



# Manta Vatozu Beslenme Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Sismik Kırılma Verisinin Ters Çözümü

## Seismic Refraction Data Inversion using a Manta Ray Foraging Optimization Algorithm

Şenol Özyalın<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [senol.ozyalin@deu.edu.tr](mailto:senol.ozyalin@deu.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 02.02.2023

Kabul Tarihi / Accepted: 04.04.2023

Atıf şekli/ How to cite: ÖZYALIN, Ş. (2023). Manta Vatozu Beslenme Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Sismik Kırılma Verisinin Ters Çözümü. DEUFMD, 25(75), 701-724.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257515

### Öz

Sismik kırılma yöntemi, mühendislik jeofiziği, mühendislik jeolojisi ve jeoteknik mühendisliği araştırma alanlarında kullanılan, özellikle mühendislik yapılarının inşasından önce zeminin özelliklerinin ortaya konmasında önemli bir role sahip olup etkili bir jeofizik yöntemdir. Bu çalışma, P dalgasının ilk varış zamanlarından P dalga hızının ( $V_p$ ) 1B dağılımını tahmin etmek için yeni bir ters çözüm algoritmasının uygulamasını amaçlamaktadır. Tanıtılan ters çözüm algoritması, Manta Vatozu Beslenme Optimizasyonu (MVBO) algoritması, mühendislik problemlerin çözümü için geliştirilmiş olan biyolojik tabanlı sezgisel üstü alternatif bir optimizasyon yaklaşımıdır. Farklı optimizasyon problemlerini çözmek için manta vatozların hayatta kalabilmesi amacıyla sergiledikleri farklı yiyecek arama stratejilerinden ( zincir beslenme, siklon beslenme ve takla atarak beslenme) yararlanır. Bu çalışma, MVBO algoritmasının sismik kırılma yönteminde gözlenen ve hesaplanan varış zamanları arasındaki farkı en aza indiren 1B hız modelini bulmaya yönelik ilk örnektir. Sunulan yöntemin etkinlik değerlendirmesi için önce farklı çok tabakalı yapay sismik modellere uygulanmış ve daha sonra bu veri setine gürültü eklenerek yöntemin etkinliği irdelenmiştir. Son olarak, MVBO ters çözüm algoritması gerçek arazi verisine uygulanmıştır. İran'ın Doğu Azerbaycan eyaleti Malekan ilçesinde bulunan Leylanchay baraj sahasında toplanmış olan gerçek sismik kırılma veri kümesi kullanılmıştır. Hem yapay hem de arazi verisine ait model parametrelerinin kestirimi ve güvenilirliğinin belirlenmesi için, rölatif frekans dağılımları ve olasılık yoğunluk fonksiyonları (OYF) yardımıyla kestirim parametreleri istatistiksel olarak da test edilmiştir. Bulgular, çalışma alanının üç tabakadan oluştuğunu, ilk iki tabakanın alüvyon ve son tabakanın ana kayayı temsil ettiğini göstermektedir. Sonuçlar, sismik kırılma verilerinin yorumlanmasında MVBO ters çözüm algoritmasının uygun ve güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Küresel optimizasyon, Manta vatozu beslenme optimizasyonu, Metasezgisel, Sismik kırılma

### Abstract

The seismic refraction method is an effective geophysical method used in engineering geophysics, engineering geology, and geotechnical engineering research fields, especially having an important role in revealing the properties of the soil before the construction of engineering structures. This study is the first example to find the 1D velocity model that minimizes the difference between the observed and calculated arrival times in the seismic refraction method of the MVBO algorithm. The

introduced inversion algorithm, the Manta Rays Foraging Optimization (MRFO) algorithm, is a biological-based metaheuristic alternative optimization approach developed for the solution of engineering problems. It uses different foraging strategies (chain foraging, cyclone foraging, and somersault foraging) that manta rays exhibit to survive in order to solve different optimization problems. This study is the first example of using the MRFO algorithm to optimize the 1D distribution of seismic refraction data. In order to evaluate the effectiveness of the presented method, it was first applied to different multilayer synthetic seismic models and then the efficiency of the method was examined by adding noise to this data set. Finally, the MRFO inversion algorithm was applied to real-field data. A real seismic refraction dataset collected at the Leylanchay dam site in the Malekan district of the East Azerbaijan province of Iran was used. In order to determine the reliability of the model parameters of both synthetic and field data, the estimation parameters were also tested statistically through relative frequency distributions and probability density functions (PDF). The findings show that the study area consists of three layers, with the first two layers representing alluvium and the last layer being bedrock. The results reveal that the MRFO inversion algorithm gives appropriate and reliable results in the interpretation of seismic refraction data.

**Keywords:** Global optimization, Manta ray foraging optimization, Metaheuristic, Seismic refraction

## 1. Giriş

Sismik yöntemlerde sismik dalgaların yer içerisinde yayılması fizik yasalarına dayanmaktadır. Kaynak tarafından üretilen dalgalar, yatayla farklı açılarla aşağıya doğru hareket eder. Sismik dalgaların yayılımı Snell kırılma yasası tarafından kontrol edilir. Dalgalar bir arayüzle karşılaştıklarında kırılma ya da yansımaya uğrarlar ve takip ettiği ışın yollarına göre Sismik Kırılma ya da Sismik Yansıma yöntemi adını alırlar. Sismik kırılma yönteminde, kritik açıyla arayüze gelen dalga ara yüzey boyunca hareket eder. Baş dalgaları aynı kritik açıyla yüzeye ulaşır ve yöntemin temelini oluşturur.

Sismik kırılma yöntemi, derin araştırmalarda kullanıldığı gibi yüzeye yakın yeraltı tabakalarının araştırılmasında da kullanılan, veri toplama ve değerlendirme açısından hızlı ve etkili bir yöntemdir. Farklı kaynaklar yardımıyla oluşturulan yapay bir deprem dalgası (titreşim), bir hat boyunca belirli aralıklarla dizilmiş olan alıcılarla (jeofon) bu titreşimlerin kaydedilmesi ve bu kayıtlardan seyahat sürelerinin belirlenmesi yöntemin esasını oluşturur. İlk varış zamanlarının doğru belirlenmesi, sismik verilerden jeolojik modele dönüşümde önemli bir adımdır. Kaydedilen dalgaların ilk varış zamanları okunarak uzaklık-zaman (X-T) grafiği çizilir ve doğrunun eğimlerinden tabakanın dalga hızları (Vp) ve kalınlıkları (H) elde edilir. Elde edilen bu parametreler kullanılarak yeraltının jeolojik yapısının ortaya çıkartılması amaçlanır [1].

Son yıllarda mühendislik jeofiziği uygulamalarında yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Kırık, fay, süreksizlik zonlarının belirlenmesinde, baraj, yol, tünel, demiryolu gibi mühendislik yapılarının inşasında ana kaya derinliğinin belirlenmesinde de önemlidir [2]. Özellikle büyük inşaatların (ör. Barajlar, viyadükler ve gökdelenler gibi) yapımı sırasında ana kayanın derinliğinin tespiti önem kazanmaktadır. Kazı hacminin hesaplanması ve bu örtü tabakasının ortadan kaldırılması önemli problemlerden biridir. Özellikle örtü tabakası kalınlığının çok hatalı hesaplanması inşaat maliyetlerinin artmasına neden olabilmektedir. Elbette ana kaya derinliğinin belirlenmesinde sondaj kuyuları kullanılabilir. Ancak derinlik arttıkça ve sondaj kuyusu sayısı arttıkça inşaat maliyeti artmaktadır.

Sismik kırılma yöntemini uygulamak hızlıdır ve geniş bir alanı kapsayacak bilgi kısa zamanda elde edilebilir. Sismik çalışmaların yapımından sonra belirlenen ve yeteri sayıda sondaj yapılmasının maliyetleri azaltacağı aşikardır. Aynı şekilde sismik kırılma verisinin doğru toplanmaması da değerlendirme aşamasında gerçekçi olmayan yorumlamalara yol açabilir.

Değerlendirme aşamasında ön bilgilerin kullanılması (örneğin alanda var olan kuyu bilgileri), tamamlayıcı jeofizik yöntemlerin sonuçlarından yararlanarak sismik verilerin yorumlanmasındaki belirsizlikleri azaltmak için bazı umut verici stratejilerdir [3].

Hala yaygın olarak kullanılan geleneksel sığ sismik kırılma yorumlama yöntemleri ışın teorisine dayalıdır [4] ve Gecikme Süresi

Yönteminden [5-6] veya Artı-Eksi yönteminden türetilmiştir [7,8]. Bu yöntemler, ilk varışların yalnızca nispeten basit hız dağılımlarına sahip arayüzeylerden gelen kritik kırılmadan kaynaklandığını varsayar [9].

Sismik kırılma verilerinin ters çözümünde, araziden elde edilen veriler kullanılarak model parametreleri (hız ve kalınlık) için yeterli değerlerin tahmin edilmesi ana hedeflerdir. Ters çözüm işleminde tabakalara ait hız ve kalınlıklar doğrudan saptanırsa bu işleme doğrusal ters çözüm denir. Bir başlangıç hız ve kalınlık bilgisinden hareket ederek, teorik olarak üretilen dalganın varış zamanları ile ölçülen dalganın varış zamanları arasındaki uyumun optimum düzeye ulaşmaya kadar parametrelerin değiştirilerek olası yer altı yapısının belirlenmesi işlemine ise doğrusal olmayan ters çözüm işlemi denir [10].

Ters çözümde başlangıç parametrelerin belirlenmesi çok önemlidir. Hatalı başlangıç parametrelerin seçimi, ters çözümde gerçekçi olmayan çözümler elde edilmesine veya gerçekten çok uzak değerler bulunmasına neden olabilir. Jeofizik modellemede ters çözüm yönteminin temelini oluşturacak kuramlar çeşitli araştırmacılar [11-14] tarafından ayrıntılı olarak verilmiştir. Potansiyel alan verilerinin doğası nedeniyle çözüm sonuçları tekil değildir. Potansiyel alanlı yöntemlerde birçok araştırmacı anomaliye neden olan yapıları basit geometrik şekillere (küre, silindir, ince dayk, prizma) benzeterek ters çözüm işlemlerini gerçekleştirmişlerdir [15-17].

Son yıllarda bir problemin ters çözümünde, klasik ters çözüm yöntemleri yerine Meta-sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir. Her geliştirilen algoritmanın temel amacı problemi daha iyi ve daha kısa zamanda çözebilmektir. Bu sezgisel algoritmaların temeli bir arama uzayı belirleyip, çözümleri bu arama uzayı içinde amaç fonksiyona dayalı çözümlerin elde edilmesine dayanmaktadır.

Jeofizik problemlerin çoğunda amaç fonksiyonunun minimum olması temel kabuldür. Sezgisel yöntemlerde optimizasyon işlemi başlangıç çözüm kümesinden başlayarak her adımda yeni bir çözüm kümesinin elde edilmesiyle devam eder ve amaç fonksiyonu minimum olunca çözüm işlemi sonlanır.

Bazı akademisyenler tarafından meta-sezgisel algoritmalar farklı sınıflara ayrılır [18-20]. Hussain [18], 1983-2016 yılları arasında

yayınlanan metasezgisel algoritmaları incelemiş ve bu algoritmaları doğa olaylarından (biyolojik veya fiziksel olaylar) esinlenen ve insan olaylarından esinlenen algoritmalar olmak üzere iki ana kategoriye ayırmıştır. Doğada ilham alan algoritmaları evrim tabanlı [21], fizik tabanlı [22] ve sürü tabanlı [23], yöntemler olmak üzere üç alt kategoride gruplandırılmıştır [24]. İkinci kategorideki algoritmalar ise, insanın sosyal davranışlarından ilham alan algoritmalar [25].

Birinci grupta, genetik algoritma (GA) [26], parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) [27], yarasa algoritması (BA) [28], yapay arı kolonisi (ABC) [29]; diferansiyel evrim algoritması (DE) [30], karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) [31], diferansiyel arama algoritması (DSA) [32]; guguk kuşu arama algoritması (CSA) [33]; simulated annealing (SA) [34]; deniz anası arama algoritması (JS) [20], çiçek tozlaşması (FP) [35], salp optimizasyonu (SO) [36] gibi algoritma isimleri yer alır. İkinci gruptaki algoritmalar ise insan fenomenlerinden ilham alır. Bunlar; uyum arama (HS) [37], havai fişek algoritması (FA) [38], öğrenme tabanlı algoritma öğretimi (TLBA) [39] şeklinde sıralanabilir.

Özel olarak, son yıllarda birçok jeofizik problemin çözümünde meta sezgisel algoritmalar tercih edilmeye başlanmıştır. Kullanılan metasezgisellerin jeofizik yöntemlere uygulanmasına göre sıralamak gerekirse, sismik kırılma verilerin değerlendirilmesinde [40-42], manyetik anomalilerin değerlendirilmesinde [43-48], gravite anomalilerin değerlendirilmesinde [49-52] doğal uçuşma (SP) anomalilerin çözümünde [53,54] ve son olarak da elektrik öz direnç eğrilerinin yorumlanmasındaki [55] kullanımlarına örnek olarak verilebilir.

