



Sisam/Samos Adası Depremine ait Konum Bilgilerinin Parçacık Sürü Optimizasyonu Yöntemi ile Belirlenmesi

Determination of the Location Information of the Sisam/Samos Island Earthquake by Particle Swarm Optimization Method

Şenol Özyalın ^{1*}

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: senol.ozyalin@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 27.12.2021

Kabul Tarihi / Accepted: 12.01.2022

Atıf şekli/ How to cite: ÖZYALIN, Ş. (2022). Sisam/Samos Adası Depremine ait Konum Bilgilerinin Parçacık Sürü Optimizasyonu Yöntemi ile Belirlenmesi. DEUFMD, 24(71), 613-630.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247125

Öz

Bu çalışmada, rastlantısal veri tabanına sahip meta-sezgisel algoritmalar içinde yer alan Parçacık Sürü Optimizasyonunun (PSO) bir depremin konumunun belirleme çalışmalarında kullanılması irdelenmiştir. Bu algoritmanın hem sentetik deprem modeli hem de gerçek bir depremin konum belirleme çözümlerinde uygulanabilirliği ve etkinliği gösterilmiştir. Gürültüsüz ve gürültü içeren sentetik deprem modelinin konum belirleme başarıları ile değerlendirilmiştir. Hem sentetik deprem modeli hem de gerçek depremin konum belirleme sonuçlarının olasılık yoğunluk fonksiyonları hesaplanarak elde edilen kestirim parametre değerlerinin güven aralığı içinde kaldığını göstermiştir. Ayrıca enlem-boylam, enlem-derinlik ve boylam-derinlik için üretilen hata enerjisi haritaları hazırlanarak çözüm sonuçları irdelenmiştir. Yöntem, Ege Denizi içinde Samos fayı üzerinde meydana gelen depremin 39 adet sismik istasyonda kaydedilen P ve S dalgalarının varış zamanları kullanılarak konum belirleme çalışması yapılmıştır. Bu deprem çeşitli sismolojik merkezlerince çözümü yapılmış olup, sadece Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından açıklanan sonuçları ile karşılaştırılarak, yüzde bağıl hata oranları ile birlikte konumlar arasındaki uzaklıkları belirlenmiştir. PSO çözümünden parametre kestirim sonuçları enlem, boylam ve odak derinliği sırasıyla 37,827°, 26,650° ve 16,544 km'dir. AFAD tarafından belirlenen merkez üssü ve odak derinliği değerleri ile PSO çözümüyle elde edilen değerler karşılaştırıldığında enleme göre birbirlerinden olan uzaklık binde bir hata ile 5,26 km, boylamda binde iki hata ile 6,0 km ve derinlikte ise yüzde 1 hata ile 1,64 km elde edilmiştir. Son olarak iki merkez üssü arasındaki uzaklık farkı 7,98 km elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Parçacık Sürü Optimizasyonu, merkez üssü, odak derinliği

Abstract

In this study, the use of Particle Swarm Optimization (PSO), which is one of the meta-heuristic algorithms with a random database, in the determination of the location of an earthquake is examined. The applicability and effectiveness of this algorithm in both the synthetic earthquake model and the location determination solutions of a real earthquake have been demonstrated. The position determination of the noiseless and noise-containing synthetic earthquake model has been successfully evaluated. It has been shown that the estimation parameter values obtained by

calculating the probability density functions of the location determination results of both the synthetic earthquake model and the real earthquake remain within the confidence interval. In addition, error energy maps produced for latitude-longitude, latitude-depth and longitude-depth were prepared and the solution results were examined. The method was used to determine the location of the earthquake that occurred on the Samos fault in the Aegean Sea by using the arrival times of the P and S waves recorded at 39 seismic stations. This earthquake was solved by various seismological centers, and the distances between the locations were determined, along with the percentage error rates, by comparing only the results announced by the Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD). The parameter estimation results from the PSO solution are latitude, longitude, and focal depth 37,827°, 26,650° and 16,544 km, respectively. When the epicenter and focal depth values determined by AFAD are compared with the values obtained with the PSO solution, the distance from each other with respect to latitude is 5,26 km with an error of one thousand, 6,0 km with an error of two per thousand in longitude and 1,64 km with an error of 1 percent in depth. Finally, the distance difference between the two epicenters was 7,98 km.

