



Gravite Anomalilerinin Guguk Kuşu Arama Algoritması ile Ters Çözümü

Inversion of Gravity Anomalies by Cuckoo Search Algorithm

Seçil Turan-Karaoğlan ^{1,2*}, Gökhan Göktürkler ²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: secil.turan@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 02.12.2021

Kabul Tarihi / Accepted: 06.03.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247210

Atıf şekli/How to cite: TURAN-KARAOĞLAN, S., GÖKTÜRKLER, G.(2022). Gravite Anomalilerinin Guguk Kuşu Arama Algoritması ile Ters Çözümü. DEÜ FMD 24(72), 799-813.

Öz

Metasezgisel algoritmalar jeofizik ters çözüm çalışmalarında sıklıkla kullanılır duruma gelmiştir. Türev tabanlı en iyileme yöntemlerinin aksine, iyi bir başlangıç modeline ihtiyaç duymayan arama algoritmaları parametre uzayını kapsamlı tarama özelliğine sahip olduklarından jeofizikte model parametre kestirimleri için avantaj sağlamaktadır. Sunulan çalışmada, gravite anomalilerinin ters çözümünde guguk kuşu arama algoritması kullanılmıştır. Algoritmanın kullanıcı tanımlı parametre sayısının az olması ve yapılan literatür taramasında doğadan esinlenilerek oluşturulan birçok metasezgisel yöntemle göre daha iyi sonuç vermesi, parametre kestirim çalışmasında guguk kuşu algoritmasının kullanılmasını teşvik etmektedir. Gravite belirtisine ait genlik katsayısı, kaynak derinliği, belirti izdüşümü ve şekil faktörleri kestirimi yapılan model parametreleridir. Algoritmaya ait kontrol parametreleri (popülasyon sayısı ve yumurtanın yuvadan atılma olasılığı) ise gürültüsüz kuramsal veri kümesi kullanılarak parametre belirleme çalışmaları (parameter tuning) ile detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Sonrasında kontrol parametre çiftinin doğruluğu gürültü içeren veri kümesi üzerinde test edilmiştir. Ardından, Küba’da bir kromit yatağı üzerinde ölçülen arazi verisi ve Kanada’da yer alan bir sülfür cevheri üzerinde ölçülen arazi verisi değerlendirilerek, anomalilere ait model parametreleri kestirilmiştir. Kuramsal ve arazi veri kümelerine ait model parametrelerinin güvenilirliğinin belirlenmesi için, Metropolis-Hasting algoritması kullanılarak, kestirim parametreleri istatistiksel olarak da test edilmiştir. Doğası gereği iyi bir başlangıç modeline ve model parametrelerine göre kısmi türev hesabına ihtiyaç duymayan algoritma, kullanıcı tanımlı iki parametre içerdiği sayesinde parametre kestirim çalışmalarında kolaylık sağlamıştır. Yapılan belirsizlik analizleri sonucunda da algoritmanın gravite verilerinin ters çözümünde uygulanabilir bir algoritma olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metasezgisel, jeofizik, gravite, ters çözüm, guguk kuşu arama algoritması

Abstract

Metaheuristic methods have been used frequently in applications of geophysical inversion studies. These search algorithms, which have comprehensive searching characteristics for parameter space without needing a good initial model unlike derivative-based inversion methods, give advantage for the parameter estimations in geophysics. In the presented study, the cuckoo search algorithm is used

for the inversion of the gravity anomalies. The cuckoo search algorithm was decided for the parameter estimation studies because of the low number of the user-defined parameter of the algorithm and yielding better results compared to the many nature-inspired metaheuristic methods. Model parameters of the gravity anomalies are amplitude coefficient, depth of causative source, exact origin of causative source and shape factors. Control parameters of the algorithm (population number and probability of recognition of the egg) are evaluated in detail by parameter tuning study with noise-free synthetic data. Then, the results of the control parameters are tested with noisy synthetic data. On the other hand, a field data from the chromite deposit in Cuba and from the base metal sulphide deposit in Canada are evaluated and model parameters of the field data sets are estimated. The model parameters are statistically tested for the determination of the accuracy of model parameters of the synthetic and field data sets by Metropolis-Hasting algorithm. Based on its nature, the algorithm, which does not need a good initial model and partial derivative calculation according to the model parameters, provides improved usage in parameter estimation studies with two user-defined parameters. As a result of the uncertainty analysis, it was determined that the algorithm is applicable for inversion of gravity data.

Keywords: *Metaheuristics, geophysics, gravity, inversion, cuckoo search algorithm*

1. Giriş

Kelime anlamı olarak meta (ileri/öte) ve heuristic (sezgisel/deneme-yanılma) kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşan metasezgisel terimi, optimizasyon problemlerine rastgele süreçleri temel olarak çözüm arayan, olası tüm çözümler arasından en kabul edilebilir çözümü bulmaya çalışan yöntemler olarak tanımlanabilir. En iyi ya da en iyi olarak kabul edilebilir çözümleri elde etmek için çözüm uzayında rastgele olarak aramalar yapan bu optimizasyon yöntemleri, kendilerine ait arama stratejileri içermektedir. Çözüm uzayının genişliği nedeniyle en iyi çözümlerin bulunması deterministik yöntemler ile mümkün olmayan problemlerin çözümünde metasezgisel yöntemlerin kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır.

Metasezgisel algoritmaların genel özelliği karmaşık matematiksel tekniklere ihtiyaç duymaksızın bilim ve mühendislik ile ilgili problemleri ele alabilmeleri, kısıtlamaların klasik tekniklere göre göze çarpan bir kolaylıkla üstesinden gelenebilmesi ve hepsinin de lokal çözümlerden ziyade global optimum çözümleri ön plana çıkarmaya eğilimli olmalarıdır.

Dünyanın yer çekim alanındaki değişimlerin ölçümüne dayanan doğal kaynaklı gravite metodu, jeofizikte kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Literatürde gravite yöntemine ait çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Model parametrelerinin belirlenmesinde türev tabanlı yöntemler sıklıkla kullanılmıştır. Ancak son zamanlarda avantajları sebebiyle parametre

kestirim çalışmalarında metasezgisel yöntemler de tercih edilmektedir. Metasezgisel yöntemlerin türev tabanlı yöntemlere göre tercih edilebilir olmasının sebepleri oldukça fazladır. Deterministik yaklaşımları kullanan türev tabanlı en iyileme algoritmaları iyi bir başlangıç modeline ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca bu algoritmalar metasezgisel yöntemlere kıyasla daha hızlı bir yakınsama sağlamalarına rağmen çözüm olarak global optimum yerine lokal optimuma ulaşabilirler. Metasezgisel yöntemler lokal optimumlara takılmadan global optimumlara ulaşabilme özelliğine sahiptirler [1]. Türev tabanlı geleneksel ters çözüm yöntemlerinde, model parametrelerine göre kısmi türev hesabı bir hesaplama maliyeti oluşturmaktadır. Metasezgisel yöntemler ise bu süreçte böylesi bir işleme ihtiyaç duymadığından bu maliyetten kaçınılmış olmaktadır. Metasezgisel algoritmaların bahsedilen önemli avantajlarının yanında, çok sayıda amaç fonksiyonu ve düz çözüm model bağıntılarının hesaplama yoğunluğu gibi zayıf özellikleri de mevcuttur [2,3]. İyi bir başlangıç modeline gereksinim duymadan ve türev hesabı gerektirmeden, geniş ölçekli bir arama ile lokal minimumlara takılmadan global minimuma ulaşmaları, metasezgisel algoritmaların jeofizikte model parametre belirleme çalışmalarında kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Literatürde sıklıkla kullanılan metasezgisel yöntemler genetik algoritma-GA [4], yapay ısı işlem-Yİİ [5], parçacık sürü optimizasyonu-PSO [6], farksal evrim-FE [7-9] olarak örneklendirilebilir. Jeofizikte parametre kestirim çalışmalarında

yaygın olarak kullanılan algoritmalara ise GA [10-12], PSO [13-19], FE [2,3,19-24], Yİ algoritması [25-29] farksal arama algoritması [30,31] örnek olarak verilebilir. Parametre kestirim çalışmalarında uygulanan güncel algoritmalara örnekler ise gri kurt optimizasyonu [32] geri-izleme arama optimizasyonu [33], guguk kuşu arama algoritması [34] olarak verilebilir.