Bu çalışmada, sismik kırılma verilerinin değerlendirilmesi için Manto Vatozu beslenme optimizasyonuna (MVBO) dayalı bir algoritma önerilmiştir. MVBO algoritması, yeni ve etkili bir optimizasyon algoritmasıdır. Sismik kırılma verilerinin ters çözümünde MVBO algoritması ilk kez bu çalışma kapsamında uygulanmıştır. Önerilen tekniğin etkinliği, iki yapay model üzerinde (gürültülü ve gürültüsüz) ve gerçek arazi sismik kırılma verisi kullanılarak optimize edilmesi yoluyla araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Manta vatozunun beslenme stratejileri, özellikle MVBO algoritmasının içinde bu stratejilerinin nasıl uyarlandığına değinilmektedir. Bu makale

kapsamında, beslenme stratejilerinin matematiksel çok katmanlı sismik modelin parametreleri ve parametrelerden yola çıkarak P dalgasının kaynaktan çıktuktan sonra alıcıya varıncaya kadarki seyahat zamanı bağıntısı sunulmaktadır.

Çalışma kapsamında, MVBO algoritmasının yapay ve arazi sismik kırılma verisinin ters çözümündeki etkinliğinin araştırılması için her bir model parametresine ait yineleme sayısına göre yakınsama grafikleri hazırlanmıştır. Ardından rölatif frekans dağılımları ve %95 güven aralığında olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplanarak yöntemin etkinliği test edilmiştir. Çalışma sonucunda MVBO algoritmasından elde edilen bulgular tartışılarak ulaşılan tüm sonuçlar ortaya konmuştur.

## 2. Materyal ve Metod

Kuramsal uygulamalar kapsamında, Manta vatozu beslenme algoritması önce yapay sismik kırılma veri kümesine (gürültüsüz ve gürültülü) uygulanarak yapay sismik modele ait parametreler elde edilmiştir. Daha sonra arazi verisi olarak, Leylançay baraj sahasında toplanan sismik kırılma veri kümesine uygulanmıştır.

### 2.1. Manta vatozu beslenme algoritması

"Manta" kelimesi, bu canlının dış görünüşünü açıklayan bir tanımlama olup manto ya da pelerin anlamındadır. Manta vatozları kuyruklu ve gövdesi yassı olan deniz canlılarıdır. Genel görünüş itibari ile üçgen yüzgeçleri, mağara gibi ağız, ağzının önünde kürek şeklinde lobları, solungaçlarındaki yarıkları ve iri başları ile kolaylıkla tanınabilir. 5-7 m uzunluğa sahip olup ağırlığı 1,3 tona kadar ulaşabilir. Bu canlılar nefes almak amacıyla ileri doğru hareket ederler ve bu sayede oksijenli suyun solungaçlarından geçmesini sağlar. Bu hareketi sırasında yüzgeçlerini çırparlar ve yüzgeçlerinin hareketleri kanatların hareketlerine benzediği için gökyüzünde uçan kuşlar gibi adete su altında uçar gibi yüzer. Bu vatozların yemek listelerinde krill, karides ve yengeç larvaları yer alır. Bunların yanısıra deniz suyunun içindeki mikroskobik organizmaları yayvan ağız sayesinde süzerek beslenen avcılarıdır.

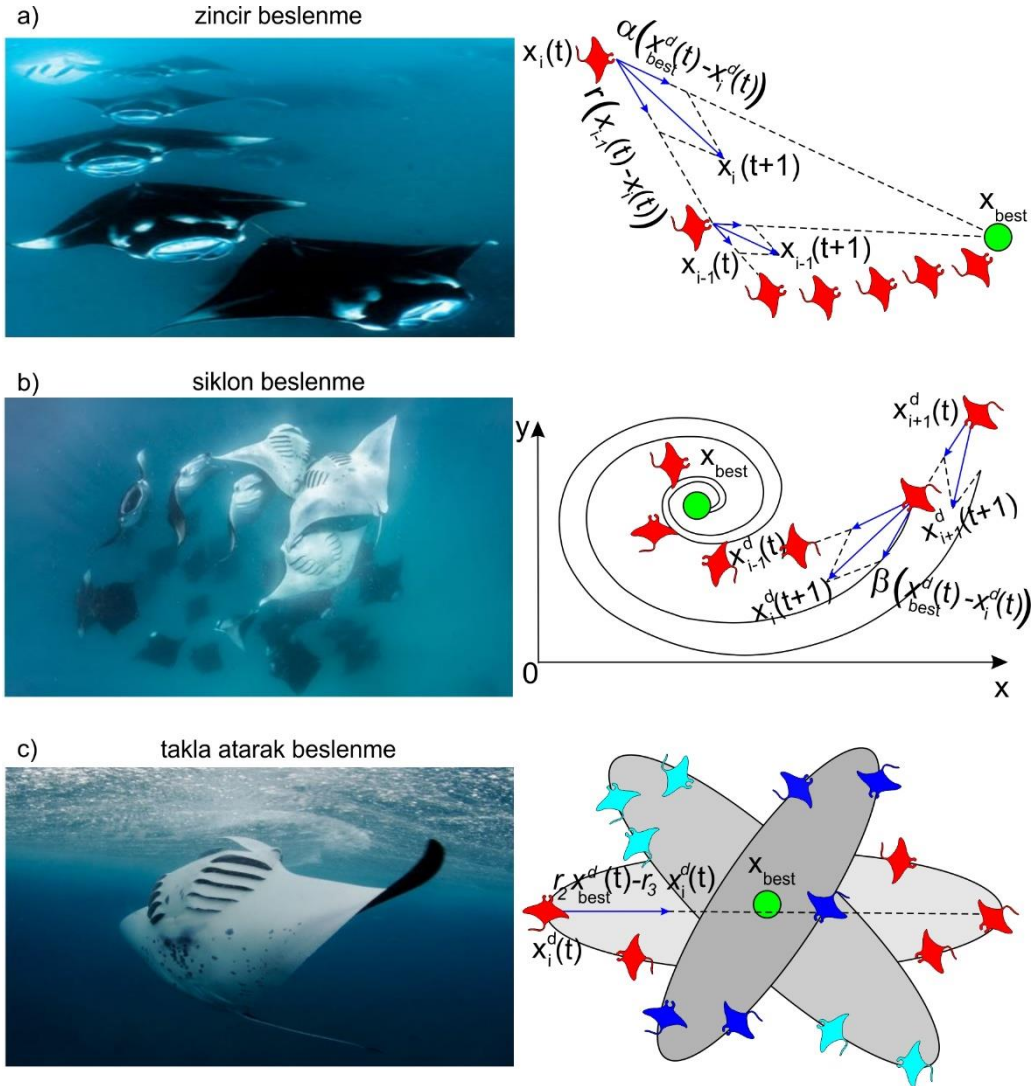
Okyanuslarda yaşayan bu canlılar bir plankton kaynağına ihtiyaç duymaktadırlar. Her zaman bu kaynak okyanusun her yerinde plankton

yoğunluğu eşit oranda olmayıp bir alanda kümelenmiş durumda olabilir. Bu nedenle Manta vatozları, zincir, siklon ve takla atarak beslenme şeklinde listelenebilecek çeşitli stratejiler geliştirmişlerdir [56]. Mantaların bu avlanma taktikleri MVBO algoritmasının geliştirilmesine dayanak olmuştur ve matematiksel alt yapısı izleyen adımlarda aşağıda açıklanmaktadır (Şekil 1).

#### 2.1.1. Zincir halinde beslenme

Tüm canlılar gibi Manta vatozları da hayatta kalabilmek için beslenmek zorundadırlar. Manta vatozları planktonları algılayabilir ve onlara doğru yüzebilirler. Genellikle planktonların daha çok yoğunlaştığı bölgeleri tercih ederler. Avlanma sırasında yüzgeçlerini ağzlarının önünde açarak aynı bölgede ileri geri hareket ederler. Av koşulları bazen avın konsantrasyonuna ve dağılımına bağlı olarak birkaç yüz metreye kadar uzar. Bu sebeple, av verimliliği yüksek daha yoğun plankton alanları arar, tespit ettikten sonra da ilgili alanlara doğru yaklaşırlar. Konum ne kadar iyiye, plankton konsantrasyonu o kadar yüksek olur [57]. Bu durumdan esinlenerek MVBO algoritması plankton konsantrasyonunun yoğun olduğu bölgeyi en iyi çözüm olarak varsaymaktadır. En iyi çözüm bilinmemekle birlikte, MVBO algoritması şimdiye kadar bulunan en iyi çözümün, manta vatozlarının yaklaşmak ve yemek istediği yüksek konsantrasyonlu plankton olduğunu varsaymaktadır.

Avlanma sırasında bir grup vatoz, yatay olarak hareket eden bir çizgi halinde, baştan sona sıralanır ve bir yiyecek arama zinciri oluşturur. Bu grup, büyük beslenme etkinliklerinde 40'tan fazla olacak şekilde genişleyebilir. Manta vatozları baştan kuyruğa doğru sıraya dizilerek bir besin zinciri oluşturur. Bu duruma zincir halinde beslenme denir. Sıranın en başındaki birinci birey dışında sürüdeki diğer tüm manta bireyleri sadece yiyeceğe doğru değil, önündekine de yönelirler. Her yinelemede en iyi çözüme ulaşıldığı ve her bireyin önündeki çözümün değiştirildiği anlamına gelir. Zincir halinde beslenmenin matematiksel modeli aşağıda verilen (1) ve (2) eşitlikleri ile temsil edilir



Şekil 1. Beslenme davranışlarının simülasyon modelleri. a) zincir beslenme, b) Siklon beslenme, c) takla atarak beslenme

Figure 1. Simulation models of foraging behaviors. a) chain foraging, b) cyclone foraging, c) somersault foraging

$$Vx_i^d(t+1) = \begin{cases} x_i^d(t) + r(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)) + \alpha(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)), & i = 1, \\ x_i^d(t) + r(x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \alpha(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)), & i = 2, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = 2. r. \sqrt{|\log(r)|} \quad (2)$$

Burada,  $d$  boyutu,  $t$  zamanı,  $i$  bireyi ve  $x_i^d(t)$  ise  $i$ . bireyin  $t$  anında  $d$ . boyuttaki konumunu ifade etmektedir. Yüksek konsantrasyonlu plankton ise  $x_{best}^d(t)$  ile belirtilmektedir.  $r$  ve  $\alpha$  sırası ile  $[0,1]$  aralığında değişen rastgele bir sayı ve ağırlık katsayısını ifade etmektedirler. Şekil 1a, bu yiyecek arama davranışını 2 boyutlu bir alanda göstermektedir.  $i$ . bireyin konum güncellemesi şimdiki bireyin  $(i-1)$  konumu  $(x_{i-1}^d(t))$  ile avın konumuna  $(x_{best}^d(t))$  göre belirlenmektedir.

### 2.1.2. Siklon beslenme

Bir manta vatoz sürüsü için, bu avlanma türü, sınırlı bir av alanında, plankton açısından aşırı derecede yoğunlaştığında kullanılır. Derin sularda bir plankton yığını tespit edildiğinde,

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_{best}^d(t) + r(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)) + \beta(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)), & i = 1, \\ x_{best}^d(t) + r(x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \beta(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)), & i = 2, \dots, N. \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = 2 \cdot e^{r_1 \frac{T-t+1}{T}} \cdot \sin(2\pi r_1) \quad (4)$$

İlgili eşitliklerde  $T$  maksimum yineleme sayısını,  $\beta$  ağırlık katsayısını ve  $r$   $[0,1]$  aralığında değişen rastgele bir sayıyı temsil etmektedir. Şu ana kadar gelinen aşamada en iyi çözüm kümesine sahip bölge olması durumunda, siklon avlanma taktiği iyi bir sömürü yeteneğine sahiptir. Eğer sürüdeki her bir manta yeni bir konum bulması için zorlanırsa bu avlanma taktiği beslenme kaynağını bulma başarısını arttırmak için de kullanılabilir. Siklon avlanma taktiği temel

$$x_{rand}^d = Lb^d + r(Ub^d - Lb^d) \quad (5)$$

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_{rand}^d(t) + r(x_{rand}^d(t) - x_i^d(t)) + \beta(x_{rand}^d(t) - x_i^d(t)), & i = 1, \\ x_{rand}^d(t) + r(x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \beta(x_{rand}^d(t) - x_i^d(t)), & i = 2, \dots, N. \end{cases} \quad (6)$$

### 2.1.3. Takla atarak beslenme

Bu yiyecek arama davranışında, besin kaynağının bulunduğu konum merkez nokta olarak (pivot) görülür. Her manta bireyi, pivot etrafında ileri geri yüzme hareketi sergiler ve av konsantrasyonu yüksek olduğunda, manta

