirtilerin yorumlanmasında önemli fayda sağlayacak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, iyi bir başlangıç modeline gereksinim duymayan, yerel en iyilerden çıkıp genel en iyiye yakınsayabilme özelliğine sahip olan metasezgisel algoritmalar, uygulamalı jeofizik yöntemlerin küçük ve görece büyük boyutlu parametre problemlerinde başarıyla uygulanabilir.

5 Teşekkür

Görüş ve eleştirileriyle bu çalışmanın gelişmesine önemli katkılar sağlayan Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Kuruluna ve anonim iki hakeme teşekkür ederiz. Bu çalışma kısmen "The 20th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey (Antalya, Kasım 2013)" ve "The 15th EU/ME Workshop: Metaheuristics and Engineering (İstanbul, Mart 2014)" de sunulmuştur.

6 Kaynaklar

- [1] Luke S. *Essentials of Metaheuristics*. 2nd ed. Lulu Com, 2013. (<http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>).
- [2] Göktürkler G, Balkaya Ç. "Inversion of self-potential anomalies caused by simple-geometry bodies using global optimization algorithms". *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(5), 498-507, 2012.

- [3] Karaboğa D. *Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları*. 3. baskı. Ankara, Türkiye, Nobel Yayın Dağıtım, 2014.
- [4] Wikipedia. "Metaheuristic". <http://en.wikipedia.org/wiki/Metaheuristic> (11.05.2015).
- [5] Corwin RF, Hoover DB. "The self-potential method in geothermal exploration". *Geophysics*, 44(2), 226-245, 1979.
- [6] Yüngül S. "Spontaneous potential survey of a copper deposit at Sariyer, Turkey". *Geophysics*, 19(3), 455-458, 1954.
- [7] Bogoslovsky VA, Ogilvy AA. "Geophysical methods for the investigation of landslides". *Geophysics*, 42(3), 562-571, 1977.
- [8] Drahor MG, Berge MA. "Geophysical investigation of the Seferihisar geothermal area, Western Anatolia, Turkey". *Geothermics*, 35(3), 302-320, 2006.
- [9] Göktürkler G, Balkaya Ç, Erhan Z, Yurdakul A. "Investigation of a shallow alluvial aquifer using geoelectrical methods: a case from Turkey". *Environmental Geology*, 54(6), 1283-1290, 2008.
- [10] Bolève A, Janod F, Revil A, Lafon A, Fry J-J. "Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection". *Journal of Hydrology*, 403(3-4), 242-252, 2011.
- [11] El-Qady G, Ushijima K, Ahma ES. "Delineation of geothermal reservoir by 2D inversion of resistivity data at Hamam Faraun area, Sinai, Egypt". *Proceedings World Geothermal Congress*. Kyushu-Tohoku, Japan, 28 May-10 June, 2000.
- [12] Karlık G, Kaya MA. "Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta, Turkey". *Environmental Geology*, 40(6), 725-731, 2001.
- [13] Hamzah U, Samsudin AR, Malim AP. "Groundwater investigation in Kuala Selangor using vertical electrical sounding (VES) surveys". *Environmental Geology*, 51(8), 1349-1359, 2007.
- [14] Kaya MA, Özürkan G, Balkaya Ç. "Geoelectrical investigation of seawater intrusion in the coastal urban area of Çanakkale, NW Turkey". *Environmental Earth Sciences*, 73(3), 1151-1160, 2015.
- [15] Quesnel Y, Jrad A, Mocchi F, Gattacceca J, Mathe PE, Parisot JC, Hermitte D, Dumas V, Dussouillez P, Walsh K, Miramont C, Bonnet S, Uehara M. "Geophysical signatures of a Roman and early medieval necropolis". *Archaeological Prospecting*, 18(2), 105-115, 2011.
- [16] Stampolidis A, Tsokas GN. "Use of edge delineating methods in interpreting magnetic archaeological prospection data". *Archaeological Prospecting*, 19(2), 123-140, 2012.
- [17] Ekinci YL, Balkaya Ç, Şeren A, Kaya MA, Lightfoot C. "Geomagnetic and geoelectrical prospection for buried archaeological remains on the Upper City of Amorium, a Byzantine city in midwestern Anatolia, Turkey". *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(1), 015012, 2014.
- [18] Eventov L. "Applications of magnetic methods in oil and gas exploration". *Leading Edge*, 16(5), 489-492, 1997.
- [19] Jallouli C, Mickus K, Turki MM, Rihane C. "Gravity and aeromagnetic constraints on the extent of Cenozoic volcanic rocks within the Nefza-Tabarka region, northwestern Tunisia". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 122(1-2), 51-68, 2003.
- [20] Ekinci YL, Yiğitbaş EA. "A geophysical approach to the igneous rocks in the Biga Peninsula (NW Turkey) based on airborne magnetic anomalies: geological implications". *Geodinamica Acta*, 25(3-4), 267-285, 2012.
- [21] Reynolds JM. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 2nd ed. Chichester, John Wiley and Sons Ltd., 1997.
- [22] Cardimona SJ, Clement WP, Kadinsky-Cade K. "Seismic reflection and ground-penetrating radar imaging of a shallow aquifer". *Geophysics*, 63(4), 1310-1317, 1998.
- [23] Knight R. "Ground penetrating radar for environmental applications". *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 229-255, 2001.
- [24] Eisen O, Nixdorf U, Lothar K, Wagenbach D. "Alpine ice cores and ground penetrating radar: combined investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold Alpine ice body". *Tellus B*, 55(5), 1007-1017, 2003.
- [25] Neal A. "Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress". *Earth-Science Reviews*, 66(3-4), 261-330, 2004.
- [26] Zhou H, Sato M. "Subsurface cavity imaging by crosshole borehole radar measurements". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(2), 335-341, 2004.
- [27] Göktürkler G, Balkaya Ç. "Traveltime tomography of crosshole radar data without ray tracing". *Journal of Applied Geophysics*, 72(4), 213-224, 2010.
- [28] Clement WP, Barrash W. "Crosshole radar tomography in a fluvial aquifer near Boise, Idaho". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 11(3), 171-184, 2006.
- [29] Ernst JR, Green AG, Maurer H, Holliger K. "Application of a new 2D time-domain full-waveform inversion scheme to crosshole radar data". *Geophysics*, 72(5), J53-J64, 2007.
- [30] Kennedy J, Eberhart R. "Particle swarm optimization". *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Piscataway, NJ, 27 November-1 December 1995.
- [31] Holland JH. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. Ann Arbor, MI, University of Michigan Press, 1975.
- [32] Storn R, Price KV. "Differential Evolution-A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces". *International Computer Science Institute, Berkeley, USA, Technical Report, TR-95-012*, 1995.
- [33] Kirkpatrick S, Jr Gelatt CD, Vecchi MP. "Optimization by simulated annealing". *Science*, 220(4598), 671-680, 1983.
- [34] Sen MK, Stoffa PL. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. 1st ed. The Netherlands, Elsevier Science, 1995.
- [35] Göktürkler G. "A hybrid approach for tomographic inversion of crosshole seismic first-arrival times". *Journal of Geophysics and Engineering*, 8(1), 99-108, 2011.
- [36] Eiben AE, Smith JE. *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2003.
- [37] Storn R, Price K. "Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces". *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359, 1997.