Geniş kapsamlı literatür taraması ve algoritmaya ait parametrelerin kullanım kolaylığı göz önüne alındığında bu çalışmada guguk kuşu arama (GKA) algoritması kullanılmıştır. Doğadan esinlenilerek tasarlanan GKA algoritması [35], guguk kuşlarının doğada hayatta kalabilmek ve türlerinin devamını sağlayabilmek için geliştirdikleri üreme stratejisine dayanan evrimsel bir algoritmadır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde diğer metasezgisel yöntemlere kıyasla GKA algoritması kullanılarak gravite belirtilerinin ters çözümüne ait bir çalışmaya rastlanmamıştır. Sunulan bu çalışmada gürültüsüz ve gürültü içeren kuramsal veriler ve arazi verilerinin model parametre kestirimleri GKA algoritması ile elde edilmiştir. Arazi veri setleri olarak kromit yatağı (Camaguey, Küba) ve sülfür cevheri (Quebec, Kanada) belirtileri kullanılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Guguk Kuşu Arama Algoritması

GKA algoritması, Xin-She Yang ve Susash Deb (2009) [35] tarafından guguk kuşlarının nesillerinin devamını sağlamak için kullandıkları kuluçka parazitliğinden esinlenilerek geliştirilmiştir. Algoritma, Lévy uçuşları (Lévy flights) temel alınarak geliştirilmiştir. Lévy uçuşları, klasik rastgele yürüyüşlere kıyasla geniş ölçekli arama alanını taramak için düz uçuşlu (straight flight) ve ani dönüş manevralarına dayalı rastgele yürüyüşü temel almaktadır. Doğada guguk kuşu genellikle kendi yumurtası için yuva yapmak yerine, yumurtasına benzer yumurtalara sahip bir konak yuva belirler ve yumurtasını bu yeni konak yuvaya bırakır. Yumurtasının hayatta kalma olasılığını artırmak için kendi yumurtasına karşılık yuvadan bir yumurtayı dışarı atar. Algoritmanın temelinde de guguk kuşunun doğasındaki bu işleyiş vardır. Güncel çalışmalar guguk kuşu algoritmasının parçacık sürü optimizasyonu, harmoni arama algoritması, ateş böceği

algoritması ve genetik algoritmadan daha uygun sonuçlar verdiğini göstermektedir [36-39].

Algoritmanın çalışma prensibi aşağıda belirtilen adımlarla ifade edilmektedir [35,40]:

- Guguk kuşu rastgele seçtiği bir yuvaya yalnızca bir yumurta bırakır ve konak yuvadan bir yumurtayı yuvadan atar.
- En iyi yumurta bir sonraki nesle aktarılabilir.
- Konak yuvanın sahibi kuş, guguk kuşu yumurtasını tanıyabilir ve $\rho_a \in (0, 1)$ ihtimali ile yumurtayı yuvadan atabilir veya kendisine yeni bir yuva inşa edebilir.

Uygulama açısından kolaylık sağlanabilmesi için bir yuvadaki her bir yumurtanın bir çözümü ifade ettiği ve her guguk kuşunun yuvaya yalnızca bir yumurta bırakabileceği kabulleri yapılabilir. Bu kabuldeki amaç, yuvalarda en iyi olan çözümlerin (guguk kuşlarının) kalmasını sağlamaktır. Her yuvayı tek bir guguk kuşu yumurtasının temsil ettiğini varsaymak, algoritmada yuva ve yumurta kavramları arasındaki farklılığı ortadan kaldırmaktadır.

Bahsedilen çalışma prensipleri göz önünde bulundurularak oluşturulan ve gravite belirtilerinin ters çözümü için hazırlanan guguk kuşu algoritmasına ait akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. Akış şemasında yer alan (N_p) popülasyon sayısını, (ρ_a) yumurtanın yuvadan atılma olasılığını ifade eden kontrol parametreleridir. En iyi parametre değerleri belirlendikten sonra Lévy uçuşları kullanılarak yeni çözümler üretmek için tasarlanan global yürüyüşler Denklem (1) ve (2)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha s \otimes H(\rho_a - \epsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \quad (1)$$

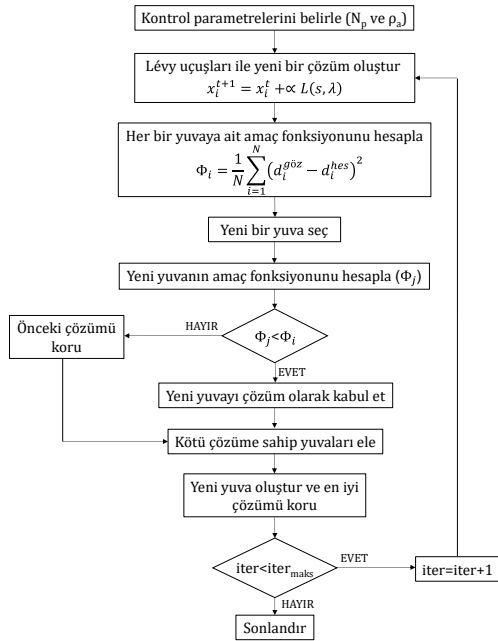
$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha L(s, \lambda) \quad (2)$$

Burada x_i^t rastsal pertürbasyon ile seçilmiş güncel konumu, x_i^{t+1} bir sonraki konumu ifade etmektedir. $H(u)$ Heaviside fonksiyonu (Heaviside function), α ölçekleme faktörü, ϵ düzgün dağılımlı rastsal bir sayı, s ise adım büyüklüğüdür. x_j^t ve x_k^t rastsal permütasyonla belirlenen iki farklı rastsal çözümdür. Ayrıca, \otimes girdi odaklı bileşeni (entry-wise product) ifade etmektedir. $L(s, \lambda)$ ile gösterilen Lévy dağılımı

Denklem (3)'te verilmektedir. Burada $\Gamma(\lambda)$, büyük adımlı durumlar için geçerli olan standart gama fonksiyonunu ifade etmektedir.

$$L(s, \lambda) = \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi\lambda/2)}{\pi} \cdot \frac{1}{s^{1+\lambda}}, (s \gg s_0 > 0) \quad (3)$$

Formülde verilen λ , Lévy dağılımını ifade ederken, Γ ise λ katsayısına bağlı bir fonksiyondur. Lévy dağılımına uygun olarak $|s| \geq |s_0|$ şartını sağlamalıdır. Burada s_0 en küçük adımı temsil etmektedir. Teorikte s_0 değeri sıfırdan çok büyük değer olsa da uygulamada bu değer, sıfıra yakın olarak 0,1 ile 1 aralığında alınır.



Şekil 1. Guguk Kuşu Arama Algoritması akış şeması ([34]'ten uyarlanmıştır).

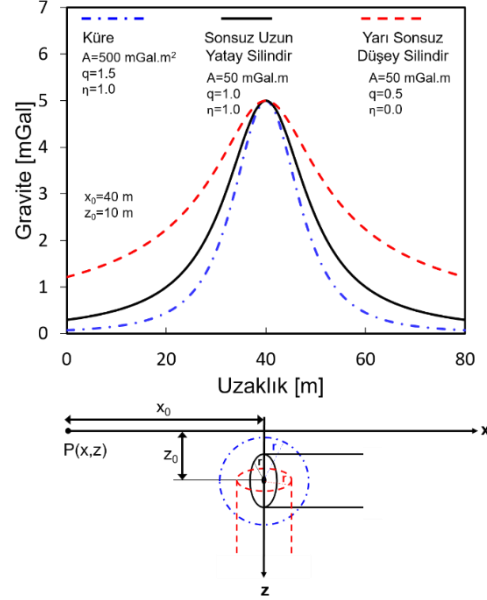
2.2. Gravite Anomali Modeli

Küre, yarı sonsuz düşey silindir veya sonsuz uzun yatay silindir gibi basit şekilli geometrik yapıların neden olduğu gravite belirtisi Denklem (4) ile ifade edilebilir [41,2]:

$$g(x, x_0, z_0, \eta, q, A) = A \frac{z_0^\eta}{[(x-x_0)^2 + z_0^2]^q} \quad (4)$$

Burada A mGal·m^{2q-η} genlik katsayısını, z_0 m kaynak derinliğini, x_0 m belirtinin yeryüzündeki

izdüşümünü, q ve η ise biçim faktörlerini ifade etmektedir [41,2]. Küre, sonsuz uzun yatay silindir ve yarı sonsuz düşey silindire ait fiziksel modeller ve modellere ait teorik anomaliler Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Küre, sonsuz uzun yatay silindir ve yarı sonsuz düşey silindire ait fiziksel model ve teorik anomaliler ([2]'den uyarlanmıştır).