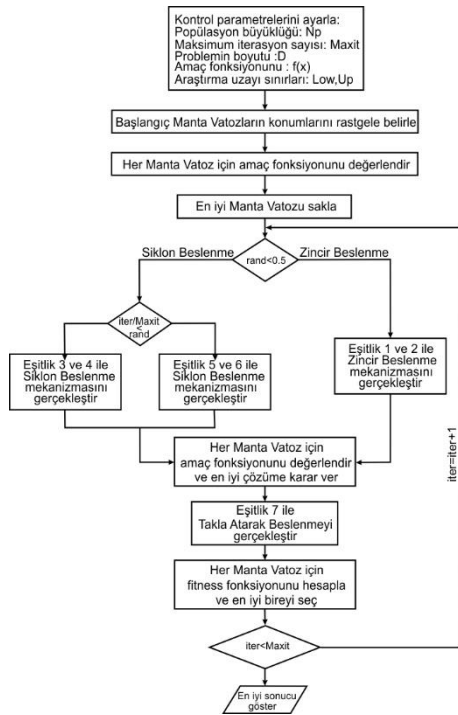
mantaların besleme zincirindeki her bireyi, avını büyük bir beslenme çemberine sürükleyene kadar kendi etrafında döner. Bu çemberin çapı, çembere katılan hayvan sayısı ile orantılıdır ve yaklaşık 15-20 m dir. Siklon tipi hareketle, siklon bir beslenme zinciri oluştururlar ve beslenme kaynağına doğru yaklaşırlar. Bu beslenme kaynağına doğru siklon tipi hareket etmenin yanı sıra, her manta vatoz önündekine doğru yüzer. Yani manta vatozu sürüleri sıra halinde bir sarmal geliştirerek yiyecek arama gerçekleştirir. Mantaların hareketi bir girdap yaratır, bu dönme hareketi avı beslenme çemberinin dışına onlara doğru çeken bir akım yaratır. Siklon yiyecek arama tekniği Şekil 1b'de tanıtılmıştır [56]. Söz konusu bu avlanma taktiği,  $d$  boyutlu bir arama uzayı için matematiksel olarak (3) ve (4) eşitlikleri ile ifade edilmektedir.

olarak kaynak arayışı üzerine yoğunlaşır ve MVBO'nun daha verimli ve geniş bir araştırma bölgesine ulaşmasını sağlar. Bu avlanma taktiğinin matematiksel modeli (5) ve (6) eşitlikleri ile verilmektedir. İlgili eşitliklerde  $x_{rand}^d$  arama uzayı içindeki rastgele üretilen bir konumu,  $Lb^d$  ve  $Up^d$  ise sırasıyla  $d$  boyutlu arama uzayının minimum ve maksimum değerlerini ifade etmektedirler.

vatozları, vücut genişliğinden daha küçük bir çapa sahip bir döngüyü tamamlayarak geriye doğru beslenme taklası gerçekleştirir. Bu hareket genellikle avın hareketini kısıtlamak ve avlanma verimliliğini arttırmak için av yüzeye yakın bir yerde toplandığında gerçekleştirilir.

Takla atarak beslenirken ağızlarını genişçe açarlar ve yüzgeçlerini alt çenelerinin önüne doğru konumlandırırlar. Bu nedenle, konumlarını her zaman şimdiye kadar bulunan en iyi konum etrafında güncellerler. Şekil 1c takla atarak yiyecek arama stratejisini gösteren farklı hareketlerini göstermektedir. Söz konusu olan bu avlanma taktığının matematiksel modeli (7) bağıntısı ile ifade edilmektedir.

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + S \cdot (r_2 \cdot x_{best}^d(t) - r_3 \cdot x_i^d(t)), \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$



Şekil 2. Manta vatozu beslenme optimizasyon algoritması akış şeması ([58]'ten uyarlanmıştır).

Figure 2. Manta ray foraging optimization algorithm flowchart (adapted from [58]).

## 2.2. Sismik kırılma modeli

Snell yasasına göre, ara yüzeye gelen ışın ara yüzeyin normali ile yaptığı açıya ve tabaka hızlarına bağlı olarak ilerler. Eğer gelen dalga ikinci tabakanın normali ile  $90^\circ$  açı yaparak kırılırsa bu durumda kritik kırılma olur.

Burada  $S$ , manta vatozlarının takla aralığına karar veren takla atma faktörünü ( $S = 2$ ),  $r_2$  ve  $r_3$  ise  $[0,1]$  aralığında değişen rastgele sayılardır. Bireysel konum ile o ana kadar bulunan en iyi konum arasındaki mesafe azaldıkça mevcut konumdaki saçılımlar da azalır. Tüm bireyler, arama uzayında kademeli olarak optimal çözüme yaklaşır. Buradan hareketle sismik kırılma verilerinin ters çözümünde kullanılan Manta Vatoz algoritmasına ait akış şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.

Gelen dalganın geliş açısı kritik açıdan küçük olduğu sürece dalga hem ikinci ortama iletilir hem de birinci ortama geri yansır. • Gelen dalganın geliş açısı kritik açıya eşit olduğunda iletilen dalga iki tabaka arasındaki ara yüzeyde yayılır. • Geliş açısı, kritik açıyı aştığında dalga ikinci ortama iletilemez, gelen dalganın tümü birinci ortama geri yansır.

### 2.2.1. Yatay iki tabaka modeli

İki tabakalı yatay bir arayüzeye sahip model için dalganın seyahat zamanı 8 nolu denklem ile ifade edilir.

$$T = \frac{x}{V_2} + t_{0k} \quad (8)$$

$$t_{0k} = \frac{2H \cos \theta_c}{V_1} \quad (9)$$

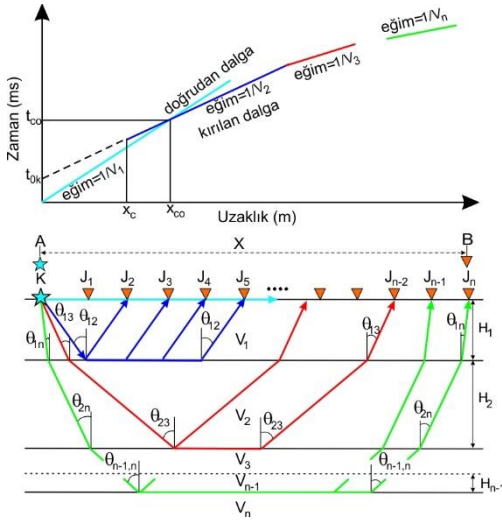
Burada  $\theta_c$  kritik açıyı,  $t_{0k}$  kesme zamanını,  $H$  tabaka kalınlığı ve  $V$  tabaka hızını ifade etmektedir.

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \quad (10)$$

### 2.2.2. Yatay çoklu tabaka modeli

Yatay arayüzeye sahip çoklu tabakalı modeli Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3a ve Şekil 3b sırasıyla gelişigüzel yatay arayüzlere sahip  $n$  sayıda tabakadan oluşan yeraltı modelini ve zaman uzaklık ( $T-X$ ) grafiğini temsil etmektedir. Bu modelde tabakaların homojen ve izotropik olduğu ayrıca tabakalar elastik özelliğe sahip ve sismik hızının derinlikle arttığı varsayımı kabul edilmektedir.

Grafikte gösterildiği gibi, x kaynak ile jeofon arasındaki mesafe,  $V_1$ ,  $V_2$  ve  $V_n$  tabaka hızlarını,  $H_1$ ,  $H_2$  ve  $H_n$  tabaka kalınlıklarını ifade etmektedir.  $X_c$  kırılmanın ilk gözlemlendiği uzaklığı ve  $t_{0k}$  kesme zamanını temsil eder.  $X_{co}$  uzaklığı, kırılarak gelen dalganın doğrudan gelen dalgayı geçtiği konum olarak tanımlanır.



Şekil 3. Yatay refraktör için zaman-uzaklık eğrileri ve ışın yolları.

Figure 3. Traveltime curves and ray paths for horizontal refractor.

Çok tabakalı yatay arayüzlere sahip model için dalganın seyahat zamanı 11 nolu denklem ile ifade edilir.

$$T_n = \frac{x}{V_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2H_i \cos\theta_{in}}{V_i} \quad (11)$$

$$\cos\theta_{in} = \frac{\sqrt{(V_n^2 - V_i^2)}}{V_n} \quad (12)$$

Gözlenen ve hesaplanan ilk varışlar arasındaki farkların toplamının ortalama standart sapması olarak tanımlanan Hata Kareler Ortalamasının Karekökü(RMSE) ise,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (t_{göz} - t_{hes})^2} \quad (13)$$

olarak hesaplanır. Burada M veri sayısını,  $t_{göz}$  ve  $t_{hes}$  ise sırasıyla gözlenen ve hesaplanan ilk varışları temsil etmektedir.

### 3. Kuramsal Çalışmalar

Manta vatoz beslenme algoritmasının sismik kırılma verileri üzerindeki performansını test etmek amacıyla yöntemler öncelikle yapay modellere uygulanmıştır. Bu amaçla yapay sismik modelden hareket ederek P dalgasına ait ilk varışları hesaplanmıştır.

#### 3.1. Üç tabakalı sismik model (Model 1 ve 2)

Çalışma kapsamında üretilen üç tabakalı yer altı modeli için başlangıç modeli için gürültüsüz (Model 1) ve gürültülü (Model 2) olmak üzere 2 ayrı modelde incelenmiştir. Yapay model üretmek amacıyla 120 metrelik serim uzunluğuna sahip bir hat belirlenmiştir (Model 1). Jeofon aralığı ( $\Delta x$ ) 10m ve kaynak ile ilk jeofon arasındaki uzaklık (offset) 10m seçilmiştir. P dalgasının seyahat zamanı (11) bağıntısı kullanılarak ve başlangıç parametreleri olarak  $z_1=8m$ ,  $z_2=20m$ ,  $V_1=300m/sn$ ,  $V_2=750m/sn$  ve  $V_3=1500m/sn$  seçilerek hesaplanmıştır (Şekil 4).

MVBO'nun sismik hız modeli parametrelerini tahmin etmedeki başarısını ölçmek amacıyla hesaplanan P dalgasının ilk varışları MVBO algoritması ile değerlendirilmiştir. Gürültüsüz yapay sismik hız modeline ait parametre kestirim değerleri, gerçek değerleri ve arama uzayının minimum ve maksimum değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bilindiği gibi, sismik kırılma yönteminde inceleme derinliği serim uzunluğunun üçte biri kadar olduğu genel kabulü vardır. Tabaka kalınlıklarına ait arama uzayı sınırları belirlenirken bu varsayımdan faydalanılmıştır. Benzer şekilde tabaka hız değerleri için araştırma uzayı sınırları belirlenirken hızın derinliğe göre artması ilkesinden yararlanılmıştır.

MVBO ters çözümünden sismik model parametreleri (kalınlık ve hız)  $H_1=8,0m$ ,  $H_2=20,0m$ ,  $V_1=300,0m/sn$ ,  $V_2=750,0m/sn$  ve  $V_3=1500,0m/sn$  olarak elde edilmiştir. Yüzde hata değerlerine bakıldığında gürültüsüz veri seti için tüm parametreler için hata değerlerinin hepsinin sıfıra çok yakın olduğu gözlenmektedir. Buna karşılık gürültülü veri seti incelendiğinde ise yüzde hata değerinin dörtten (<%4) küçük olduğu son tabakaya ait hız değeri diğerlerinden büyük olduğu dikkati çekmektedir.



**Tablo 1.** Model 1 için MVBO algoritması ile elde edilen yapay veriye ait parametre değerleri.**Table 1.** Parameter values of the synthetic data obtained with the MRFO algorithm for Model 1.