Keywords: Particle Swarm Optimization, epicenter, depth of focus

1. Giriş

Bir problemin çözümünde, bu problemi hangi yöntemin daha iyi ve daha kısa zamanda çözebileceği sorgulaması geçmişten günümüze kadar bilim insanlarının ortak amacı olmuştur. Bu temel amaca ulaşmak için gerek klasik ters çözüm yöntemleri gerekse de daha sonra geliştirilen optimizasyon algoritmaları problemlerin çözümü için vazgeçilmez yöntemler olmuştur. Optimizasyon terimi, bir problemde belirli koşullar altında mümkün olan alternatifler içinden en iyisini seçme işlemidir.

Son yıllarda Meta-sezgisel algoritmalar en iyinin bulunmasında popüler hale gelmiştir. Günümüzde bir çok optimizasyon probleminde kullanılmaktadır. Bu terim Yunanca "meta" kelimesi ile "heuristic" kelimesinin birleşiminden meydana gelmektedir. Bu sezgisel yaklaşımlar, arama uzayında bir mantık zinciri içinde olasılığa dayalı çözümler gerçekleştirir. Başlangıç bir çözüm kümesinden yola çıkarak her adımda yeni bir çözüm kümesinin üretilmesine dayanır. Çözüm kümesi içinde uygunluk fonksiyonu (maksimum veya minimum yapmak) kontrol edilerek en uygun çözüme ulaşılmaya çalışılır. Bu uygunluk fonksiyonu problemden probleme farklılık gösterebilir. Örneğin bir fabrikadaki amaç üretimi arttırmak ise maksimuma optimizasyon yapmayı gerektirirken, fabrikadaki üretim süresini azaltmak minimuma optimizasyon gerektirir.

Optimizasyon problemleri için birçok sezgisel algoritma önerilmiştir. Sezgisel optimizasyon

algoritmaları sürü tabanlı, biyoloji, fizik, sosyal, müzik ve kimya tabanlı olmak üzere farklı gruplara ayrıştırılabilir.

Sürü zekâsı tabanlı optimizasyon algoritmaları kuş, arı, böcek, balık ve kurt gibi sürü halinde yaşayan canlıların hareketlerinin incelenmesiyle geliştirilmiştir. Başlıca sürü algoritmaları Parçacık Sürü Optimizasyonu, Karınca Koloni Optimizasyonu, Ateşböceği Algoritması, Yarasa Algoritması, Cırcır Böceği algoritması, Kurt Koloni Algoritması, Yapay Balık Sürüsü Algoritması ve Bakteriyel Besin Arama Algoritması şeklinde örneklenebilir.

Canlı türlerinin davranış özelliklerine göre örneklediğimizde, cırcır böcekleri doğada ses ile iletişime geçerek ve kanat çırpmaları ile havanın sıcaklığını tahmin etme davranışı, yarasaların sesin yankılanmasından faydalanarak bir cismin bulunduğu yön ve uzaklık saptama davranışı, ateş böceklerinin parlaklığa duyarlı sosyal davranışı ve arıların besin ararken sergiledikleri davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş sürü tabanlı optimizasyon algoritmalarıdır.

Sürü tabanlı algoritmalar, birçok farklı mühendislik ve tıp alanında başarıyla kullanılmış optimizasyon teknikleridir. Bu algoritmalar jeofizikte yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Bu çalışmada ise PSO algoritmasının sismolojik bir veri kümesine uygulanması irdelenmiştir.