3. Test Çalışmaları

Tablo 1'de doğru parametre değerleri verilen kuramsal veri kullanılarak, algoritmaya ait optimum (en küçük amaç fonksiyon değerlerini verecek) ρ_a ve N_p kontrol parametreleri belirlenmiştir. Birbirinden bağımsız 10 farklı çalıştırma ve 300 iterasyon sonucu elde edilen en iyi değer kullanılmıştır. Model parametrelerine ait elde edilen sonuçların en küçük ve en büyük rms (karekök ortalama) değerleri, ortalama ve standart sapma değerleri de tabloda yer almaktadır. Bağımsız 10 çözüm arasında istatistiksel hesaplamalar sonucunda elde edilen en iyi rms değerine sahip olan model parametrelerini veren parametreler, kontrol parametre çifti olarak atanmıştır. ρ_a 0,05 ve N_p 40 alınarak elde edilen model parametreleri en küçük rms değerini veren kontrol parametre çifti olmuştur. Çalışmanın devamında sentetik ve arazi verilerine ait model parametrelerinin kestirimi, belirlenen kontrol parametre çiftleri kullanılarak yapılmıştır. Kuramsal ve arazi veri

kümelerine ait model parametrelerinin güvenilirliğinin belirlenmesi için, Metropolis-Hasting (M-H) [42,43] algoritması kullanılmış ve kestirim parametreleri istatistiksel olarak da test edilmiştir.

3.1. Guguk Kuşu Arama Algoritması Parametre Belirleme Çalışması

Algoritmaya ait parametre değerlerinin iyi belirlenmiş olması, algoritmanın performansı açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla algoritmaya ait kontrol parametrelerinin (N_p ve ρ_a) belirlenmesi amacıyla parametre belirleme (parameter tuning) çalışmaları yapılmıştır. Birbirinden bağımsız 10 farklı çalıştırma sonucu elde edilen model parametreleri ve parametrelere ait rms değerleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Her bir çalıştırma 300 iterasyon için yapılmıştır ve algoritmaya ait popülasyon sayısı (N_p) ve olasılık değeri (ρ_a) parametre çiftleri bu iterasyonlar sonucu belirlenmiştir. Gözlenen ve hesaplanan veri arasındaki hata enerjisi, Denklem (5) ile verilen amaç fonksiyonu ile elde edilmektedir.

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

Burada, i her bir gözlem değerini, N veri sayısını, $d_i^{göz}$ gözlenen veriyi ve d_i^{hes} hesaplanan veriyi temsil etmektedir.

Çalışmada, en küçük amaç fonksiyonuna sahip veri kümesi çözüm olarak kabul edilmektedir. Amaç fonksiyonunun karekök ortalaması alınarak da en iyi çözüme ait rms değerleri hesaplanmıştır.

Gravite verilerinin ters çözümünde kullanılacak kontrol parametreleri belirlendikten sonra gürültüsüz ve gürültü eklenmiş kuramsal veri ve arazi belirtilerine ait model parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Algoritmaya ait kontrol parametrelerinin belirlenmesi aşamasında N_p ve ρ_a için önerilen 10-50 ve 0,05-0,45 aralıkları denenmiştir. Popülasyon sayısı (N_p) ve olasılık değeri (ρ_a) üzerinde yapılan değişimlerin çözüm üzerinde oluşturdukları etkiler Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Algoritmaya ait kontrol parametrelerinin çözüm üzerindeki etkisi (Sonuçlar algoritmanın 10 bağımsız çalışması sonucu elde edilmiştir).

ρ_a	N_p	Model Parametreleri					rms (mGal)				Ortalama Süre [s]
		A [mGal·m ² q·η]	z_0 [m]	q	η	x_0 [m]	Min	Maks	Ortalama	Std. Sapma	
0,05	10	665,92	10,01	1,50	0,87	40,00	0,001	0,003	0,001	0,0008	13,56
	20	655,09	9,95	1,49	0,86	40,00	0,001	0,003	0,002	0,0005	
	30	625,18	10,01	1,50	0,91	40,00	0,001	0,003	0,002	0,0004	
	40	503,63	10,01	1,51	1,03	39,99	0,001	0,002	0,002	0,0003	
	50	517,10	9,98	1,49	0,97	39,99	0,001	0,002	0,002	0,0004	
0,15	10	413,53	9,98	1,49	1,07	39,99	0,002	0,006	0,003	0,0010	19,64
	20	657,84	10,01	1,50	0,72	40,00	0,002	0,006	0,004	0,0012	
	30	592,45	9,98	1,49	0,91	39,99	0,002	0,006	0,003	0,0009	
	40	697,80	10,02	1,50	0,86	39,99	0,002	0,005	0,003	0,0010	
	50	546,95	10,00	1,50	0,96	39,99	0,001	0,005	0,003	0,0010	
0,25	10	700,27	9,96	1,49	0,83	39,99	0,003	0,008	0,005	0,0017	25,60
	20	643,35	10,01	1,49	0,88	40,00	0,002	0,008	0,005	0,0016	
	30	805,90	10,09	1,51	0,83	40,00	0,003	0,007	0,004	0,0012	
	40	885,28	9,99	1,50	0,75	40,00	0,001	0,007	0,004	0,0020	
	50	820,90	10,02	1,50	0,79	39,99	0,001	0,005	0,003	0,0011	
0,35	10	672,51	9,99	1,50	0,87	39,98	0,005	0,014	0,008	0,0026	32,03
	20	900,34	10,02	1,50	0,75	39,99	0,002	0,011	0,006	0,0027	
	30	777,83	10,01	1,50	0,82	40,00	0,003	0,009	0,005	0,0023	
	40	675,65	9,94	1,49	0,85	40,00	0,003	0,009	0,005	0,0019	
	50	376,56	9,99	1,50	1,12	40,00	0,002	0,007	0,006	0,0015	
0,45	10	531,81	10,01	1,51	1,00	40,01	0,007	0,016	0,011	0,0030	38,49
	20	911,12	10,02	1,51	0,76	39,99	0,003	0,012	0,009	0,0024	
	30	815,47	10,10	1,51	0,83	40,00	0,003	0,009	0,007	0,0020	
	40	366,92	10,00	1,50	1,14	40,00	0,002	0,011	0,006	0,0024	
	50	506,10	10,06	1,51	1,02	39,99	0,002	0,007	0,005	0,0013	

Parametre belirleme çalışmaları sonucuna göre, en düşük rms değerinin 0,001 mGal ve standart

sapma değerinin 0,0003 mGal olarak, ρ_a değerinin 0,05 ve N_p değerinin 40 olduğu

koşullarda elde edildiği görülmüştür. En düşük standart sapma değerinin bulunduğu olasılık değeri ve popülasyon sayısı için model parametreleri, A parametresi için 503,63 $mGal \cdot m^{2q-\eta}$, z_0 parametresi için 10,01 m, q parametresi için 1,51, η parametresi için 1,03 ve x_0 parametresi için 39,99 m olarak elde edilmiştir. En düşük rms ve standart sapma değerinin elde edildiği kontrol parametre çifti, gürültü içeren kuramsal veri ve arazi verilerinin ters çözüm aşamasında kullanılmıştır.