Model Parametreleri	Gerçek Değerler	Arama Uzayı Sınırları		Parametre Kestirim Değerleri		Yüzde Hata	
		Minimum	Maksimum	Gürültüsüz	Gürültülü	Gürültüsüz	Gürültülü
$H_1 (m)$	8	4	12	8,00	7,77	0,00	2,88
$H_2 (m)$	20	10	30	20,00	20,14	0,00	0,70
$V_1 (m/sn)$	300	150	450	300,0	298,01	0,00	0,66
$V_2 (m/sn)$	750	375	1125	750,00	741,75	0,00	1,10
$V_3 (m/sn)$	1500	750	2250	1500,00	1554,61	0,00	3,64
$RMSE (msn)$	-	-	-	2,670e-04	3,635e+00	-	-

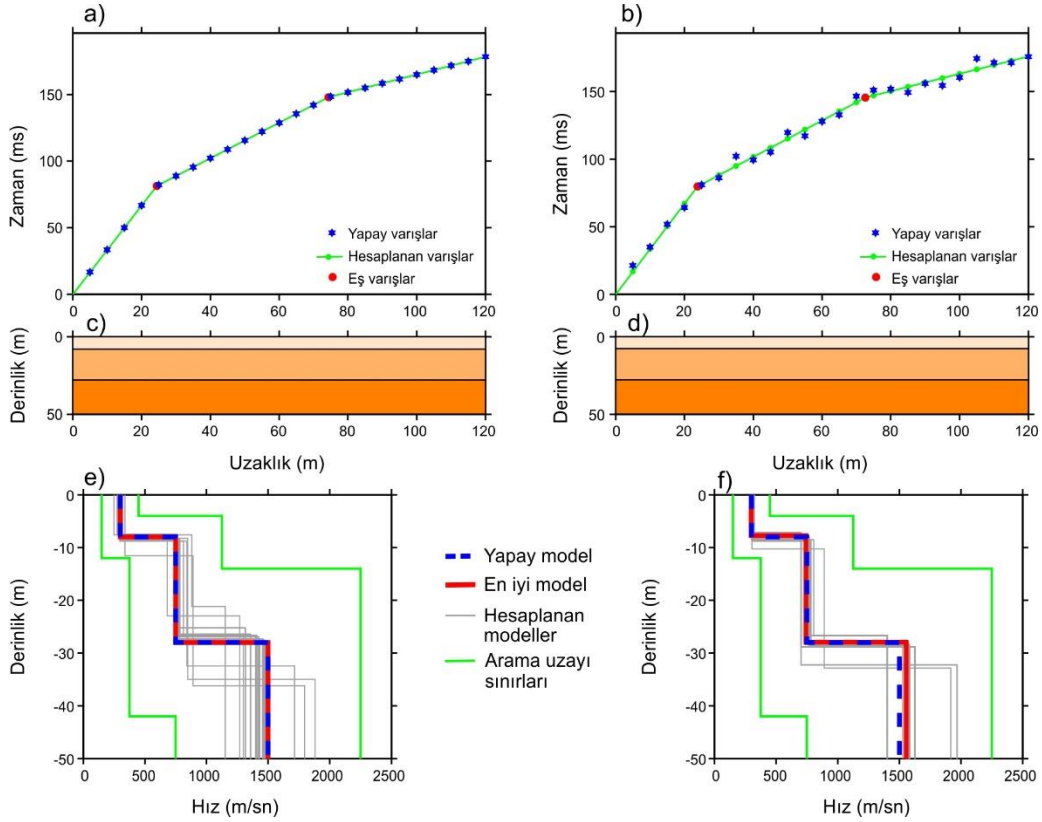
Diğer yöntemlerde olduğu gibi sismik yöntemlerde de gerek arazi verileri toplanırken kayıtların gürültü içerebilmesi gerekse de ilk varışların okunması sırasında okuma hataları nedeniyle veri kalitesinin düşmesi gürültü veri olarak yorumlanabilir.

Yöntemin gürültülü sismik hız modeli parametrelerini tahminindeki başarısını sınamak amacıyla üretilen yapay modele sıfır ortalamalı ve  $\pm 4msn$  standart sapmaya sahip olan normal dağılım gösteren rasgele gürültü eklenerek gürültülü ilk varışlar elde edilmiştir (Şekil 4). Gürültülü yapay sismik hız modeline (Model 2) ait parametre kestirim değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Gürültüsüz ve gürültülü yapay veri setinin MVBO algoritması kullanılarak 150 yineleme sonunda elde edilen ters çözüm sonucu zaman-uzaklık grafiği (Şekil 4a ve 4b), derinlik modeli (Şekil 4c ve 4d) ve derinliğe göre hız modeli değişimi (Şekil 4e ve 4f) Şekil 4 üzerinde gösterilmiştir. Ancak başlangıçta yineleme sayısı için bir test çalışması yapılmıştır. Yineleme sayısı 250

seçilmiş ve yaklaşık 50. yinelemeden sonra parametre değişimlerinin sabitlendiği gözlenmiştir. Bu nedenle bu model çalışmasında yineleme sayısı 150 olarak alınmıştır. RMSE değeri gürültüsüz ve gürültülü yapay veri için sırasıyla  $2,670e-04msn$  ve  $3,635msn$  olarak bulunmuştur. Elde edilen bu bulgu sonucunda çözümün düşük RMSE değerine sahip olması ve algoritmanın gürültüsüz sismik kırılma verilerinin ters çözümünde başarılı sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir.

Grafikler üzerinde yapay ilk varışlar mavi yıldız, hesaplanan ilk varışlar yeşil dairesel çizgi ve eşvarışlar kırmızı daire ile gösterilmiştir. Derinlik modeli turuncunun artan tonları şeklinde hız değişimini ifade etmektedir. Son olarak derinliğe göre hız değişimi grafiğinde kesikli mavi çizgi yapay modeli, kırmızı çizgi hesaplanan en iyi modeli, gri çizgiler farklı yineleme sayılarındaki hız modellerini ve yeşil çizgiler arama uzayı sınırlarını göstermektedir.

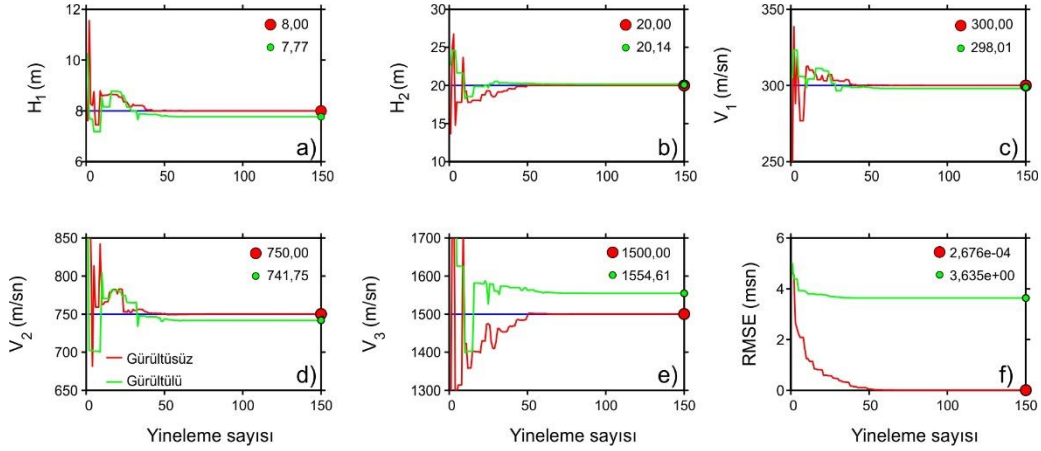


**Şekil 4.** Üç tabakalı bir modelin (Model 1 ve 2) MVBO ile ters çözümü, (sol taraf Model 1, sağ taraf Model 2), a, b) modele ait varış zamanları, c, d) derinlik modeli, e, f) modellenmiş 1 B hız dağılımı.

**Figure 4.** Inversion of a three-layer model (Model 1 and 2) with MRFO, (left side Model 1, right side Model 2), a, b) arrival times of the model, c, d) depth model, e, f) modeled 1D velocity change.

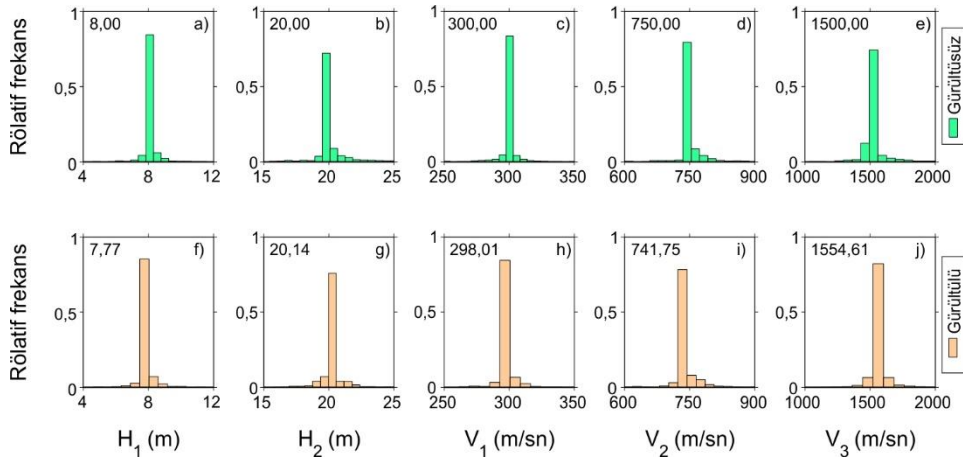
Şekil 5'te, gürültüsüz ve gürültülü yapay veri setinin MVBO ters çözüm algoritması ile elde edilen sismik modelin her bir model parametresi için yineleme sayısına göre yakınsama eğrileri gösterilmiştir. Ayrıca ilgili grafikler üzerinde model parametre kestirim sayısal değerleri gösterilmiş olup parametrelerin gerçek değerleri mavi çizgi, gürültüsüz model parametre kestirimi kırmızı çizgi ve gürültülü model parametre kestirimi yeşil çizgi ile gösterilmiştir. Yaklaşık 50. yinelemeden sonra değişimin sabitlendiği gözlenmektedir. Gürültüsüz ve gürültülü yapay verilerin rölatif frekans dağılımlarının histogram gösterimleri Şekil 6'da verilmiştir.

Her model parametresi için rölatif frekans analizinde 20 bağımsız çalıştırma ve her çalıştırmada 150 yinelemeden elde edilen parametre veri seti kullanılmıştır. Elde edilen sismik model parametrelerinin frekans dağılımları incelendiğinde hem gürültüsüz hem de gürültülü yapay veri setinin tüm parametrelerinde belirgin pikler gözlemlendiğinden ve frekans değerleri hemen hepsinde yaklaşık 0.8'den büyük olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre MVBO algoritmasının yüksek doğruluk ve güvenilirlikte çözüm ürettiği söylenebilir.



**Şekil 5.** (a-e) Kestirim parametrelerinin nesil sayısına göre değişimi (Model 1 and 2), (f) RMSE'nin nesil sayısına göre değişimi.

**Figure 5.** (a-e) Change of estimated parameters according to the number of generations (Model 1 and 2), (f) Change of RMSE by generation number.



**Şekil 6.** (a-e) Kestirim parametrelerinin rölatif frekans dağılımları (Model 1), (f-j) Kestirim parametrelerinin rölatif frekans dağılımları (Model 2).

**Figure 6.** (a-e) Relative frequency distributions of estimated parameters (Model 1), (f-j) Relative frequency distributions of estimated parameters (Model 2).

Gürültüsüz ve gürültülü yapay veri seti kullanılarak yapılan çözümlerin istatistiksel değerlendirilmesi Tablo 2'te verilmektedir. Bu aşamada 20 ayrı bağımsız çalıştırma uygulanmış ve uygulama sonunda elde edilen çözümler içinden en iyi sismik model çözümündeki her bir parametre için MVBO'dan elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonları %95 güven aralığında hesaplanmıştır. Tablo 2'de her bir parametre için ortalama değer ve güven aralığı sınırlarıyla

birlikte en iyi parametre değeri yer almaktadır. Parametrelere ait güven aralık değerleri çok küçük olduğundan sanki eşitmiş gibi gözükmemektedir. MVBO'nun parametre çözümlerinin verilen güven aralıkları içinde kaldığını açıkça göstermektedir. Gürültüsüz sismik kırılma veri seti için olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları incelendiğinde her bir parametreye için elde edilen en iyi sonuçların oldukça dar bir aralıkta değiştiği görülmektedir.

Ancak bu sonuçlar tabloda iki basamaklı fonksiyonu sonuçları incelendiğinde benzer gösterildiğinden değişim yokmuş gibi şekilde her bir parametre değerinin güven algılanabilir. Buna karşın gürültülü sismik aralığı içinde kaldığı görülmektedir. kırılma veri seti için olasılık yoğunluk

**Tablo 2.** Model 1 ve 2 için MVBO algoritması ile 20 bağımsız çözümden elde edilen en iyi çözümlerin %95 güven aralığı için OYF değerleri.

**Table 2.** PDF values for 95% confidence interval of the best solutions obtained from 20 independent solutions with the MRFO algorithm for Models 1 and 2.