PSO algoritması başta olmak üzere birçok meta-sezgisel algoritma, manyetik verilerin değerlendirilmesinde [1-7], gravite anomalilerinin değerlendirilmesinde [8-13,6,14-

17], SP anomalilerinin değerlendirilmesinde [18-26], DC çalışmalarında [27-31,26,32], MT çalışmalarda [33-35], EM çalışmalarda [36,37], sismolojide odak mekanizmasının çözümünde [38] kullanılmışlardır.

Bu çalışmada, bir depremin konum parametrelerinin belirlenmesinde PSO uygulanabilirliği incelenmiştir. Yöntem 30 Ekim 2020'de Samos fay zonunun ürettiği 6,9 büyüklüğündeki depremin (39) konum belirleme çözümünde kullanılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

2. Çalışma Alanı

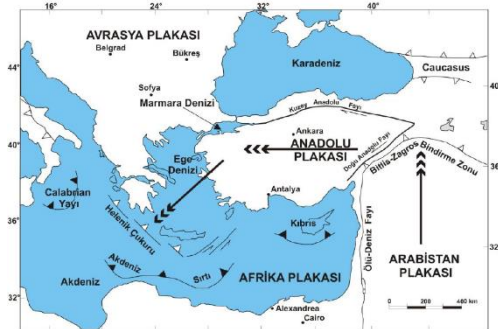
2.1. Sismotektonik yapı

Türkiye'nin genel tektonik yapısını kısaca özetlemek gerekirse Afrika Levhası ile Arap Levhası güneyden kuzeye doğru yer değiştirmektedir. Bu yer değiştirme nedeniyle kuzeyinde yer alan Anadolu Levhasını sıkıştırılmaktadır (Şekil 1). Bu levhaların kuzey yönündeki hareketi Anadolu bloğunun batıya kaçmasına neden olmaktadır [40].

Anadolu Levhası'nın, kuzeyindeki Karadeniz Levhası'na göre batı yönlü hareketi sonucu, Batı Anadolu'da doğu-batı yönünde sıkışmaya neden olurken ve kuzey-güney yönünde ise açılmaya neden olmaktadır [41-43].

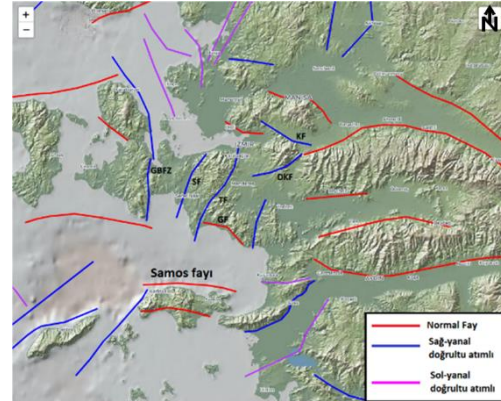
Batı Anadolu Kuzey Anadolu (KAFZ) fay zone ile Doğu Anadolu (DAFZ) doğrultu atımlı fay zone boyunca batıya doğru hareketi, Yunanistan'ın batısı kısmında bir kıtasal kalınlaşma nedeniyle Anadolu'nun batıya hareketi engellenmektedir.

Bu engellenmenin sonucunda Batı Anadolu güneybatı yönünde dönerek Hellen yayı üzerine hareket etmektedir [42,44].



Şekil 1. Türkiye'nin aktif tektonik haritası [45].

Bu nedenle Ege, günümüzde tektonik olarak aktif bir bölge niteliğindedir. Sürekli olarak bu fayların üzerinde, bir sismik aktivite olduğu gözlenmektedir. Bölgenin sismik aktivitesini güncel tutan faylar ise Tuzla Fayı (TF), Seferihisar Fayı (SF), Güzelbahçe (GBFZ) ve Samos Faylarıdır. Ayrıca İzmir Fayı, Bornova Fayı, Manisa Fayı, Kemalpaşa Fayı (KF) ve Dağkızılca Fayları (DKF) da önemli yer tutmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Sisam (Samos) fayı ve çevresinin aktif fay haritası, Tuzla Fayı (TF), Seferihisar Fayı (SF), Güzelbahçe Fayı (GBFZ), Kemalpaşa Fayı (KF), Dağkızılca Fayı (DKF) [46].