3.2. Kuramsal Veri

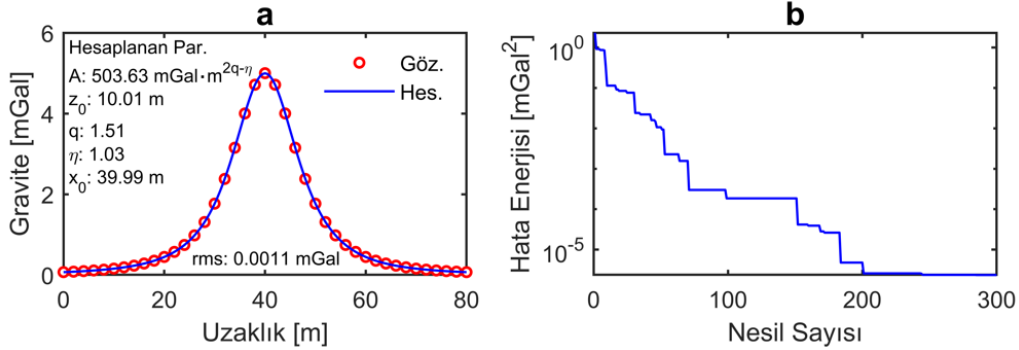
GKA algoritması ile yapılan parametre kestirim çalışması için öncelikle Denklem (4) yardımıyla üretilen küre biçimli kuramsal veri ve bu veriye Gaussian dağılımlı sıfır ortalamalı ve standart sapması $\pm 0,25$ mGal olan rastgele (pseudo random) sayı [44] eklenerek elde edilen gürültülü veri kümeleri kullanılmıştır. Modele ait parametre kestirim değerleri, doğru değerler ve arama uzayı sınırları ile Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. GKA algoritması ile elde edilen kuramsal veriye ait parametre değerleri.

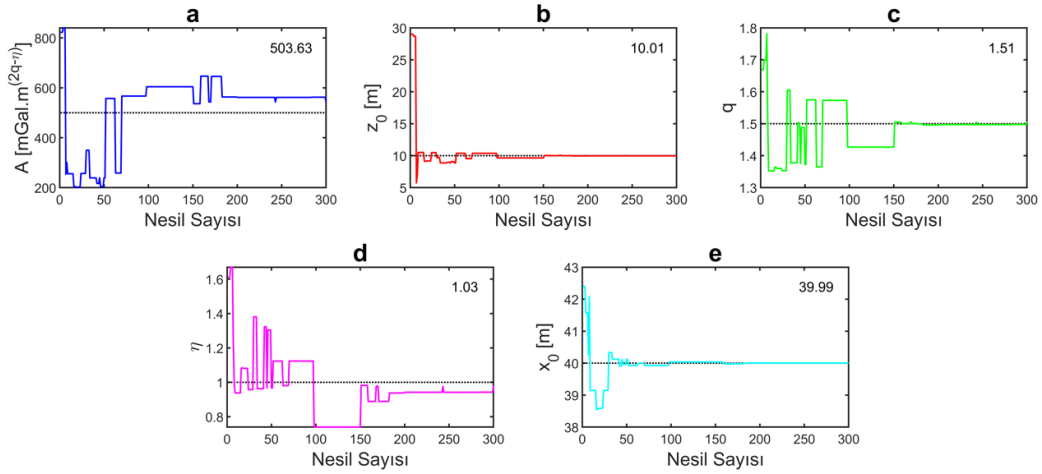
Model Parametreleri	Doğru Değerler	Arama Uzayı Sınırları		Parametre Kestirim Değerleri	
		Minimum	Maksimum	Gürültüsüz Veri	Gürültülü Veri
$A (mGal \cdot m^{2q-\eta})$	500	1	1000	503,63	527,67
$z_0 (m)$	10	1	40	10,01	10,84
q	1,5	0	2	1,51	1,61
η	1	0	2	1,03	1,26
$x_0 (m)$	40	0	80	39,99	40,06
$rms (mGal)$	-	-	-	0,0011	0,256

Gürültüsüz kuramsal verinin GKA algoritması kullanılarak 300 iterasyonda elde edilen ters çözüm sonucu (Şekil 3a) ile nesil sayısına bağlı olarak hata enerjisinin değişimi (Şekil 3b) Şekil 3 üzerinde gösterilmiştir. RMS değeri gürültüsüz

kuramsal veri için 0,0011 mGal olarak bulunmuştur. Elde edilen düşük rms değeri de algoritmanın gürültüsüz gravite verilerinin ters çözümünde başarılı sonuçlar sağladığını göstermiştir.



Şekil 3. Gürültüsüz kuramsal gravite belirtisinin GKA algoritması ile 300 iterasyon için ters çözüm sonucu (a) ve hata enerjisinin nesil sayısına bağlı değişimi (b)

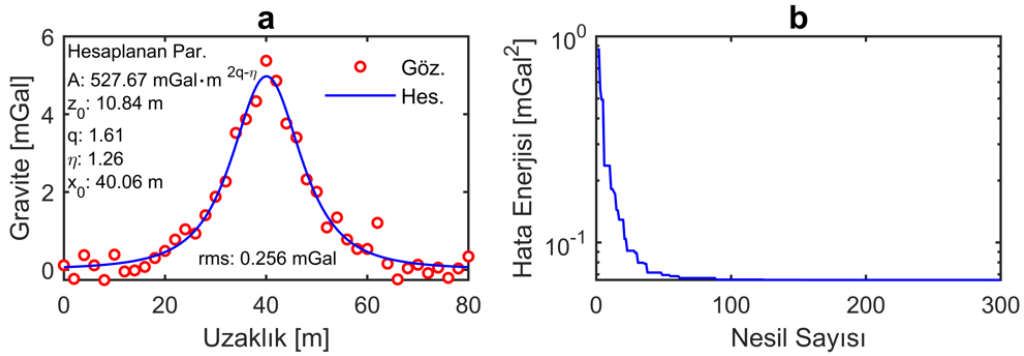


Şekil 4. Gürültüsüz kuramsal veriye ait model parametrelerinin nesil sayısına bağlı değişimi (a-e).

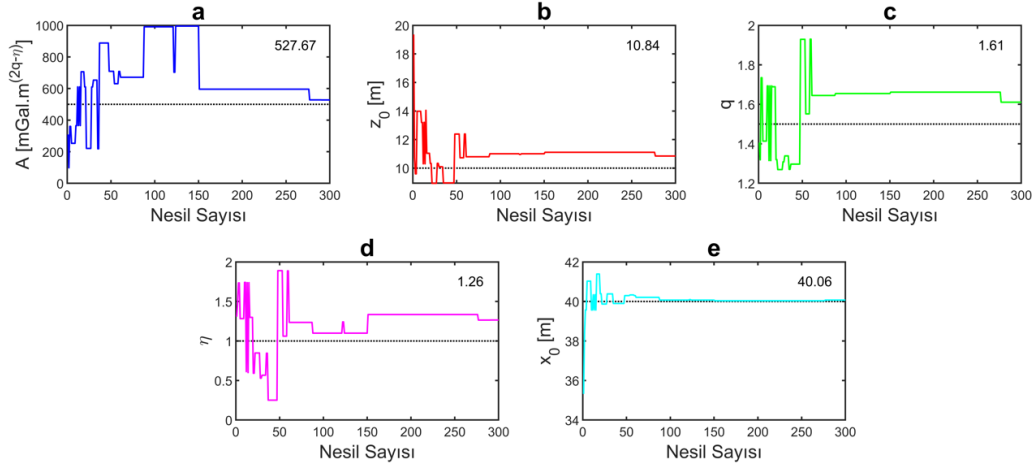
Şekil 4'te, gürültüsüz kuramsal verinin GKA algoritması ile ters çözümünde elde edilen model parametrelerinin nesil sayısına bağlı yakınsama grafikleri gösterilmiştir. Grafikler üzerinde parametrenin doğru değeri kesikli çizgi ile, model parametre kestirimi sonucunda gürültüsüz kuramsal veriye ait model parametre kestirim değerleri ise grafik üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 5'te gürültülü kuramsal verinin GKA algoritması kullanılarak 300 iterasyonda elde

edilen ters çözüm sonucu (Şekil 5a) ile nesil sayısına bağlı olarak hata enerjisinin değişimi (Şekil 5b) gösterilmiştir. Elde edilen hata enerjisine bağlı olarak rms değeri gürültülü kuramsal veri için 0,256 mGal olarak bulunmuştur. Ayrıca GKA algoritması ile gürültülü verinin model parametre kestirimi sonucunda A parametresi 527,67 mGal·m^{2q-η}, z_0 parametresi 10,84 m, q parametresi 1,61, η parametresi 1,26 ve x_0 parametresi 40,06 m olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. Gürültü içeren kuramsal gravite belirtisinin GKA algoritması ile 300 iterasyon için ters çözüm sonucu (a) ve hata enerjisinin nesil sayısına bağlı değişimi (b).



Şekil 6. Gürültü içeren kuramsal veriye ait model parametrelerinin nesil sayısına bağlı değişimi (a-e).