Model Parametreleri	Gerçek Değerler	Gürültüsüz veri				Gürültülü veri			
		Güven aralığına ait				Güven aralığına ait			
		En iyi	Ortalama	Alt sınır	Üst sınır	En iyi	Ortalama	Alt sınır	Üst sınır
H <sub>1</sub> (m)	8	8,00	8,00	8,00	8,00	7,77	7,77	7,77	7,77
H <sub>2</sub> (m)	20	20,00	20,00	20,00	20,00	20,14	20,14	20,14	20,14
V <sub>1</sub> (m/sn)	300	300,00	300,00	300,00	300,00	298,01	298,00	298,00	298,01
V <sub>2</sub> (m/sn)	750	750,00	750,00	750,00	750,00	741,75	741,75	741,75	741,75
V <sub>3</sub> (m/sn)	1500	1500,00	1500,00	1500,00	1500,00	1554,61	1554,61	1554,61	1554,62

### 3.1. Beş tabakalı sismik model (Model 3 ve 4)

Beş tabakalı yapay sismik model üretmek amacıyla Model 1'de tanımlanmış olan serim uzunluğu, jeofon aralığı ve offset gibi parametre değerleri aynen kullanılmıştır (Model 3). P dalgasının seyahat zamanı hesabı için verilen 11 bağıntısı kullanılarak  $H_1=3m$ ,  $H_2=6m$ ,  $H_3=11m$ ,  $H_4=12m$ ,  $V_1=250m/sn$ ,  $V_2=500m/sn$ ,  $V_3=750m/sn$ ,  $V_4=1100m/sn$  ve  $V_5=1500m/sn$  için hesaplanmış olup zaman-uzaklık grafiği Şekil 7'de gösterilmiştir. Benzer şekilde beş

tabakalı sismik hız modeli üzerinde yöntemin başarısını ölçmek amacıyla hesaplanan P dalgasının ilk varışları MVBO algoritması ile değerlendirilmiştir. Yöntemin gürültülü sismik hız modeli parametrelerini tahminindeki başarısını sınamak amacıyla yapay model üretilmiştir (Model 4). Yapay modele sıfır ortalamalı ve  $\pm 4msn$  standart sapmaya sahip olan normal dağılım gösteren rastgele sayı [42] eklenerek oluşturulmuştur (Şekil 7). Gerçek değerler ile arama uzayının minimum ve maksimum değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

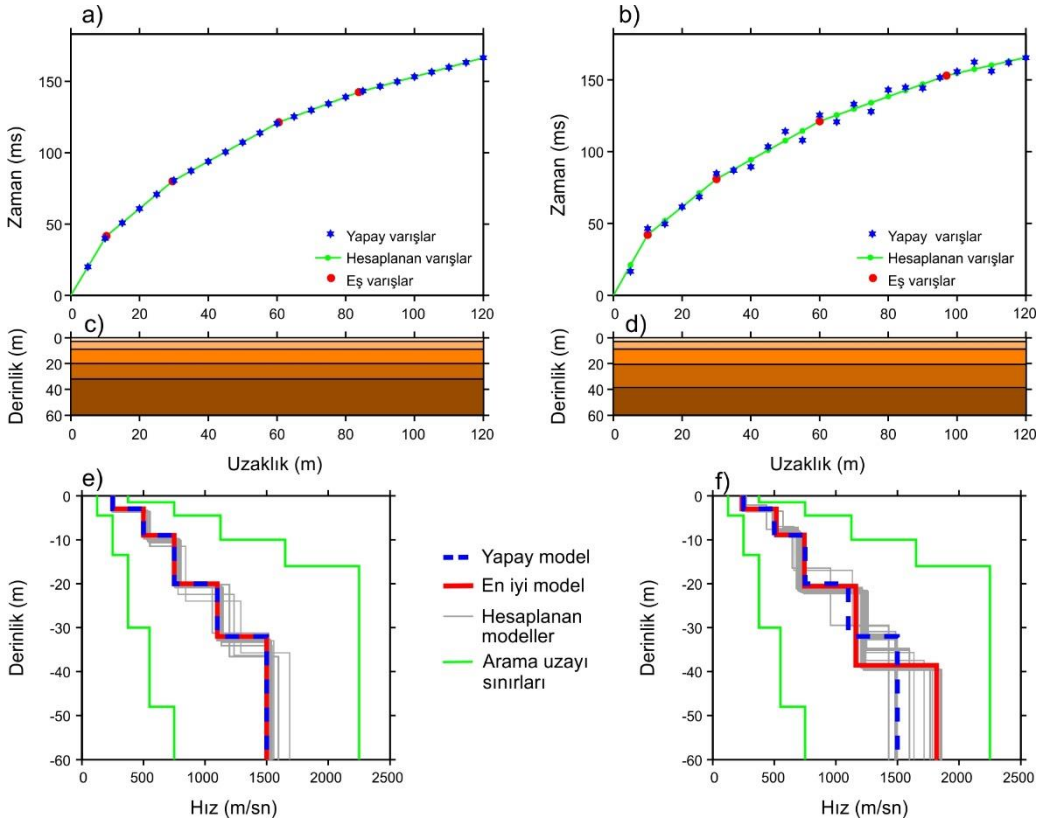
**Tablo 3.** Model 3 ve 4 için MVBO algoritması ile elde edilen yapay veriye ait parametre değerleri.

**Table 3.** Parameter values of the synthetic data obtained with the MRFO algorithm for Models 3 and 4.

Model Parametreleri	Gerçek Değerler	Arama Uzayı Sınırları		Parametre Kestirim Değerleri		Yüzde Hata	
		Minimum	Maksimum	Gürültüsüz	Gürültülü	Gürültüsüz	Gürültülü
H <sub>1</sub> (m)	3	1,5	4,5	3,00	3,04	0,00	1,33
H <sub>2</sub> (m)	6	3,0	9,0	6,00	5,84	0,00	2,67
H <sub>3</sub> (m)	11	5,5	16,5	11,00	11,69	0,00	6,27
H <sub>4</sub> (m)	12	6,0	18,0	12,00	18,00	0,00	50,00
V <sub>1</sub> (m/sn)	250	125,0	375,0	250,00	237,18	0,00	5,13
V <sub>2</sub> (m/sn)	500	250,0	750,0	499,98	516,61	~0,00	3,32
V <sub>3</sub> (m/sn)	750	375,0	1125,0	750,02	745,48	~0,00	0,60
V <sub>4</sub> (m/sn)	1100	550,0	1650,0	1100,09	1160,21	0,01	5,47
V <sub>5</sub> (m/sn)	1500	750,0	2250,0	1499,87	1816,81	0,01	21,12
RMSE (msn)	-	-	-	5,330e-04	3,990e+00		

Gürültüsüz ve gürültülü yapay verinin MVBO ters çözüm algoritması kullanılarak 250 yinleme sonunda elde edilen ters çözüm bulduları zaman-uzaklık grafiği (Şekil 7a ve 7b), derinlik modeli (Şekil 7c ve 7d) ile derinliğe göre hız modeli değişimi (Şekil 7e ve 7f) Şekil 7 üzerinde gösterilmiştir. RMSE değeri gürültüsüz ve gürültülü yapay veri için sırasıyla 5,330e-04msn ve 3,990msn olarak elde edilmiştir. Bu düşük RMSE değeri de ters çözüm algoritmasının gürültüsüz sismik kırılma verilerinin ters çözümünde kayda değer sonuçlar sağladığını göstermiştir.

Grafikler üzerinde yapay ilk varışlar mavi yıldız, hesaplanan ilk varışlar yeşil dairesel çizgi ve eşvarışlar kırmızı daire ile gösterilmiştir. Derinlik modeli turuncunun artan tonları şeklinde hız değişimini ifade etmektedir. Son olarak derinliğe göre hız değişimi grafiğinde kesikli mavi çizgi yapay modeli, kırmızı çizgi hesaplanan en iyi modeli, gri çizgiler farklı yinlemelerdeki hız modellerini ve yeşil çizgiler arama uzayı sınırlarını göstermektedir.

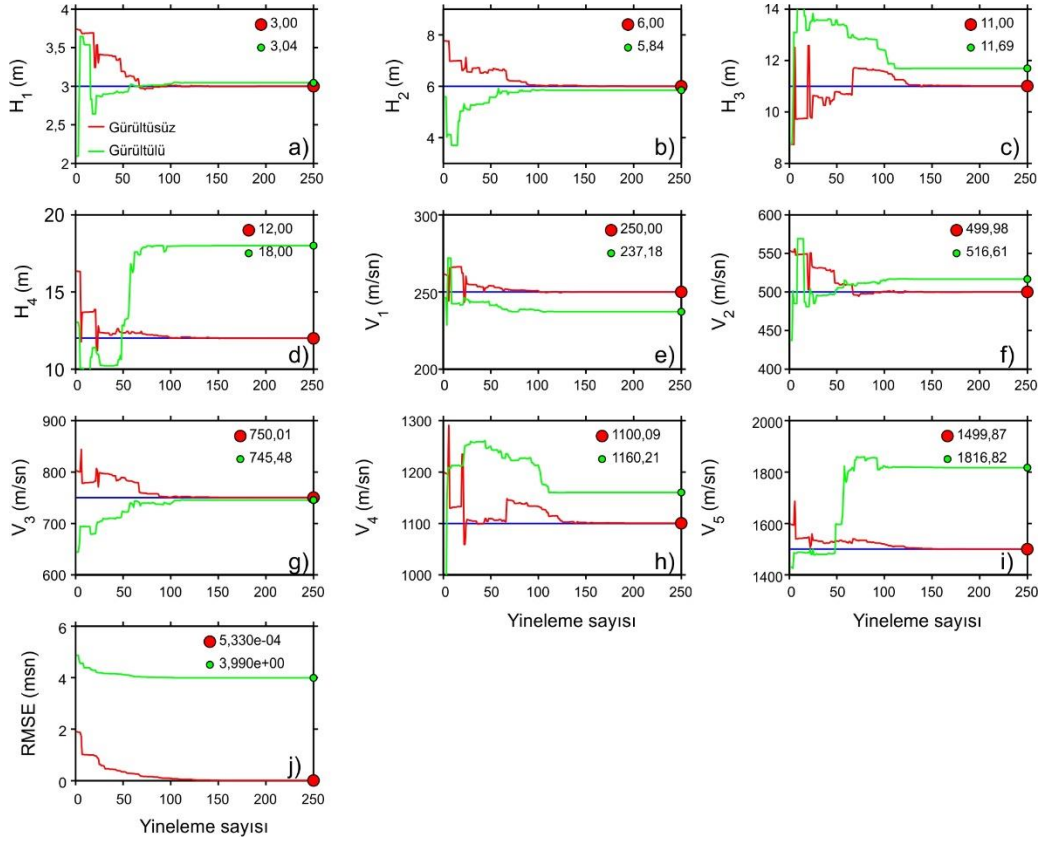


Şekil 7. Beş tabakalı modelin MVBO ile ters çözümü, (sol taraf Model 3, sağ taraf Model 4), a, b) modele ait varış zamanları, c, d) derinlik modeli, e, f) modellenmiş 1 B hız dağılımı.

Figure 7. Inversion of a five-layer model with MRFO, (left side Model 3, right side Model 4), a, b) arrival times of the model, c, d) depth model, e, f) modeled 1D velocity change.

Şekil 8'te, gürültüsüz ve gürültülü yapay veri setinin MVBO ters çözüm algoritması ile elde edilen sismik modelin her bir model parametresi için yinleme sayısına göre yakınsama eğrileri gösterilmiştir. Ayrıca ilgili grafikler üzerinde model parametre kestirim sayısal değerleri gösterilmiş olup parametrelerin gerçek değerleri mavi çizgi, gürültüsüz model parametre

kestirimi kırmızı çizgi ve gürültülü model parametre kestirimi yeşil çizgi ile gösterilmiştir. Yaklaşık 100. yinlemeden sonra değişimin sabitlendiği gözlenmektedir. Gürültüsüz ve gürültülü yapay verilerin rölatif frekans dağılımlarının histogram gösterimleri Şekil 9'da ve Şekil 10'da verilmiştir.



**Şekil 8.** (a-i) Model parametrelerinin nesil sayısına göre değişimi (Model 3 ve 4), (j) RMSE'nin nesil sayısına göre değişimi.

**Figure 8.** (a-i) Change of model parameters according to the number of generations (Model 3 and 4), (j) Change of RMSE by generation number.

Her model parametresi için frekans dağılımı 20 bağımsız çalıştırma için gerçekleştirilmiştir. Her bağımsız çalıştırmada 250 yinelemede ters çözüm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bulunan model parametrelerinin frekans dağılımları incelendiğinde, gürültüsüz veri seti için tüm parametrelerde belirgin bir pik gözlenirken gürültülü yapay veri seti için MVBO algoritmasının hemen hemen hepsinde belirgin pik verirken sadece son tabakaya ait kalınlık ve hız parametresinin frekans dağılımın daha yaygın dağılım sergilediği görülmektedir.

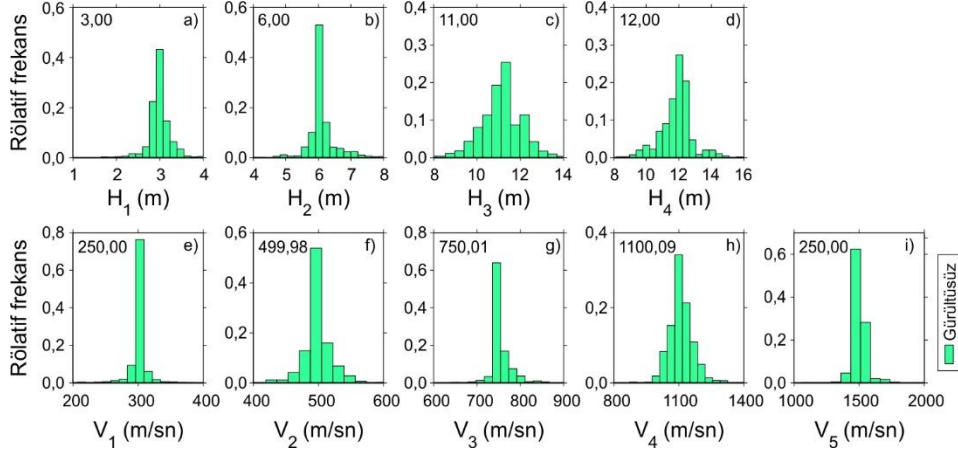
Tablo 4'te gürültü içermeyen ve gürültü içeren yapay veri seti kullanılarak yapılan çözümlerin istatistiksel değerlendirilmesi sunulmaktadır. Bu aşamada 20 ayrı bağımsız çalıştırma gerçekleştirilmiş ve içlerindeki en iyi sismik

model çözümüne ait her bir parametre için MVBO'dan elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonları %95 güven aralığında hesaplanmıştır. Tablo 4'te her bir parametre için ortalama değer ve güven aralığı sınırlarıyla birlikte en iyi parametre değeri yer almaktadır. MVBO'nun parametre çözümlerinin verilen güven aralıkları içinde kaldığını açıkça göstermektedir.