- [38] Monteiro Santos FA. "Inversion of self-potential of idealized bodies' anomalies using particle swarm optimization". *Computer and Geosciences*, 36(9), 1185-1190, 2010.
- [39] Pekşen E, Yas T, Kayman AY, Özkan C. "Application of particle swarm optimization on self-potential data". *Journal of Applied Geophysics*, 75(2), 305-318, 2011.
- [40] Biswas A, Sharma SP. "Optimization of self-potential interpretation of 2-d inclined sheet-type structures based on very fast simulated annealing and analysis of ambiguity". *Journal of Applied Geophysics*, 105, 235-247, 2014.
- [41] Başokur AT, Akça I, Siyam NWA. "Hybrid genetic algorithms in view of the evolution theories with application for the electrical sounding method". *Geophysical Prospecting*, 55(3), 393-406, 2007.
- [42] Jha MK, Kumar S, Chowdhury A. "Vertical electrical sounding survey and resistivity inversion using genetic algorithm optimization technique". *Journal of Hydrology*, 359(1-2), 71-87, 2008.
- [43] Balkaya Ç, Göktürkler G, Erhan Z, Ekinçi YL. "Exploration for a cave by magnetic and electrical resistivity surveys: Ayvacık Sinkhole example, Bozdağ, İzmir (western Turkey)". *Geophysics*, 77(3), B135-B146, 2012.
- [44] Göktürkler G. "Karşılıklı kuyu radar verisinin melez ilk varış tomografisi". *Üçüncü Yer Elektrik Çalıştayı, Iğaz, Türkiye*, 24-26 Mayıs 2010.
- [45] Balkaya Ç, Ekinçi YL, Göktürkler G. "3D inversion of magnetic data by differential evolution algorithm". *The 20th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey*, Antalya, Turkey, 25-27 November 2013.
- [46] Balkaya Ç, Göktürkler G, Ekinçi YL, Turan S. "Metaheuristics in applied geophysics". *Proceedings of the 15th EU/ME Workshop*, Istanbul, Turkey, 24-25 March 2014.
- [47] Particle Swarm optimization. "Introduction to Particle Swarm Optimization". <http://mnemstudio.org/particle-swarm-introduction.htm> (05.08.2015).
- [48] Scrucca L. "GA: A package for genetic algorithms in R". *Journal of Statistical Software*, 53(4), 1-37, 2013.
- [49] Zielinski K, Laur, R. *Stopping Criteria for Differential Evolution in Constrained Single-Objective Optimization*. Editor: Chakraborty UA. *Advances in Differential Evolution*, 111-138, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag 2008.
- [50] Heaton J. *Understanding Simulated Annealing*. Editor: Smith K, WordsRU.com. Introduction to Neural Networks with Java, 199-212, Heaton Research, Inc, 2008.
- [51] Shi Y, Eberhart RC. *Evolutionary Programming VII*. Editors: Porto VW, Saravanan N, Waagen D, Eiben AE. *Parameter Selection in Particle Swarm Optimization*, 591-600, San Diego, California, USA, Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [52] Poli R, Kennedy J, Blackwell T. "Particle swarm optimization: An overview". *Swarm Intelligence*, 1(1), 33-57, 2007.
- [53] Salmon S. "Particle Swarm Optimization in Scilab". <http://forge.scilab.org/index.php/p/psso-toolbox/downloads/> 2011.
- [54] Lee KY, Mohamed PS. "A real-coded genetic algorithm involving a hybrid crossover method for power plant control system design". *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*. Honolulu, HI, USA, 12-17 May 2002.
- [55] Qing A. *Differential Evolution: Fundamentals and Applications in Electrical Engineering*. 1st ed. New York, USA, John Wiley and Sons, 2009.
- [56] Lin C, Qing A, Feng Q. "A comparative study of crossover in differential evolution". *Journal of Heuristics*, 17(6), 675-703, 2011.
- [57] Price KV, Storn RM, Lampinen JA. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Berlin, Springer-Verlag, 2005.