2.2. Bölgenin deprenselliği

İzmir ili, Türkiye'nin batısında ve Ege Denizi'nin doğusunda yer alması nedeniyle aktif tektonikten oldukça etkilenmektedir. AFAD 2019 yılında maksimum ivme dağılımına göre Türkiye Deprem Tehlike Haritası yayınlamış ve bu haritaya göre İzmir bölgesi maksimum ivme değeri yaklaşık 0,4g olarak alınabilir. Bu ivme değerine göre İzmir deprem açısından riskli bölgede yer almaktadır.

Bölgede yer alan bu fayların tetiklemesi sonucu tarihsel (1900 öncesi) ve aletsel (1900 sonrası) dönemlerde yoğun sismik aktiviteler oluşmuştur. Tarih boyunca bölgede çok sayıda depremler meydana gelmiş, büyük hasarlar yaratmış ve ölümlere neden olmuştur. Tarihsel dönem depremlerin başlıcaları 1688, 1739 ve 1778 depremleridir. Deprem kataloglarında ise tarihsel döneme ait yaklaşık 330 adet kayıt bulunmaktadır. Tarihsel döneme ait depremler Şekil 3'de gösterilmiştir [47].

3.2. P ve S dalgalarının varış zamanlarının teorik olarak hesaplanması

Bir depremin olduğu konumunun belirlenmesi temel amaçtır. Genellikle deprem sırasında enerjinin açığa çıktığı nokta, hiposantırı (yer içinde depremin olduğu nokta), (x_0, y_0, z_0) ve oluş zamanını (t_0) olarak tanımlanır.

Burada enlem (y_0) , boylam (x_0) ve yeryüzünden odak noktasına olan derinliği (z_0) ifade etmektedir. Odak noktasının (Hiposantırı) yeryüzündeki izdüşümü (x_0, y_0) olarak tanımlanır ve bu izdüşümüne merkez üssü (Episantırı veya dış merkez) denir.

Buradaki amaç; gerçek bir deprem dalgasının istasyonlara varış zamanları ile sentetik deprem modelinden hareket ederek belirlenen odak noktasından o istasyonlara (x_i, y_i) ait varış zamanlarının hesaplanması ve aralarındaki uyumsuzluğun gözlemlenmesi esasına dayanır.

Burada; i istasyon indeksi; (n) istasyon sayısını; x_i (boylamları) ve y_i (enlemleri) sismik istasyonların koordinatlarını ifade eder. İstasyon sayısı kadar da n adet varış zamanı olacaktır. İstasyonlardaki gözlemsel varış zamanları $(t_i^{göz})$, teorik varış zamanları (t_i^{hes}) , ortamın gerçek hız değeri (V_{ger}) ve kestirilen model hız değeri (V_{kes}) olarak tanımlanırsa sentetik seyahat zamanı 1 denklemiyle ifade edilir [53].

$$t_i^{hes} = \sqrt{\frac{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2}{V_{kes}}} + t_0 \quad (1)$$

$$t_i^{göz} = \sqrt{\frac{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2}{V_{ger}}} + t_0 \quad (2)$$

(t_0) depremin oluş zamanını ifade ederken varış zamanları arasındaki hata değeri ise

$$e_i = t_i^{göz} - t_i^{hes} \quad (3)$$

olarak elde edilir. Hataların karelerinin toplamı hata enerjisi olarak bilinir ve 4 bağıntısı ile ifade edilir.