Gürültüsüz sismik kırılma veri seti için olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları incelendiğinde sismik modeldeki her bir parametreye ait en iyi çözüm sonuçlarının alt ve üst sınırlarının birbirine olduğu görülmektedir.

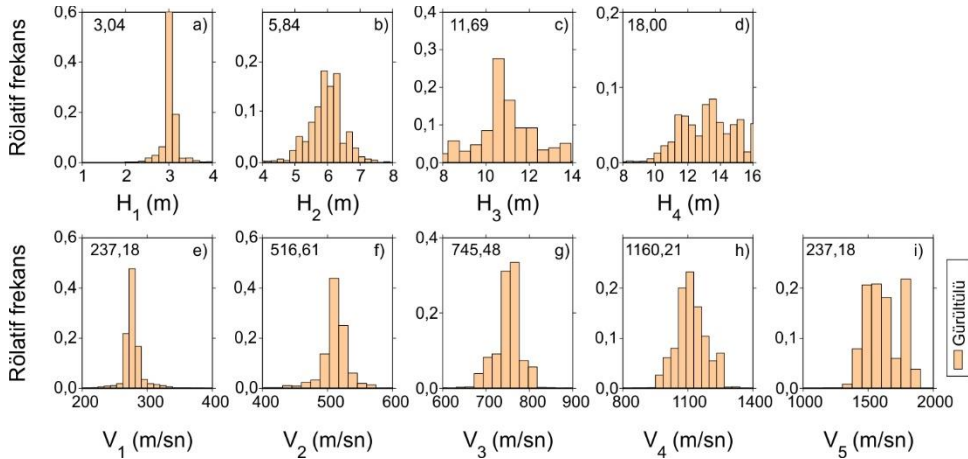
Buna karşın gürültülü sismik kırılma veri seti için olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları incelendiğinde 4. ve 5. tabakaya ait hız

değerlerinin güven aralığı dışında kalırken geriye kalan diğer tüm parametre değerleri güven aralığı içinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca gürültüsüz veri setine oranla biraz daha geniş aralıkta değiştiği görülmektedir.



Şekil 9. (a-i) Kestirim parametrelerinin rölatif frekans dağılımları (Model 3).

Figure 9. (a-i) Relative frequency distributions of estimated parameters (Model 3).



Şekil 10. (a-i) Kestirim parametrelerinin rölatif frekans dağılımları (Model 4).

Figure 10. (a-i) Relative frequency distributions of estimated parameters (Model 4).

**Tablo 4.** Model 3 ve 4 için MVBO algoritması ile 20 bağımsız çözümden elde edilen en iyi çözümlerin %95 güven aralığı için OYF değerleri.

**Table 4.** PDF values for 95% confidence interval of the best solutions obtained from 20 independent solutions with the MRFO algorithm for Model 3 and 4.

Model Parametreleri	Gerçek Değerler	Gürültüsüz veri				Gürültülü veri			
		Güven aralığına ait				Güven aralığına ait			
		En iyi	Ortalama	Alt sınır	Üst sınır	En iyi	Ortalama	Alt sınır	Üst sınır
$H_1$ (m)	3	3,00	3,00	3,00	3,00	3,04	3,03	3,01	3,05
$H_2$ (m)	6	6,00	6,00	6,00	6,00	5,84	5,87	5,73	6,02
$H_3$ (m)	11	11,00	10,99	10,99	11,01	11,69	10,89	10,39	11,40
$H_4$ (m)	12	12,00	11,99	11,99	12,01	18,00	17,13	16,56	17,69
$V_1$ (m/sn)	250	250,00	249,99	249,99	250,01	237,18	237,85	237,99	238,66
$V_2$ (m/sn)	500	499,83	499,70	499,70	499,97	516,61	514,14	510,12	517,66
$V_3$ (m/sn)	750	750,00	749,95	749,95	750,05	745,48	746,15	737,12	755,18
$V_4$ (m/sn)	1100	1100,05	1099,57	1099,57	1100,53	1160,21	1116,34	1089,75	1142,92
$V_5$ (m/sn)	1500	1500,09	1499,80	1499,80	1500,38	1816,82	1755,14	1719,81	1790,48

### 3.3. Arazi verisi

MVBO ters çözüm tekniğinin arazi verisi için başarısının test edilmesi amacıyla İran'ın Doğu Azerbaycan eyaleti Malekan ilçesinde bulunan Leylanchay baraj sahasında toplanmış olan gerçek sismik kırılma veri kümesi kullanılmıştır.

Baraj yeri, doymamış ve suya doymuş alüvyonlar ve ince tabakalı şeyl ile dolomit olmak üzere üç farklı katmandan oluşmaktadır. Kalınlığı maksimum 24m olan alüvyon tabakalar kil, konsolide olmayan çakıl, silt ve kum içerir [42].

Bu verinin değerlendirilmesinde daha önce JS algoritması kullanılmış ve çalışma alanının alüvyon derinliği belirlenmiştir (42). Bu çalışmada, makalede yer alan iki sismik profile (düz ve ters atış) ait zaman-uzaklık grafiklerinden jeofon aralığı 2,5m olmak üzere P dalgalarının ilk gelişleri sayısallaştırılmıştır (Şekil 11).

Yeraltı hız modelini tahmin etmek için, gözlemlenen seyahat süreleri MVBO ters çözüm tekniği tarafından işlemek için kullanıldı. Gözlemlenen zaman-uzaklık eğrilerine dayalı

olarak, gözlemlenen verilerin ters çözümü için üç katmanlı bir model düşünülmüştür.

Aynı profil üzerinde gerçekleştirilen düz atış için gözlemlenen P dalgasına ait ilk varışları ve bu ilk varışlar kullanılarak elde edilen MVBO'dan elde edilen hesaplanmış ilk varışlar Şekil 11a'da görülmektedir. Benzer şekilde ters atış için gözlemlenen ilk varışlar ile MVBO'dan elde edilen hesaplanmış ilk varışlar Şekil 11b'de gösterilmektedir.

Sismik model parametreleri için arama uzayının minimum ve maksimum değerleri ile MVBO ters çözümünden elde edilen parametre kestirimleri Tablo 5'te verilmiştir.

Düz atış için sismik model parametreleri  $H_1=5,11m$ ,  $H_2=14,94m$ ,  $V_1=487,58m/sn$ ,  $V_2=1582,37m/sn$  ve  $V_3=3221,84m/sn$  olarak elde edilmiştir.

Ters atış için ise sismik model parametreleri  $H_1=4,32m$ ,  $H_2=20,53m$ ,  $V_1=366,68m/sn$ ,  $V_2=1685,90m/sn$  ve  $V_3=5035,66m/sn$  olarak elde edilmiştir.



**Tablo 5.** Düz ve ters atış için MVBO algoritması ile elde edilen arazi verisine ait parametre değerleri.

**Table 5.** Parameter values of the true data obtained with the MRFO algorithm for forward and reverse shots.

Model Parametreleri	Arama Uzayı Sınırları		Parametre Kestirim Değerleri		
	Minimum	Maksimum	Düz atış	Ters atış	Ortalama
$H_1 (m)$	2,5	7,5	5,11	4,32	4,72
$H_2 (m)$	9,0	27,0	14,94	20,53	17,74
$V_1 (m/sn)$	250,0	750,0	487,58	366,68	434,60
$V_2 (m/sn)$	750,0	2250,0	1582,37	1685,90	1633,68
$V_3 (m/sn)$	1750,0	5250,0	3221,84	5035,66	4128,75
$RMSE (msn)$	-	-	0,513	1,216	

Baraj sahasına ait veri setinin MVBO algoritması ile çözümüne başlamadan önce yineleme sayısı 250 seçilerek bir test çalışması yapılmıştır. Ancak model parametrelerinin değişiminin yine yaklaşık 50. yinelemeden sonra sabitlendiği gözlenmiştir. Buradan hareketle yineleme sayısı 150 olarak alınmış ve MVBO algoritmasının çözüm sonuçları Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekil üzerinde zaman-uzaklık grafiği (Şekil 11a ve 11b), derinlik modeli (Şekil 11c ve 11d) ile derinliğe göre hız modeli değişimi (Şekil 11e ve 11f) verilmektedir. RMSE değeri düz atış ve ters atış veri seti için sırasıyla 0,513msn ve 1,216msn olarak bulunmuştur. RMSE değerinin düşük olması algoritmanın gürültüsüz sismik kırılma verilerinin ters çözümünde başarılı sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

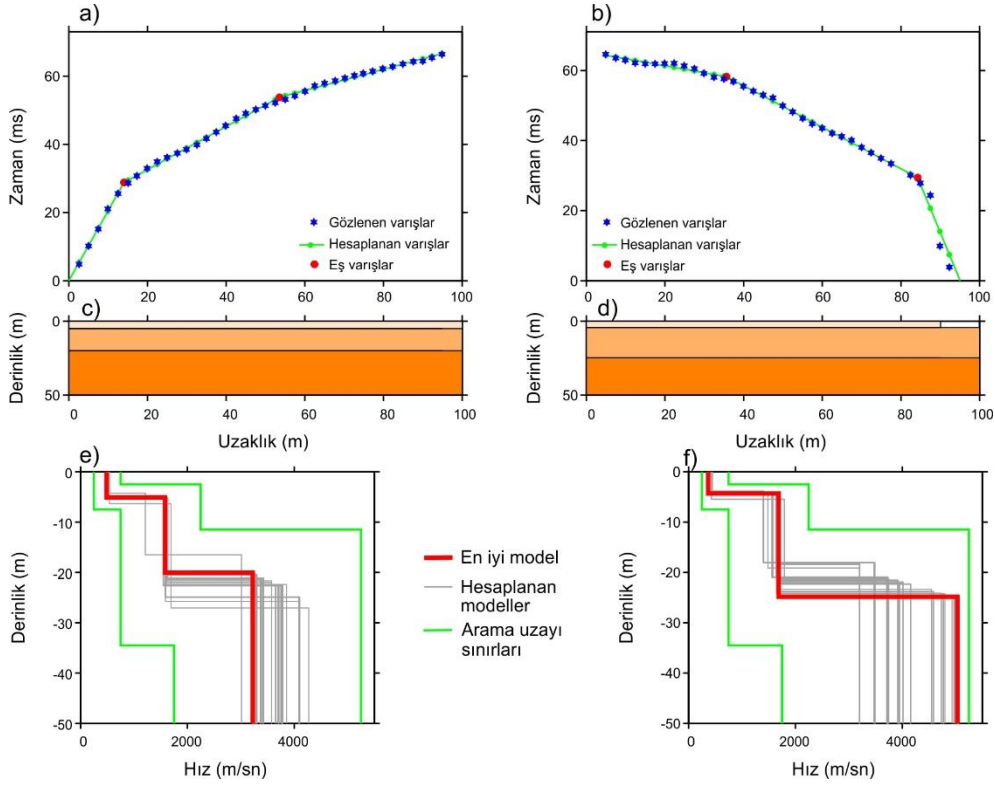
Grafikler üzerinde gözlenen ilk varışlar mavi yıldız, hesaplanan ilk varışlar yeşil dairesel çizgi ve eş varışlar kırmızı daire ile gösterilmiştir. Derinlik modelinde turuncunun artan tonları hız değişimiyle doğru orantılı olacak şekilde değişmektedir. Son olarak derinliğe göre hız değişimi grafiğinde kırmızı çizgi hesaplanan en

iyi modeli, gri çizgiler farklı yinelemelerdeki hız modellerini ve yeşil çizgiler arama uzayı sınırlarını göstermektedir.

Şekil 12'de, düz atış ve ters atış sismik kırılma verinin MVBO algoritması ile ters çözümünde elde edilen sismik modelin her bir model parametresi için yineleme sayısına göre yakınsama grafikleri gösterilmiştir. Grafikler üzerinde düz atış için sismik model parametre kestirimi kırmızı çizgi ve ters atış için sismik model parametre kestirimi yeşil çizgi ile sismik modellerin parametre kestirim değerleri ise grafik üzerinde gösterilmiştir.