Gürültülü kuramsal verinin GKA algoritması ile ters çözümünde elde edilen model parametrelerinin nesil sayısına bağlı yakınsama grafikleri her bir model parametresi için Şekil 6'da gösterilmiştir. Her bir model parametresi için verilen yakınsama grafiklerinde parametrelerin doğru değerleri ve yakınsama değerleri verilmektedir.

Tablo 3'te ise gürültüsüz ve gürültülü kuramsal verilerin GKA algoritması ile ters çözümü neticesinde elde edilen en düşük rms değerine sahip parametre kestirim değerlerinin yanında 10 bağımsız çözüm için model parametrelerine ait ortalama değerler ve standart sapmalar verilmiştir. En düşük standart sapma değeri

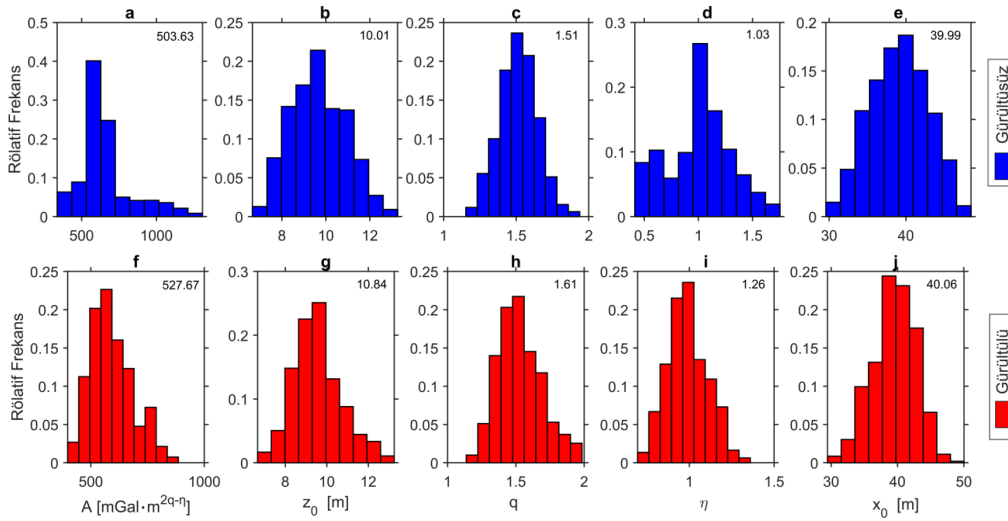
gürültülü kuramsal verinin η parametresi için 0,11 olarak bulunmuştur. Bunun yanında hem gürültüsüz hem de gürültülü kuramsal verilerin q ve η parametreleri için çok düşük standart sapma değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla tüm çözümlerde bulunan q ve η parametrelerinin, en düşük parametre değerine yakın olduğu ve ortalama değerine yakın olduğu görülmektedir. Diğer yandan daha yüksek sonuçlara sahip A , z_0 ve x_0 parametrelerinde standart sapma, q ve η parametrelerine göre daha yüksek çıkmaktadır. En yüksek standart sapma değeri A parametresi için gürültüsüz kuramsal verinin GKA algoritması ile ters çözümünde 176,01 olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Kuramsal verilerin GKA algoritması ile kestirim, ortalama ve standart sapma değerleri.

Model Parametreleri	Gürültüsüz Veri			Gürültülü Veri		
	Kestirim Değerleri	Ortalama	Std. Sapma	Kestirim Değerleri	Ortalama	Std. Sapma
A ($mGal \cdot m^{2q-\eta}$)	503,63	654,93	176,01	527,67	592,24	93,60
z_0 (m)	10,01	9,66	1,24	10,84	9,55	1,15
q	1,51	1,51	0,13	1,61	1,53	0,16
η	1,03	1,01	0,29	1,26	0,98	0,11
x_0 (m)	39,99	39,08	3,70	40,06	39,51	3,24

Belirsizlik analizi sonucunda gürültüsüz ve gürültülü kuramsal verilerin M-H örneklemeinden elde edilen histogramlar Şekil 7'de gösterilmektedir. Her model parametresi için M-H belirsizlik analizi 90001 örnek

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulunan model parametrelerinin dağılımları incelendiğinde hem gürültüsüz hem de gürültülü kuramsal veri için GKA algoritmasının kabul edilebilir doğrulukta dağılım sergilediği görülmektedir.



Şekil 7. Kuramsal verilere ait model parametrelerinin M-H algoritması ile elde edilen histogramları. Model parametrelerine ait kestirim değerleri histogramlar üzerinde gösterilmiştir.

3.3. Arazi Verisi

3.3.1. Camaguey, Küba

Çalışmada, ilk kullanılan arazi verisi olarak Küba'da bir kromit yatağı üzerinde ölçülen veri [45,2] belirlenmiştir. Model parametreleri için arama uzayı sınırları ve ters çözüm sonucu elde edilen kestirim parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Kullanılan gravite belirtisine ait model parametreleri sırasıyla genlik katsayısı

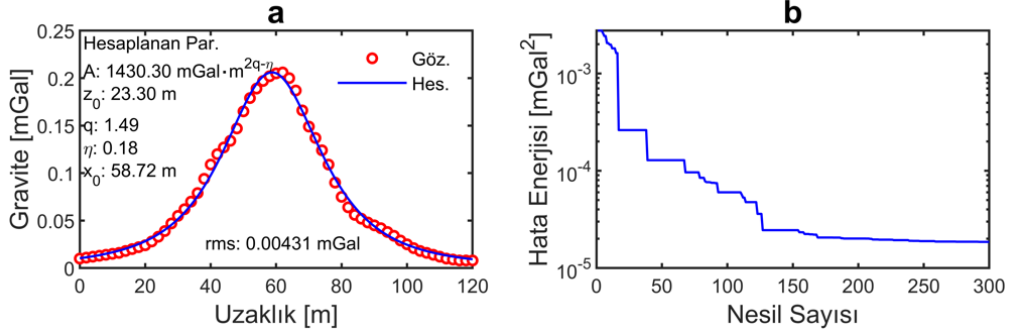
1430,30 mGal·m^{2q-η}, yapının derinliği 23,30 m, yapının yüzeydeki izdüşümü 58,72 m olarak elde edilmiştir. Modele ait şekil faktörleri ise 1,49 ve 0,18 olarak kestirilmiştir. Ters çözüm sonucu kestirilen model parametrelerine ait rms değeri 0,00431 mGal'dir. Kestirilen model parametre değerlerinin doğruluğu, M-H algoritması ile test edilmiş ve her bir model parametre değeri için histogramlar aracılığıyla gösterilmiştir. Sonuçlar güvenilir alan sınırları içerisinde yer almaktadır.

Tablo 4. Arama uzayları ve GKA algoritması ile kestirilen parametreler (Camaguey, Küba).

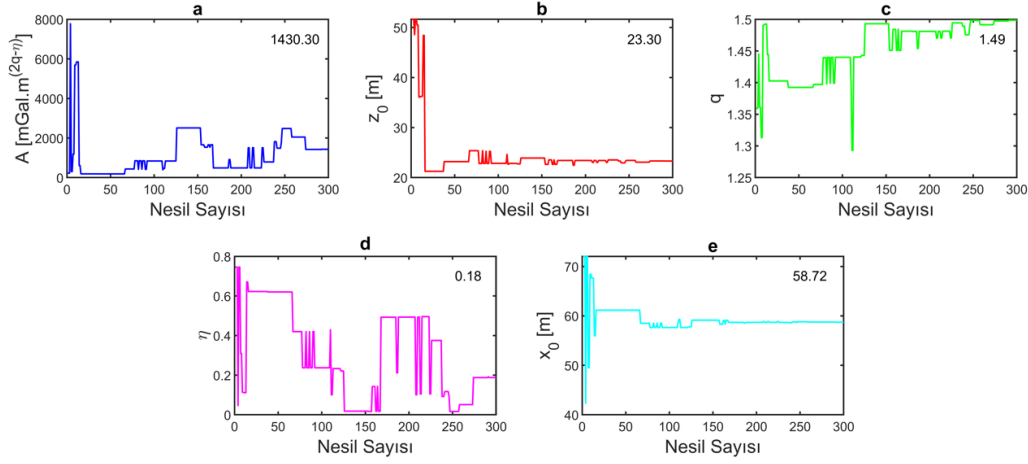
Uygulama	Model Parametreleri	Arama Uzayı Sınırları	Kestirim Değerleri	Ekinci vd. (2016) [2]	Ekinci vd. (2020) [17]
	A (mGal·m ^{2q-η})	1 - 10000	1430,30	288,25	175,02
Camaguey	z_0 (m)	1 - 100	23,30	23,23	23,23
Gravite	q	0,5 - 1,5	1,49	1,5	1,5
Belirtisi	η	0 - 1	0,18	0,71	0,86
	x_0 (m)	0 - 120	58,72	58,73	58,73
	rms		0,00431	43·10 ⁻⁴	4,3·10 ⁻³