$$E = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (4)$$

Hata enerjisinin ortalamasının karekökü ise RMS değerini verir.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n}} \quad (5)$$

3.3. Parçacık Sürü Algoritması (PSO)

PSO, Global Optimizasyon yöntemleri olarak bilinen biyolojik tabanlı sürü zekâsına ve davranışına sahip bir eniyileme algoritmasıdır. 1995 yılında psikolog James Kennedy ve elektrik mühendisi Russel Eberhart tarafından geliştirildi [54]. Sürü davranışı aynı türden ve bir araya toplanmış hayvanların aynı yerde gezmeleri ya da grup halinde hareket etmeleri ya da aynı yöne doğru göç etmeleri ile sergilenen toplu bir davranıştır. Sosyo-biyologlar bir grup içinde hareket eden kurt, kuş, ateş böceği, balık veya bir kuş sürüsünün, grup içindeki her bir canlının diğer tüm üyelerin deneyimlerinden yararlanacağı üzerine gözlemler yapmışlardır [54].

Örnek olarak, bir kuş sürüsündeki her bir birey rastgele uçup yiyecek ararken, sürüdeki herkesin besin bilgilerini birbirleriyle paylaşımı sayesinde tüm sürünün en iyi besin kaynağına ulaşmasına olanak sağlamaktadırlar. Süreç, sürüdeki her bir bireyin hız ve konumunu o ana kadarki en iyi konumuna güncellerken sürü de kendisini sürünün herhangi bir üyesinin bulunduğu en iyi konuma doğru günceller. Bu güncellemeler sonunda bir noktada birleşerek grup olarak hareket etmeye devam ederler.

Bu durumu PSO algoritması altında irdelediğimizde, arama uzayında belirli bir amaç fonksiyonuna göre aday bir çözümü yinelemeli olarak iyileştirmeye çalışan, her adımda bireyin konumunu ve hızını güncelleyen basit matematiksel formüle dayanan bir optimizasyon algoritmasıdır.

Matematiksel ifadelerle açıklamak gerekirse, çözüm uzayı rastgele bir süreçle oluşturulmuş bir başlangıç topluluğu ile başlar. Bu yöntemde, araştırma uzayında, sürüdeki her bir birey rastgele konumlanır. Her bir bireyin konumu (x_i) ve hızı (v_i) olarak tanımlanır. Hız ve konum bilgileri 6 ve 7 bağıntılarıyla tanımlanır. Yineleme işlemi belirlenen amaç fonksiyonuna göre her bireyin uygunluk değerinin hesaplanmasıyla başlar. Her bir yinelemede hız ve konum bilgileri güncel tutularak araştırma uzayında en iyi konum değerine sahip olmaya çalışılır.

$$v_{i,d}^{t+1} = \omega * v_{i,d}^t + \dots$$

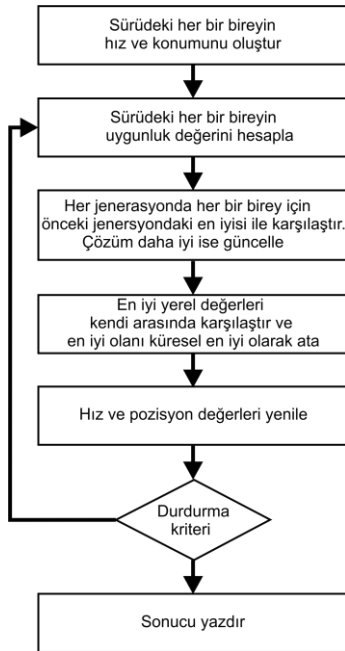
$$c_1 * r_1 * (pbest_{i,d} - x_{i,d}^t) + \dots \quad (6)$$

$$c_2 * r_2 * (gbest_{i,d} - x_{i,d}^t)$$

$$x_{i,d}^{t+1} = x_{i,d}^t + v_{i,d}^{t+1} \quad (7)$$

Burada yer alan c_1 ve c_2 katsayıları kullanıcının belirlediği parametreleridir ve sırasıyla bireyin bilişsel davranışını ve sosyal davranışını kontrol ederler. ω ise atalet ağırlık katsayısı ($0 < \omega < 1$) ve t nesil sayısı, r_1 , r_2 ise $[0, 1]$ arasında değişen random olarak üretilen tekdüze dağılıma sahip stokastik sayılardır.