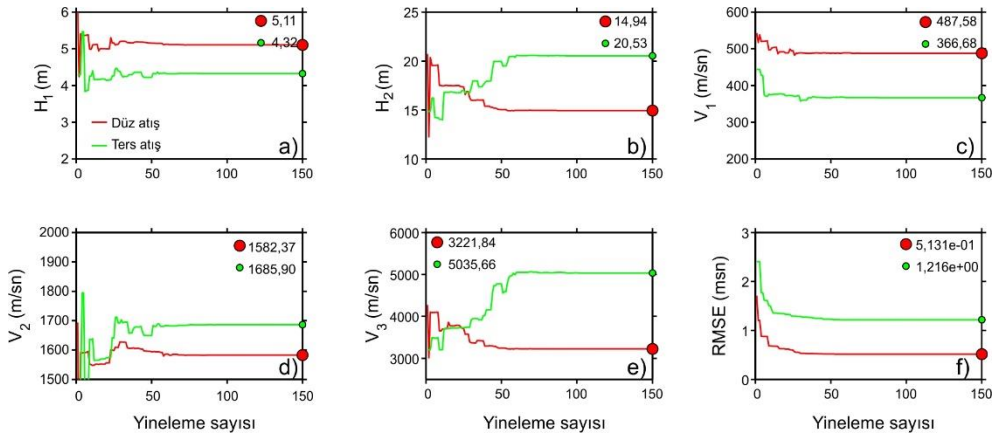
Yaklaşık 50. yinelemeden sonra değişimin sabitlendiği gözlenmektedir. Rölatif frekans dağılımı analizi sonucunda düz atış ve ters atış için sismik kırılma verilerin rölatif frekans dağılımları Şekil 13'de gösterilmektedir.

Elde edilen sismik model parametrelerinin frekans dağılımları incelendiğinde hem düz atış hem de ters atış veri seti için MVBO algoritmasının kabul edilebilir doğrulukta çözüm ürettiği görülmektedir.



**Şekil 11.** Arazi verisinin MVBO ile ters çözümü, (sol taraf düz atış, sağ taraf ters atış), a, b) varış zamanları, c, d) derinlik modeli, e, f) modellenmiş 1 B hız dağılımı.

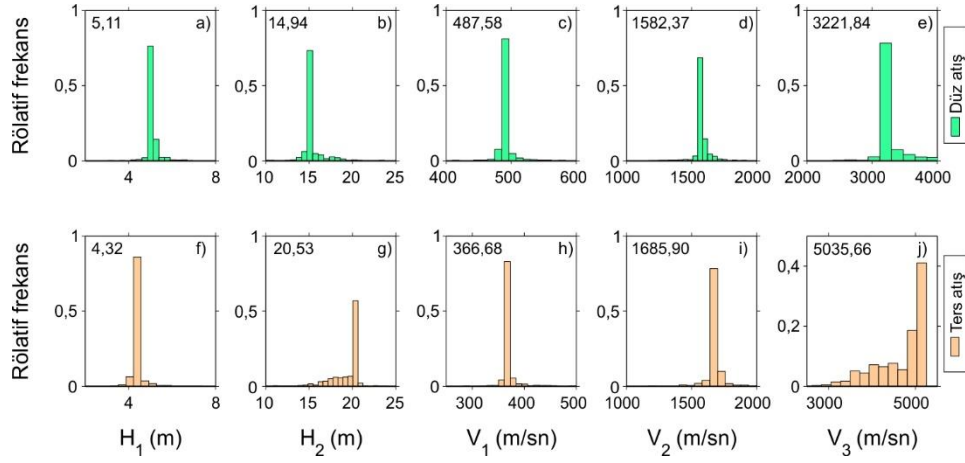
**Figure 11.** Inversion of true data with MRFO, (left side forward shot, right side reverse shot), a, b) arrival times, c, d) depth model, e, f) modeled 1D velocity change.



**Şekil 12.** (a-e) Kestirim parametrelerinin nesil sayısına göre değişimi (düz ve ters atış), (f) RMSE'nin nesil sayısına göre değişimi.

**Figure 12.** (a-e) Change of model parameters according to the number of generations (forward and reverse shots), (f) Change of RMSE by generation number.

DEÜ FMD 25(75), 701-724, 2023



**Şekil 13.** Kestirim parametrelerinin rölatif frekans dağılımları, a-e) düz atış, f-j) ters atış

**Figure 13.** Relative frequency distributions of estimated parameters, a-e) forward shot, f-j) reverse shot

Tablo 6’te düz atış ve ters atış veri seti kullanılarak yapılan çözümlerin istatistiksel değerlendirilmesi verilmektedir. Arazi verisi için de 20 ayrı bağımsız çalıştırma uygulanmıştır. Çözümler içindeki en iyi çözüme ait sismik modelin her bir parametresine ait MVBO’dan elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonları %95 güven aralığında hesaplanmıştır. Tablo 6’te her bir parametre için ortalama değer ve güven aralığı sınırlarıyla birlikte en iyi parametre değeri yer almaktadır. MVBO’nun parametre çözümlerinin verilen güven aralıkları içinde

kaldığını açıkça göstermektedir. Düz atış için sismik kırılma veri seti için olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları incelendiğinde her bir parametreye ait en iyi çözümlerin alt ve üst sınırları birbirine yakın olup dar bir aralıkta değişim görülmektedir.

Benzer şekilde ters atış sismik kırılma veri seti için olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları incelendiğinde her bir sismik model parametre değerinin güven aralığı içinde kaldığı görülmektedir.

**Tablo 6.** Düz ve ters atış için MVBO algoritması ile 20 bağımsız çözümde elde edilen en iyi çözümlerin %95 güven aralığı için OYF değerleri.

**Table 6.** PDF values for 95% confidence interval of the best solutions obtained from 20 independent solutions with the MRFO algorithm for forward and reverse shots.

Model Parametreleri	Düz atış				Ters atış			
	En iyi	Ortalama	Güven aralığına ait		En iyi	Ortalama	Güven aralığına ait	
			Alt sınır	Üst sınır			Alt sınır	Üst sınır
$H_1$ (m)	5,11	5,11	5,11	5,11	4,32	4,32	4,32	4,32
$H_2$ (m)	14,94	14,94	14,94	14,94	20,53	20,53	20,53	20,53
$V_1$ (m/sn)	487,58	487,58	487,58	487,59	366,68	366,68	366,67	366,68
$V_2$ (m/sn)	1582,37	1582,37	1582,36	1582,37	1685,90	1685,90	1685,90	1685,91
$V_3$ (m/sn)	3221,84	3221,84	3221,83	3221,84	5035,66	5035,69	5035,65	5035,74

#### 4. Bulgular

Yapay modeller ve arazi verisi üzerindeki MVBO ters çözüm yönteminin etkinliği önceki bölümlerde irdelenmiş olup burada arazi verisinin mevcut çözümleri ile önceki literatür çalışmaları karşılaştırılmaktadır. Arazi uygulaması için gözlemsel veriden yola çıkarak üç tabakalı sismik model kullanılmıştır.

Ters çözüm sonucunda, birinci tabakanın (doymuş alüvyon) kalınlığı 4,72m,  $V_p$  hız değeri 434,60m/sn ile ikinci tabakanın (doymamış alüvyon) kalınlığı 17,74m,  $V_p$  hız değeri 1633,68m/sn elde edilmiştir. Son olarak üçüncü tabaka için 22,46m derinlikte yer alan  $V_p$  değeri

4128,75m/sn olan ana kaya tespit edilmiştir. Ayrıca ana kayanın üzerinde yer alan alüvyon tabaka doymuş ve doymuş olmayan alüvyon olarak iki tabaka belirlenmiştir. Elde edilen bulgular ile önceki literatür çalışmalarında farklı yöntemlerle elde edilen sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Bu arazi verisi daha önce Poormirzaee [42] tarafından deniz anası algoritması ile Rostami ve Sharghi [59] tarafından sismik tomografi çözüm tekniği kullanılarak yapılan değerlendirme sonuçları ile bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı.

**Tablo 7.** Leylanchay baraj sahasına ait sismik kırılma verisinin MVBO algoritması ile elde edilen parametre değerleri.

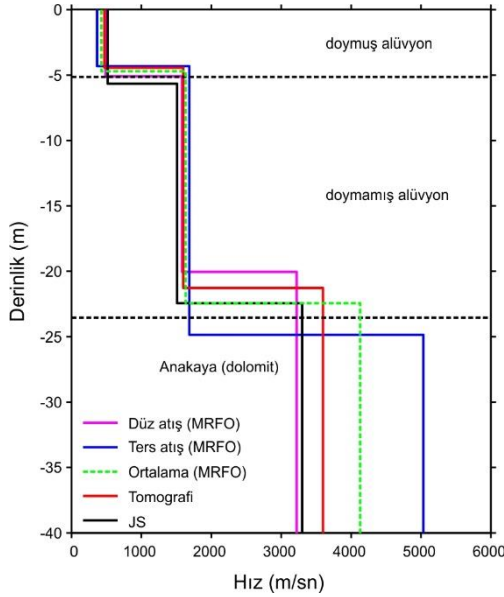
**Table 7.** Parameter values estimated by MVBO algorithm of seismic refraction data of Leylanchay dam site.

Model Parametreleri	Önceki Çalışmalar		Mevcut Çalışma		
	Deniz anası algoritması	Tomografi çözümü	Düz atış	Ters atış	Ortalama
$H_1$ (m)	5,7	4,4	5,11	4,32	4,72
$H_2$ (m)	16,8	16,9	14,94	20,53	17,74
$V_1$ (m/sn)	520,0	471,0	487,58	366,68	434,60
$V_2$ (m/sn)	1550,0	1599,0	1582,37	1685,90	1633,68
$V_3$ (m/sn)	3400,0	3598,0	3221,84	5035,66	4128,75
RMSE (msn)	-	-	0,513	1,216	

Deniz anası algoritma sonuçları, doymuş ve doymamış tabakaların kalınlığı sırasıyla yaklaşık 5,7m ve 16,8m olarak hesaplanmış ve buradan ana kayanın derinliği yaklaşık 22,5m olarak elde edilmiştir. Ayrıca, doymuş, doymamış katmanlar ve ana kaya için  $V_p$ 'nin sırasıyla yaklaşık 520m/s, 1550m/s ve 3400m/s olarak elde etmiştir (42).

Ayrıca Rostami ve Sharghi [59] tarafından gerçekleştirilen tomografi yorumlama yöntemiyle türetilmiş modellerle karşılaştırıldı. Tomografi sonuçları, ana kaya derinliğinin yaklaşık 21,3m ve ana kayadaki  $V_p$ 'nin yaklaşık 3600m/sn olduğunu göstermektedir. Yöntemlerin çözüm sonuçlarından elde edilen 1B hız dağılımı Şekil 14'de gösterilmektedir.

Stratigrafik sondaj verilerine göre, 24m derinlikte dolomitik bir ana kaya üzerinde doymuş ve doymuş olmayan katmanlar bulunmaktadır.



**Şekil 14.** Baraj sahasının derinliğe göre 1B hız değişimi

**Figure 14.** 1D velocity change of dam site according to depth

## 5. Tartışma ve Sonuç

Sismik kırılma yöntemi yüzeye yakın yeraltı katmanlarını belirlemek için maliyet açısından ucuz ve arazide veri toplamasının hızlı olması nedeniyle uygun bir yöntemdir. Özellikle alüvyon ile ana kaya sınırının belirlenmesinde ve ana kaya derinliğinin bulunmasında etkili bir yöntemdir.

Sismik kırılma verisinin geleneksel değerlendirme yöntemleri yerine kırılma verisinin MVBO ters çözüm algoritması sunulmaktadır. Kullanılan bu yaklaşım ilk önce çok katmanlı yapay sismik modeller üzerinde, gürültülü ve gürültüsüz veri seti üzerinde test edildi. Model 1 ve Model 2 için sırasıyla 150 ve 250 yinleme uygulanmış ve manta sayısı sismik model parametre sayısının on katı alınmıştır. Elde edilen bulgular, önerilen algoritmanın gürültüsüz yapay sismik modellerin ters çözümündeki etkinliğinin yanısıra verinin gürültü içermesi durumunda bile yöntemin etkinliği açısından kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermektedir.

Daha sonra gerçek arazi verisi kullanılmıştır. Değerlendirme sırasında veri setinden yola çıkarak üç tabakalı sismik model olarak kabul

edilmiş olup verinin ters çözümü için 150 itersasyon uygulanmıştır. Yöntem bir baraj alanında ana kaya derinliğinin belirlenmesi amacıyla toplanan sismik kırılma veri setine uygulanmıştır.

Literatürde bu veri tomografi çözümü ve deniz anası optimizasyon algoritması ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen MVBO ters çözüm sonuçları diğer iki çözüm ile karşılaştırıldığında deniz anası algoritmasına oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen MVBO'dan elde edilen ana kayanın tahmini derinliği önceki literatürlerde baraj yeri için yapılmış olan jeoteknik ve jeolojik çalışmalarla uyumludur.