Şekil 8a'da Camaguey (Küba) arazi verisinin GKA algoritması ile ters çözümünde elde edilen gözlenen ve hesaplanan değerler model parametrelerinin değerleri ile verilmiştir. Hata enerjisinin nesil sayısına bağlı değişimi ise Camaguey arazi verisinin ters çözümü için Şekil 8b'de gösterilmiştir. Şekil 9'da ise nesil sayısına bağlı yakınsama grafiği her bir model

parametresi için ayrı ayrı gösterilmiştir. Grafik üzerinde parametrenin doğru değerleri ve model parametre kestirimi sonrasında arazi verisine ait model parametreleri kestirim değerleri gösterilmiştir. Kaynak derinliği ve belirti izdüşümü parametrelerinin hızlı bir yakınsama gösterdiği görülmektedir.



Şekil 8. Camaguey belirtisinin GKA algoritması ile 300 iterasyon için ters çözüm sonucu (a) ve hata enerjisinin nesil sayısına bağlı değişimi (b).



Şekil 9. Camaguey arazi verisine ait model parametrelerinin nesil sayısına bağlı değişimi (a-e).

3.3.2. Quebec, Kanada

Kullanılan bir diğer arazi verisi Quebec (Kanada) bölgesinde yer alan sülfür cevherinden elde edilen gravite verisidir [46,2]. Bu veri kümesine ait model parametreleri için arama uzayı sınırları ve ters çözümüne ait kestirim parametreleri Tablo 5'te yer almaktadır. Kullanılan gravite belirtisine ait model parametreleri sırasıyla genlik katsayısı 204,04 mGal·m^{2q-η}, yapının derinliği 49,03 m, yapının

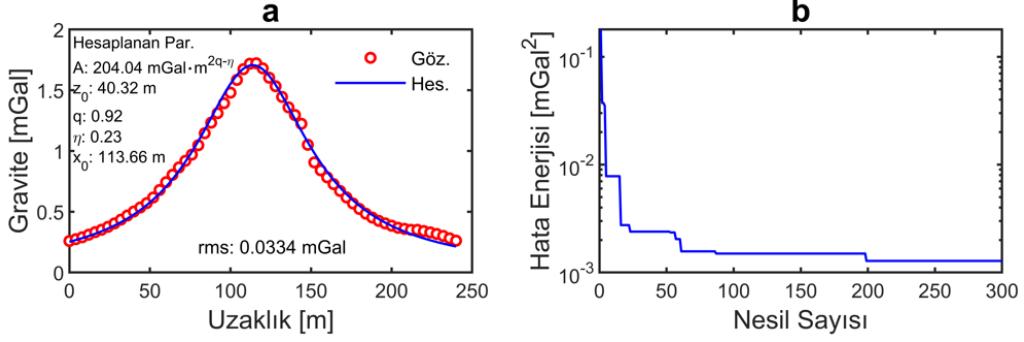
yüzeydeki izdüşümü 113,66 m olarak elde edilmiştir. Modele ait şekil faktörleri ise 0,92 ve 0,23 olarak kestirilmiştir. Ters çözüm sonucu kestirilen model parametrelerine ait rms değeri 0,0334 mGal'dir. Kestirilen model parametre değerlerinin doğruluğu, modele ait her bir parametre değeri için M-H algoritması ile test edilerek histogram dağılımı şeklinde gösterilmiştir. Sonuçlar güvenilir alan sınırları içerisinde yer almaktadır.

Tablo 5. Arama uzayları ve GKA algoritması ile kestirilen parametreler (Quebec, Kanada).

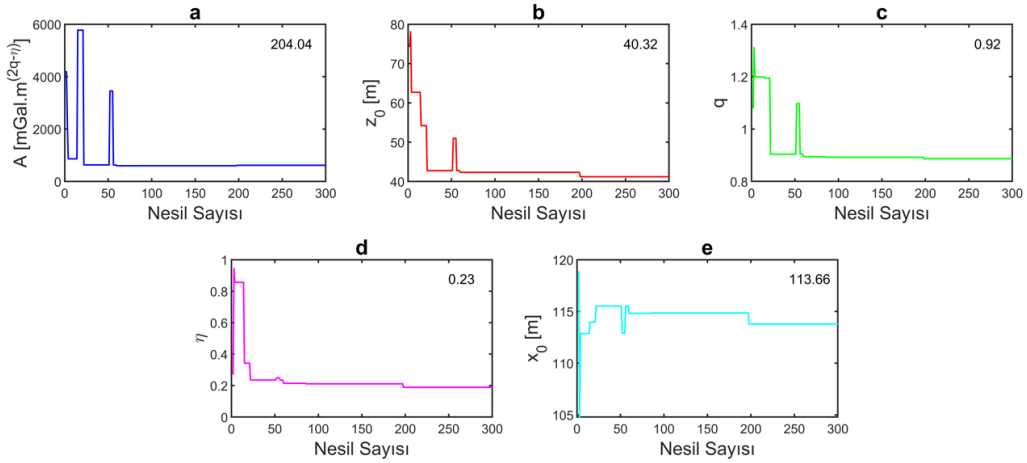
Uygulama	Model Parametreleri	Arama Uzayı Sınırları	Kestirim Değerleri	Ekinci vd. (2016) [2]
Quebec Gravite Belirtisi	A (mGal·m ^{2q-η})	1 – 10000	204,04	299,11
	z_0 (m)	1 – 100	40,32	35,39
	q	0,5 – 1,5	0,92	0,74
	η	0 – 1	0,23	0,04
	x_0 (m)	0 – 240	113,66	59
	rms		0,0334	29·10 ⁻³

Şekil 10'da Quebec (Kanada) arazi verisinin GKA algoritması ile ters çözümünde elde edilen model parametrelerinin değerleri ile birlikte anomaliye ait gözlenen ve hesaplanan değerler (Şekil 10a) ve hata enerjisinin nesil sayısına bağlı değişimi (Şekil 10b) gösterilmiştir. Şekil 11'de

ise nesil sayısına bağlı yakınsama grafiği her bir model parametresi için ayrı ayrı gösterilmiştir. Model parametrelerinin 50. iterasyondan sonra hızlı bir yakınsama eğiliminde olduğu görülmektedir.



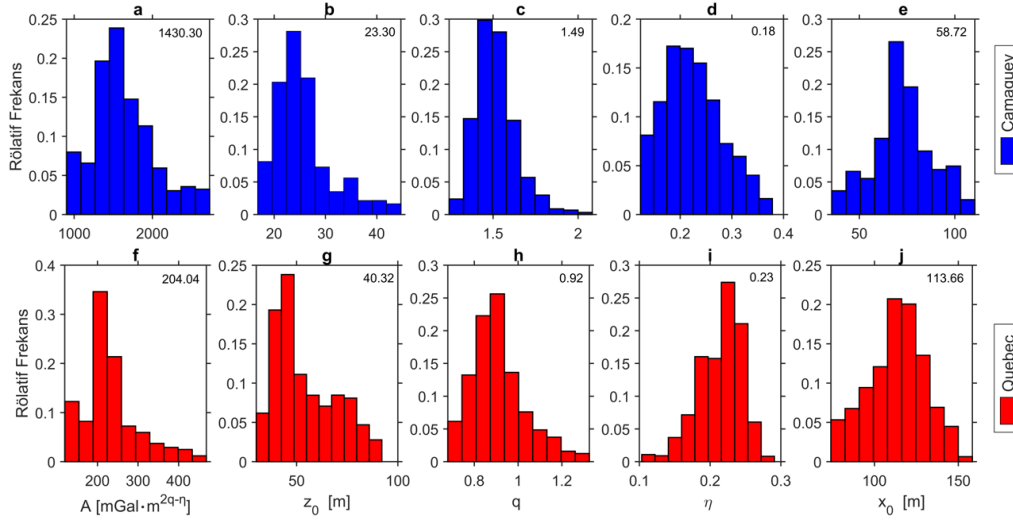
Şekil 10. Quebec belirtisinin GKA algoritması ile 300 iterasyon için ters çözüm sonucu (a) ve hata enerjisinin nesil sayısına bağlı değişimi (b).