Amaç fonksiyonun dayanağı sürü içindeki en iyi konum değerine sahip bireyin yerinin tespit edilmesi ve sürüdeki diğer bireylerin de o konuma doğru hareketinin sağlanmasıdır. Sürü içerisindeki her bir bireyin konumu bir çözümü temsil eder. Her bir birey önceki konumlarını aklında tutarak karşılaştırma yapar ve bu konumlar içindeki en iyi yerel konumu belirler ve bu en iyi konuma *pbest* adı verilir. Son olarak algoritma tüm kuşların *pbest* değerlerini tek tek kontrol ederek tüm sürünün en iyi konum değerini belirler ve buna *gbest* adı verilir.



Şekil 6. PSO akış diyagramı

Bu süreç, önceden tanımlanmış bir nesil sayısına veya arzu edilen bir uygunluk değerine varıncaya kadar devam eder [55,56,57]. Şekil 6'de yukarıda açıklanan algoritma adımları bir akış diyagramı şeklinde verilmektedir.

4. Parametre Kestirim Çalışmaları

PSO yönteminin uygulanabilirliğini ve başarısını test etmek için, yapay olarak tasarlanan yapay bir deprem kaynağı ile bu kaynaktan çıkan dalgaların varış zamanlarını kaydedecek bir adet sismik ağ gruba tasarlanmıştır.

Yapay modelin üretilmesi aşamasında önce ideal bir ortam tasarlanmıştır. Yeraltının tek bir tabakadan oluştuğu, sabit bir hız değerine sahip olduğu ve ortamda gürültü yaratabilecek herhangi bir etmenin olmadığı kabulüne dayanarak istasyonlara ulaşan dalgaların varış zamanları hesaplanmıştır.

İkinci aşamada ise, günlük yaşantıda karşılaşılan varış zamanlarının hatalı okunması, kayıtlardaki gürültü düzeyinin öngörülebilir düzeyden fazla olması, depremin oluş zamanının hatalı belirlenmesi ve ortam hızının yanlış seçilmesi gibi olumsuz etmenlerin değerlendirme sonuçlarını etkileyebileceği durumu göz önüne alınarak varış zamanlarına gürültü eklenmiştir. Bu yapay deprem modelinde sismik ağ grubundaki her bir istasyonun konumları ile depremin konum değerlerinin aynı kalması koşuluyla veri kümesine gürültü eklenerek yöntemin başarısı üzerindeki etkileri irdelenmektedir.

Ayrıca bu çalışma içindeki tüm hesaplamalar (Hem sentetik modellerin çözümü hem de Samos depremi çözümü için) UTM koordinatları cinsinden yapılmıştır. Bu amaçla coğrafik koordinatlardan kartezyen koordinatlara ya da kartezyen koordinatlardan coğrafik koordinatlara dönüştürebilmek için bir MATLAB kodu hazırlanmıştır.