Hem gürültüsüz hem de gürültülü veri setinin ters çözümü sonucunda hesaplanan parametre değerlerinin gerçek model parametre değerlerine yakın çıktığı gözlenmiştir. Aynı zamanda rölatif frekans dağılımlarında belirgin pikler elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen parametrelerin çözüm kümesi olasılık yoğunluk fonksiyonu ile test edilmiş olup sonuçların güven aralığı içinde kaldığı belirlenmiştir. Bu bulgulara dayanarak algoritmanın 1B hız modelini ortaya çıkarmada iyi bir performans sergilediğinin göstergesidir. Aynı şekilde arazi verisinin değerlendirme sonuçlarının sondaj verileri ile uyumlu olması da yöntemin etkinliğinin bir göstergesidir.

Sonuç olarak bu çalışma, sismik modele ait kırılma verisinin ters çözümünde MVBO yönteminin parametre kestiriminde güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Özellikle mühendislik çalışmalarında ana kay derinliğinin belirlenmesi çalışmalarından kullanılması önerilmektedir.

## 6. Discussion and Conclusion

The seismic refraction method is a convenient method for identifying underground layers near the surface because it is inexpensive in terms of cost and rapid data collection in the field. It is an effective method especially for determining the boundary between alluvium and bedrock and finding the bedrock depth.

Instead of traditional evaluation methods of seismic refraction data, MRFO inversion algorithm of refraction data is presented. This approach was first tested on multi-layered synthetic seismic models, on a noisy and noise-free data set. 150 and 250 iterations were applied for Models 1 and 2, and Models 3 and 4,

respectively, and the manta number was taken as ten times the number of seismic model parameters. The findings show that solutions obtained via the proposed algorithm are within acceptable limits in terms of the efficiency of the method, even when the data contains noise, as well as the effectiveness of the inversion of noise-free theoretical seismic models.

Then, real field data were used. During the evaluation, it was accepted as a three-layer seismic model based on the data set and 150 iterations were applied for the inversion of the data. The method was applied to the seismic refraction dataset collected in order to determine the bedrock depth in a dam site.

In the literature, this data were evaluated with a tomography solution and jellyfish optimization algorithm. When the MVBO inversion results obtained from this study are compared with the other two solutions, results very close to the jellyfish algorithm were obtained.

The estimated depth of the bedrock obtained from the MRFO obtained as a result of the study is in agreement with the geotechnical and geological studies for the dam site in the previous literature.

As a result of the inversion of both noise-free and noisy data sets, it was observed that the **Teşekkür**

Yazar makaleye katkı sağlayan ve geliştiren hakemlere teşekkür eder. Yazar ayrıca MRFO kodu için Dr. Weiguo Zhao'ya teşekkür eder.

#### Acknowledgment

The author would like to thank the referees who contributed and improved the article. The author also thanks Dr. Weiguo Zhao for the MRFO code.

#### Kaynakça

- [1] Kearey, P., Brooks M., Hill I. 2002. An introduction to geophysical exploration. Wiley, Oxford
- [2] Öztürk, K. 1993. Prospeksiyon Jeofiziği (Sismik), İstanbul Üniversitesi yayını,17, 165s.
- [3] Poormirzaee, R., Fister, I.Jr. 2021. Model-based inversion of Rayleigh wave dispersion curves via linear and nonlinear methods. Pure Appl Geophys 178(2):341-358. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02665-7>
- [4] Cerveny, V., and Ravindra, R. 1971. Theory of Seismic Head Waves: Toronto Press, 296p.
- [5] Barry, K.M. 1967. Delay-time and its application to refraction profile interpretation: in Musgrave, A.W. (ed.), Seismic Refraction Prospecting: Society of Exploration Geophysicists, 348-361.
- [6] Redpath, B. 1973. Seismic refraction for engineering site investigation: Explosives Excavation Research Lab., TR E-73-4, 51p.
- [7] Hawkins, L.V. 1961. The Reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations: Geophysics, 26, 806-819.
- [8] Hagedoorn, J.G. 1959. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections: Geophysical Prospecting, 7, 158-182.
- [9] Whiteley, R.J., 2004. Shallow seismic refraction interpretation with visual interactive raytracing (VIRT): Exploration Geophysics, 35, 116-123.
- [10] Yas, T., Aşçı, M. 2017. Doğal kaynaklı potansiyel alanlarının birleşik ters çözümü. Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi, Cilt: 16, No: 1,27-50.
- [11] Backus, G.E., Gilbert, J.F.A. 1967. Numerical application of formalism for geophysical inverse problems, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 13, pp. 24-279.
- [12] Backus, G.E., Gilbert, J.F.A. 1968. The resolving power of gross earth data, Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 16, pp. 169-205.
- [13] Jackson, D.D. 1972. Interpretation of Anaccurate, Insufficient and Inconsistent Data, Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol. 28, pp. 97-109.
- [14] Wiggins, R.A. 1972. The General Linear Inverse Problem: Implication of Surface Waves and Free Oscillations for Earth Structure, Rev.Geophysics and Space Physics, Vol. 10, pp. 251, 285.
- [15] Rao, D.A., Ram Babu, H.V., Raju, D.V, 1985. Inversion of Gravity and Magnetic Anomalies Over Some Bodies of Simple Geometric Shape, Pure and Applied Geophysics, Vol. 123, No. 2, pp. 239-249.

calculated parameter values were close to the real model parameter values. At the same time, significant peaks were obtained in the relative frequency distributions. In addition, the solution set of the obtained parameters was tested with the probability density function and it was determined that the results remained within the confidence interval. Based on these findings, it is an indication that the algorithm performs well in revealing the 1D velocity model. Likewise, the compatibility of the evaluation results of the field data with the drilling data is an indicator of the effectiveness of the method.

As a result, this study revealed that the MRFO method can be used reliably in parameter estimation in an inversion of the refraction data of the seismic model. It is recommended to be used especially in engineering studies to determine the depth of the bedrock.

#### 7. 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”

- [16] Murthy, I.V.R., Krishnamacharyulu, S.K.G. 1990. A FORTRAN 77 Program to Invert Gravity Anomalies of Sheet-Like Bodies, *Computers & Geosciences*, Vol. 16, No. 7, pp. 991–1001.
- [17] Raju, D.V.Ch. 2003. LIMAT: A Computer Program for Least-Squares Inversion of Magnetic Anomalies Over Long Tabular Bodies, *Computers&Geosciences*, Vol. 29, No. 1, pp. 91-98.
- [18] Hussain, K., Mohd Salleh, M.N., Cheng, S., Shi, Y. 2019. Metaheuristic research: a comprehensive survey. *Artif Intell Rev* 52(4):2191–2233. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9605-z>
- [19] Gabis, A.B., Meraihi, Y., Mirjalili, S.A., Cherif, A.R.A. 2021. Comprehensive survey of sine cosine algorithm: variants and applications. *Artif Intell Rev* 54:5469–5540
- [20] Chou JS, Truong DN (2021) A novel metaheuristic optimizer inspired by behavior of jellyfish in ocean. *Appl Math Comput* 389. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125535>
- [21] Slowik, A., Kwasnicka, H. 2020. Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems. *Neural Comput & Applic* 32, 12363–12379. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04832-8>
- [22] Can, U., Alataş, B. 2015. Physics-Based Metaheuristic Algorithms for Global Optimization. *American Journal of Information Science and Computer Engineering*. Vol. 1, No. 3, 2015, pp. 94-106
- [23] Krause, J., Cordeiro, J., Parpinelli, R.S., Lopes, H.S. 2013. 7 - A Survey of Swarm Algorithms Applied to Discrete Optimization Problems, *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation, Theory and Applications*. Pages 169-191. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405163-8.00007-7>.
- [24] Zhao, W., Wang, L., Zhang, Z. 2019. Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem, *Knowledge-Based Systems*, Volume 163, 283-304. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.08.030>.
- [25] Askari, Q., Younas, I., Saeed, M. 2020. Political optimizer: a novel socio-inspired meta-heuristic for global optimization, *Knowl. Based Syst.* 195, 105709.
- [26] Holland, J.H. 1992. *Genetic algorithms*, Sci. Am. 267 66–73.
- [27] Kennedy, J., Eberhart, R. 1995. *Particle Swarm Optimization*, IEEE, Piscataway, NJ, United States, 1995, pp. 1942–1948.
- [28] Yang, X.S. Firefly algorithms for multimodal optimization, in: O. Watanabe, T. Zeugmann (Eds.), *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 169–178.
- [29] Karaboğa, D., Basturk, B., 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *J. Glob. Optim.* 39, 459–471.
- [30] Storn, R., Price, K.V., 1995. Differential evolution — a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Report TR-95-012. International Computer Science Institute, Berkeley.
- [31] Dorigo, M, Blum, C. 2005. Ant colony optimization theory: A survey, *Theoretical Computer Science*, 344, 2–3, 243-278, <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2005.05.020>.
- [32] Civicioglu, P. 2012. Transforming geocentric cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm; *Comput. Geosci.*, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.12.011>.
- [33] Yang, X.S., Deb, S., 2009. Cuckoo search via Lévy flights. In: *IEEE World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC)*; Coimbatore, India, pp. 210-214.
- [34] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>.
- [35] Yang, X.S. 2012. Flower pollination algorithm for global optimization. In: Durand-Lose J, Jonoska N (eds) *Unconventional computation and natural computation*. UCNC 2012. Lecture notes in computer science, vol 7445. Springer, Berlin. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7_27)
- [36] Mirjalili, S., Gandomi, A.H., Mirjalili, S.Z., Saremi, S., Faris, H., Mirjalili, S.M. 2017. Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems. *Adv Eng Softw* 114:163–191. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.07.002>
- [37] Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan, G.V. 2001. A new heuristic optimization algorithm. *Harmony Search Simul* 76(2):60–68. <https://doi.org/10.1177/003754970107600201>
- [38] Tan, Y., Zhu, Y. 2010. Fireworks algorithm for optimization. *Lecture notes in computer science (including Subser Lect Notes Artif Intell Lect Notes Bioinformatics)*. Springer, Berlin, pp 355–364
- [39] Rao, R.V., Savsani, V.J., Vakharia, D.P. 2011. Teaching-learning based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Comput Des* 43(3):303–315. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015>
- [40] Poormirzaee, R., Moghadam, R.H., Zarean, A. 2015. Inversion seismic refraction data using particle swarm optimization: a case study of Tabriz, Iran. *Arab J Geosci.* 8:5981–5989. DOI 10.1007/s12517-014-1662-x
- [41] Poormirzaee, R., Sarmady, S., Sharghi, Y. 2019. A new inversion method using a modified bat algorithm for analysis of seismic refraction data in dam site investigation. *J Environ Eng Geophys* 24(2):201–214
- [42] Poormirzaee, R. 2022. Seismic refraction data inversion via jellyfish search algorithm for bedrock characterization in dam sites. *SN Appl. Sci.* 4, 288. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05171-0>
- [43] 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*, 136, 372–386. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.10.040.
- [44] Kaftan, I. 2017. Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm. *Acta Geophys.* 65 (4), 627–634. DOI: 10.1007/s11600-017-0060-7.
- [45] 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.

- [46] 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
- [47] Özyalın, Ş. 2022. Interpretation of volcanic magnetic anomalies using differential search algorithm: case study from the Kula volcanic park, western Türkiye. *Acta Geophys.* <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00975-5>
- [48] Ai, H., Essa, K.S., Ekinci, Y.L. et al. 2022. Magnetic anomaly inversion through the novel barnacles mating optimization algorithm. *Sci Rep* 12, 22578 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26265-0>
- [49] 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*, 129:133-147. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.040>.
- [50] 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. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28909-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28909-6_7)
- [51] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç. & Göktürkler, G. 2021. Backtracking Search Optimization: A Novel Global Optimization Algorithm for the Inversion of Gravity Anomalies. *Pure Appl. Geophys.* 178, 4507–4527. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02855-3>
- [52] 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), 923–944. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa492>
- [53] Turan-Karaođlan, S., Göktürkler, G. 2021. Cuckoo Search Algorithm for model parameter estimation from self-potential data, *Journal of Applied Geophysics*, 194, 104461. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104461>.
- [54] 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* 78 (3), WB3–WB15. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0233.1>.
- [55] Shaw, R., Srivastava, S., 2007. Particle swarm optimization: a new tool to invert geophysical data. *Geophysics* 72 (2), F75–F83. <https://doi.org/10.1190/1.2432481>.
- [56] Zhao, W., Zhang, Z., Wang, L. 2020. Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87,103300, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103300>.
- [57] Stevens, G.M.W. 2016. Conservation and Population Ecology of Manta Rays in the Maldives. Ph.D. Thesis, University of York, York, UK, 2016.
- [58] Turgut, O.E. 2021. A novel chaotic manta-ray foraging optimization algorithm for thermo-economic design optimization of an air-fin cooler. *SN Appl. Sci.* 3, 3 <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04013-1>
- [59] Rostami, S., Sharghi, Y. 2018. Determination of Alluvium thickness in LeylanChai dam site using refraction seismic method. In: 18<sup>th</sup> Iranian geophysics conference, pp 482–485