- [58] Metropolis N, Rosenbluth AW, Rosenbluth MN, Teller AH, Teller E. "Equations of state calculations by fast computing machines". *Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087-1091, 1953.
- [59] Brooks SP, Morgan BJT. "Optimization using simulated annealing". *Statistician*, 44(2), 241-257, 1995.
- [60] Ammon CJ, Vidale JE. "Tomography without rays". *Bulletin of the Seismological Society of America* 83(2), 509-528, 1993.
- [61] Yüngül S. "Interpretation of spontaneous polarization anomalies caused by spheroidal orebodies". *Geophysics*, 15(2), 237-246, 1950.
- [62] Bhattacharya BB, Roy N. "A note on the use of a nomogram for self-potential anomalies". *Geophysical Prospecting*, 29(1), 102-107, 1981.
- [63] Balkaya Ç. "An implementation of differential evolution algorithm for inversion of geoelectrical data". *Journal of Applied Geophysics*, 98, 160-175, 2013.
- [64] Meiser P. "A method for quantitative interpretation of self-potential measurements". *Geophysical Prospecting*, 10(2), 203-218, 1962.
- [65] Eberhart RC, Shi Y. "Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization". *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, San Diego, CA, 16-19 July 2000.
- [66] Carlisle A, Dozier G. "An off-the-shelf PSO". *Proceedings of the Workshop on Particle Swarm Optimisation*, Indianapolis, IN, January 2001.
- [67] Clerc M, Kennedy J. "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58-73, 2002.
- [68] Trelea IC. "The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection". *Information Processing Letters*, 85(6), 317-325, 2003.
- [69] Jiang M, Luo YP, Yang SY. *Particle Swarm Optimization - Stochastic Trajectory Analysis and Parameter Selection*. Editors: Chan FTS, Tiwari MK. *Swarm Intelligence, Focus on ant and Particle Swarm Optimization*, 179-198, Croatia, I-Tech Education and Publishing, 2007.
- [70] Fernández-Martínez J, García-Gonzalo, E, Naudet V. "Particle swarm optimization applied to the solving and appraisal of the streaming potential inverse problem". *Geophysics*, 75(4), WA3-WA15, 2010.
- [71] Fernández Alvarez JP, Fernández Martínez, JL, Menéndez Pérez CO. "Feasibility analysis of the use of binary genetic algorithms as importance samplers application to a 1-D DC resistivity inverse problem". *Mathematical Geosciences*, 40(4), 375-408, 2008.
- [72] Fernández Martínez JL, García Gonzalo E, Fernández Álvarez JP, Kuzma HA, Menéndez Pérez CO. "PSO: A powerful algorithm to solve geophysical inverse problems: Application to a 1D-DC resistivity case". *Journal of Applied Geophysics*, 71(1), 13-25, 2010.

- [73] Mosegaard K, Tarantola A. "Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems". *Journal of Geophysical Research*, 100(B7), 12431-12447, 1995.
- [74] Hastings W. "Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications". *Biometrika*, 57(1), 97-109, 1970.
- [75] Chib S, Greenberg E. "Understanding the Metropolis-Hastings algorithm". *American Statistician*, 49(4), 327-335, 1995.
- [76] Essa KS. "A new algorithm for gravity or self-potential data interpretation". *Journal of Geophysics and Engineering*, 8(3), 434-446, 2011.
- [77] Rao DB, Babu NR. "A rapid method for three-dimensional modeling of magnetic anomalies". *Geophysics*, 56(11), 1729-1737, 1991.
- [78] Aldridge DF, Oldenburg DW. "Two-dimensional tomographic inversion with finite-difference traveltimes". *Journal of Seismic Exploration*, 2(3), 257-274, 1993.
- [79] Paige CC, Saunders MA. "LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares". *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8(1), 43-71, 1982.
- [80] Podvin P, Lecomte I. "Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools". *Geophysical Journal International*, 105(1), 271-284, 1991.