Şekil 11. Quebec verisine ait model parametrelerinin nesil sayısına bağlı değişimi (a-e).

Arazi verileri için belirsizlik analizi sonucunda M-H örneklemeinden elde edilen histogramlar ile model parametrelerinin olasılık yoğunlukları Şekil 12'de gösterilmektedir. Her model parametresi için M-H belirsizlik analizi 90001 örnek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulunan

model parametrelerinin değerleri ayrıca grafikler üzerinde gösterilmiştir. Model parametrelerinin dağılımları ve parametre kestirim değerleri göz önüne alındığında uygun bir dağılım sergilendiği görülmektedir.



Şekil 12. Arazi verilerine ait model parametrelerinin M-H algoritması ile elde edilen histogramları. Model parametrelerine ait kestirim değerleri histogramlar üzerinde gösterilmiştir.

Arazi verilerinin GKA algoritması ile ters çözümü sonrasında bulunan kestirim değerleri, 10 bağımsız çözüm için model parametrelerine ait ortalama değerler ve standart sapmalar verilmiştir. En düşük standart sapma değeri Quebec arazi verisinin η parametresi için 0,03 olarak bulunmuştur. Bunun yanında hem Camaguey hem de Quebec verilerinin q ve η parametreleri için çok düşük standart sapma değerleri elde edilmiştir. Bu doğrultuda tüm çözümlerde bulunan q ve η parametrelerinin, en

düşük parametre değerine yakın olduğu ve ortalama değer bulunan parametre kestirim değerine yakın olduğu görülmektedir. Diğer yandan kestirim değerlerinin daha yüksek olan sonuç değerlerine bağlı olarak A , z_0 ve x_0 parametrelerinde standart sapma, q ve η parametrelerine göre daha yüksek çıkmaktadır. En yüksek standart sapma değeri, en yüksek model parametre değerine sahip A parametresi için Camaguey arazi verisinin GKA algoritması ile ters çözümünde 390,95 olarak bulunmuştur.

Tablo 6. Arazi verilerinin GKA algoritması ile kestirim, ortalama ve standart sapma değerleri.

Model Parametreleri	Camaguey (Küba)			Quebec (Kanada)		
	Kestirim Değerleri	Ortalama	Std. Sapma	Kestirim Değerleri	Ortalama	Std. Sapma
A ($mGal \cdot m^{2q-n}$)	1430,30	1603,03	390,95	204,04	231,23	69,05
z_0 (m)	23,30	25,64	5,43	40,32	54,16	15,17
q	1,49	1,51	0,12	0,92	0,91	0,12
η	0,18	0,22	0,05	0,23	0,21	0,03
x_0 (m)	58,72	72,63	15,35	113,66	113,38	1,17

4. Sonuçlar

Sunulan çalışmada GKA algoritması, gravite kuramsal ve arazi (Camaguey ve Quebec) belirtilerinin ters çözümünde kullanılmıştır. Algoritmaya ait kontrol parametreleri, parametre belirleme çalışmaları ve kestirilen sonuçlara ait istatistiksel değerlendirmeler neticesinde belirlenmiştir. Algoritmaya ait kontrol parametreleri N_p 40, ρ_a 0,05 olarak kullanılmıştır. Gürültüsüz ve gürültü içeren

kuramsal verilerin ve arazi verilerinin ters çözümünde 300 iterasyon uygulanmıştır. Kuramsal verilerin ters çözümü sonucu elde edilen kestirim değerleri, model parametrelerin doğru değerleriyle uyumlu sonuçlar vermiştir. Hata enerjilerinin iterasyon sayısına göre değişimini gösteren grafikler, algoritmanın hızlı bir yakınsama özelliği olduğunu göstermektedir. Ayrıca, M-H algoritması kullanılarak yapılan belirsizlik analizleri sonucu model parametre

kestirimlerinin güvenilir aralıkta sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çalışmanın sonunda, kullanıcı tanımlı sadece iki parametre (popülasyon sayısı ve yumurtanın yuvadan atılma olasılığı) içeren algoritmanın, model parametrelerinin ters çözümünde kullanım kolaylığı sağladığı görülmüştür. Metasezgisel yöntemlerin temelinde var olduğu gibi, türev hesabı gerektirmeden ve iyi bir başlangıç modeline gereksinim duymadan, lokal minimumlardan kurtulup global minimumlara ulaşabilme/yakınsayabilme kabiliyetleri sonucu, kullanılan algoritmanın gravite belirtilerinin parametre kestiriminde başarılı olarak uygulanabilir olduğu gözlenmiştir.

5 Yazar katkı beyanı

Seçil Turan Karaoğlan: Metasezgisel algoritmanın jeofizik verilere uygulanabilir hale getirilmesi, literatür taraması, kuramsal verilerin üretimi ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında;

Gökhan Göktürkler: Fikrin oluşması, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

6 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, Süleyman Demirel Üniversitesi'nden Dr. Çağlayan Balkaya'ya ve çalışmada kullanılan GKA algoritmasının orijinal kodu için Dr. Xin-She Yang'a teşekkürlerini sunar. GKA algoritması, MATLAB® (<http://www.mathworks.com/>) kullanılarak çalıştırılmış ve sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışma, yazarlardan Seçil Turan Karaoğlan'ın doktora tezinin bir parçasıdır.

Kaynakça

- [1] Göktürkler, G., Balkaya, Ç., Ekinci Y.L., Turan, S. 2016. Uygulamalı jeofizikte metasezgiseller. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 22(6): 563-580. DOI: 10.5505/pajes.2015.81904.
- [2] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Turan S. 2016. Model parameter estimations from residual gravity anomalies due to simple-shaped sources using differential evolution algorithm. Journal of Applied Geophysics. Cilt. 129 s. 133-147. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.03.040.
- [3] Balkaya, Ç., Ekinci Y.L., Göktürkler, G., Turan, Seçil. 2017. 3D non-linear inversion of magnetic anomalies caused by prismatic bodies using differential evolution algorithm, Journal of Applied Geophysics, Cilt. 136, s. 372-386. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.10.040.
- [4] Holland, J.H. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press. 211s.
- [5] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. 1983. Optimization by simulated annealing, Science, Cilt. 220, s. 671-680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671.
- [6] Kennedy, J., Eberhart R. 1995. Particle swarm optimization. In: IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, USA. s. 1942-1948.
- [7] Storn, R., Price, K. 1995. Differential Evolution-A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces, Technical Report, International Computer Science Institute Berkeley, USA. TR 95-012.
- [8] Storn, R., Price, K. 1997. Differential Evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, Journal of Global Optimization Cilt. 11(4) s. 341-359. DOI: 10.1023/A:1008202821328.
- [9] Storn, R. 1996. Differential Evolution Design of an IIR-Filter. In: IEEE International conference on Evolutionary Computation (CEC'96), Nagoya, Japan. s. 268-273.
- [10] Abdelazeem, M., Gobashy, M., 2006. Self-potential inversion using genetic algorithm. JKAU Earth Sci. 17 (1), 83-101. DOI: 10.4197/Ear.17-1.5.
- [11] Montesinos, F.G., Blanco-Montenegro, I., Arnoso, J. 2016. Three-dimensional inverse modelling of magnetic anomaly sources based on a genetic algorithm. Phys. Earth Planet. Inter. 253, 74-87. DOI: 10.1016/j.pepi.2016.02.004.
- [12] Kaftan, I. 2017. Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm. Acta Geophys. 65 (4), 627-634. DOI: 10.1007/s11600-017-0060-7.
- [13] Essa, K.S., Mehane, S.A., & Elhussein, M. 2021. Gravity data interpretation by a two-sided fault-like geologic structure using the global particle swarm technique. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Cilt. 311, s. 106631. DOI: 10.1016/j.pepi.2020.106631
- [14] Pallerio, J.L.G., Fernandez-Martinez, J.L., Fernandez-Muniz, Z., Bonvalot, S., Gabalda, G., Nalpas, T. 2021. GRAVPSO2D: A matlab package for 2D gravity inversion in sedimentary basins using the Particle Swarm Optimization algorithm, Computers and Geosciences, Cilt. 146, s. 104653. DOI: 10.1016/j.cageo.2020.104653
- [15] Srivastava, S., Agarwal, B. N. P. 2010. Inversion of the amplitude of the two-dimensional analytic signal of magnetic anomaly by the particle swarm optimization technique, Geophysical Journal International, Cilt. 182, s. 652-662.
- [16] Pekşen, E., Yas, T., Kıyak, A. 2014. 1-D DC resistivity modeling and interpretation in anisotropic media using particle swarm optimization, Pure Appl. Geophys. Cilt. 171, s. 2371-2389. DOI: 10.1007/s00024-014-0802-2.

- [17] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2020. Global Optimization of Near-Surface Potential Field Anomalies Through Metaheuristics. In: Biswas, A., Sharma, S. (Eds.), *Advances in Modeling and Interpretation in near Surface Geophysics*. Springer Geophysics. Springer, Cham, s. 155-188. DOI: 10.1007/978-3-030-28909-6_7.
- [18] Tarhan, Bal, O., B.Tekkeci, A., Karcioğlu, G. 2021. Application of particle swarm optimization to 3D Euler deconvolution and 3D modeling of gravity data-a case study from Biga and can towns, NW Turkey, *Arabian Journal of Geosciences*, Cilt. 14(8). DOI: 10.1007/s12517-021-07029-y.
- [19] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2019. Parameter estimations from gravity and magnetic anomalies due to deep-seated faults: differential evolution versus particle swarm optimization, *Turkish Journal of Earth Sciences*, Cilt. 28, s. 860-881. DOI: 10.3906/yer-1905-3.
- [20] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Özyalın, Ş. 2021. Gravity data inversion for the basement relief delineation through global optimization: A case study from the Aegean Graben System, western Anatolia, Turkey, *Geophysical Journal International*, Cilt. 224(2), s. 923-944. DOI: 10.1093/gji/ggaa492
- [21] Roy, A., Dubey, P. C., Prasad, M. 2021. Gravity inversion for heterogeneous sedimentary basin with b-spline polynomial approximation using differential evolution algorithm, *Geophysics*, Cilt. 86(3), s. F35-F47. DOI: 10.1190/geo2019-0779.1
- [22] Li, X., Yin, M. 2012. Application of differential evolution algorithm on self-potential data. *PLoS One* 7 (12), 1-11. DOI: 10.1371/journal.pone.0051199.
- [23] Balkaya, Ç. 2013. An implementation of differential evolution algorithm for inversion of geoelectrical data, *Journal of Applied Geophysics*, Cilt. 98, s. 160-175. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.08.019.
- [24] Ekinci, Y.L., Özyalın, Ş., Sındırgı, P., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2017. Amplitude inversion of 2D analytic signal of magnetic anomalies through differential evolution algorithm, *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(6): 1492-1508. DOI: 10.1088/1742-2140/aa7ffc.
- [25] Göktürkler, G., Balkaya, Ç., 2012. Inversion of self-potential anomalies caused by simple geometry bodies using global optimization algorithms. *Journal of Geophysics and Engineering*, Cilt. 9 (5), s. 498-507. DOI: 10.1088/1742-2132/9/5/498.
- [26] Sharma, S.P., Biswas, A. 2013. Interpretation of self-potential anomaly over a 2D inclined structure using very fast simulated-annealing global optimization - an insight about ambiguity, *Geophysics*, Cilt. 78 (3), WB3-WB15. DOI: 10.1190/geo2012-0233.1.
- [27] Biswas, A., Sharma, S.P. 2014. 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*, Cilt. 105, s. 235-247. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.03.023.
- [28] Chauhan, M.S., Fedi, M., Sen, M.S. 2018. Gravity inversion by the Multi-Homogeneity depth estimation method for investigating salt domes and complex sources, *Geophysical Prospecting*, Cilt. 66, s. 175-191. DOI: 10.1111/1365-2478.12603.
- [29] Trivedi, S., Kumar, P., Parija, M.P., Biswas, A. 2020. Global optimization of model parameters from the 2-D analytic signal of gravity and magnetic anomalies over geobodies with idealized structure. In: Biswas, A., Sharma, S. (Eds.), *Advances in Modeling and Interpretation in near Surface Geophysics*. Springer Geophysics. Springer, Cham, s. 189-221. DOI: 10.1007/978-3-030-28909-6_8.
- [30] Alkan, H. and Balkaya, Ç. 2018. Parameter estimation by Differential Search Algorithm from horizontal loop electromagnetic (HLEM) data. *Journal of Applied Geophysics*, Cilt. 149, s. 77-94. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.12.016.
- [31] Balkaya, C., Kaftan, İ. 2021. Inverse modelling via differential search algorithm for interpreting magnetic anomalies caused by 2D dyke-shaped bodies, *Journal of Earth System Sciences*, Cilt. 130, s. 135. DOI: 10.1007/s12040-021-01614-1.
- [32] Agarwal, A., Chandra, A., Shalivahan, S., Singh, R.K. 2018. Grey wolf optimizer: a new strategy to invert geophysical data sets, *Geophysical Prospecting*, Cilt. 66, s. 1215-1226. DOI: 10.1111/1365-2478.12640.
- [33] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2021. Backtracking Search Optimization: A Novel Global Optimization Algorithm for the Inversion of Gravity Anomalies, *Pure and Applied Geophysics*, Cilt. 178, s. 4507-4527. DOI: 10.1007/s00024-021-02855-3.
- [34] Turan-Karaoğlu, S., Göktürkler, G. 2021. Cuckoo Search Algorithm for model parameter estimation from self-potential data, *Journal of Applied Geophysics*, Cilt. 194, s. 104461. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104461.
- [35] Yang, X.-S., Deb, S. 2009. Cuckoo search via Lévy flights. In: *IEEE World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC)*; Coimbatore, India, s. 210-214.
- [36] Yang, X.-S., Deb, S. 2014. Cuckoo search: recent advances and applications, *Neural Computing and Applications*, Cilt. 24, s. 169-174. DOI: 10.1007/s00521-013-1367-1.
- [37] Gandomi, A.H., Yang, X.-S., Alavi, A.H. 2013. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems, *Engineering with Computers*, Cilt. 29 (1), s. 17-35. DOI: 10.1007/s00366-011-0241-y.
- [38] Bodaghi, A., Ansari, H.R., Gholami, M. 2015. Optimized support vector regression for drilling rate of penetration estimation, *Open Geosciences*, Cilt. 7(1), s. 870-879. DOI: 10.1515/geo-2015-0054.
- [39] Ouaarab, A., Ahiod, B., Yang, X.S., 2014. Discrete cuckoo search algorithm for the travelling salesman problem, *Neural Computing and Applications*, Cilt. 24, s. 1659-1669. DOI: 10.1007/s00521-013-1402-2
- [40] Yang, X.-S. 2014. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 1st ed. Massachusetts, USA: Elsevier.
- [41] Abdelrahman, E.M., Bayoumi, A.I., Abdelhady, Y.E., Gobashy, M.M., El-Araby, H.M. 1989. Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies, *Geophysics*, Cilt. 54(12), s. 1614-1621. DOI: 10.1190/1.1442629
- [42] Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E. 1953. Equations of state calculations by fast computing machines, *The Journal*

- of Chemical Physics, Cilt. 21, s. 1087-1091. DOI: 10.1063/1.1699114.
- [43] Hasting, W. 1970. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications, Biometrika, Cilt. 57(1), s. 97-109. DOI: 10.2307/2334940
- [44] Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth M., Rossi, F. 2009. GNU Scientific Library Reference Manual 3rd edition (Bristol: Network Theory Ltd) s. 497.
- [45] Davis, W.E., Jackson, W.H., Richter, D.H. 1957. Gravity prospecting for chromite deposits in Camaguey province, Cuba, Geophysics, Cilt. 22(4), s. 848-869. DOI: 10.1190/1.1438427.
- [46] Grant, F.S., West, G.F. 1965. Interpretation Theory in Applied Geophysics, McGraw-Hill Book Co. 583s.