4.1. Sentetik deprem modeli (Model 1)

Model 1'de bölgenin ortalama hız modeli $V_p=6,0$ km/sn ve $V_s=3,37$ km/sn olarak belirlenmiş ve deprem kaynağına ait konum bilgileri Tablo 1'de ve Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 1. Model 1'e ait depremin konumu ve PSO çözümü için gerekli arama uzayı sınırları

MODEL 1

Model	Doğru	Min.	Max.
Enlem (°)	38,6	38,0	40,0
Boylam (°)	27,9	27,0	29,0
Derinlik (km)	14,0	5,0	20,0

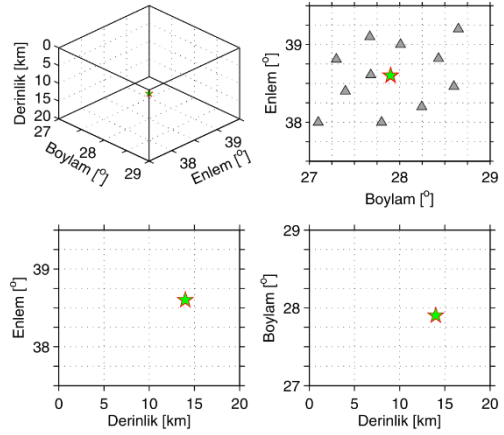
Tablo 2’de ise 11 adet istasyondan oluşan sismik ağ grubuna ait istasyonların koordinatları verilmiş olup tüm istasyonlar deniz seviyesinde olduğu ($z=0$) kabul edilmiştir. Kaynak modelinin üreteceği bir deprem dalgasının istasyonlardaki P ve S dalgalarının varış zamanları teorik olarak üretilmiştir.

PSO algoritması yardımıyla yapılan parametre kestirim çalışmasında algoritmanın literatürde yaygın olarak kullanılan kullanıcı tanımlı katsayıları ($W=1$, $C1=2$ ve $C2=2$) olarak seçilmiş ve parçacık sayısı ($Np=40$) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, parametre kestirimi için çözüm uzayı sınırları belirlenmiş olup Tablo1’de gösterilmiştir. 200 nesilden oluşan PSO çözüm kümesi oluşturulmuş ve en düşük RMS hatasına sahip en iyi parametre değerleri kestirilmiştir.

Literatür çalışmalarında kullanıcı tanımlı bu katsayılar, parametre seçim (parameter tuning) çalışmaları sonucunda belirlenmektedir. Bunun belirlenmesi yöntemin yakınsama hızını artırmaktadır ve daha düşük nesil sayılarında çözüme ulaşmasına katkı sağlamaktadır. Buradaki genel amaç kullanıcı tanımlı uygun katsayıların belirlenmesinden daha ziyade yöntemin uygulanabilirliği üzerine çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Model 1’e ait istasyon konumları

İst.	Enlem (°)	Boylam (°)	z (km)
1	38,00	27,10	0
2	38,81	27,30	0
3	39,10	27,67	0
4	38,61	27,68	0
5	38,00	27,80	0
6	38,40	27,40	0
7	38,46	28,60	0
8	39,00	28,01	0
9	38,20	28,24	0
10	38,82	28,43	0
11	39,20	28,65	0



▲ İstasyonların konumu ★ PSO sonucu ★ Depremin gerçek konumu

Şekil 7. İstasyonların konumu, depremin merkez üssü ile odak derinliğinin gerçek ve kestirilen konumu

Son olarak 40 adet birbirinden bağımsız çözüm üretilmiş ve bu çözüm kümeleri içinde en düşük RMS değerine sahip parametre kümesi (depremin enlemi, boylamı ve derinliği) çözüm olarak atanmıştır. Şekil 8’de ve Tablo 3’de model 1 senaryo depremi için çözüm sonuçları gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde gri üçgen simgeler 11 adet istasyon yerini, yeşil renkli yıldız simgesi merkez üssü parametre kestirimini ve kırmızı yıldız simgesi depremin gerçek konumunu göstermektedir.

Merkez üssü noktası için parametre kestirim değerleri ile model depremin gerçek değerleri birbirine çok yakın olduğu için, başka bir deyişle değerler arasında iyi bir uyum olması nedeniyle şekil üzerindeki konumları üst üste konumlanmış olup kırmızı renkli yıldız simgesi gözlenmemektedir.

Tablo 3. Model 1 için PSO çözümünden elde edilen merkez üssü ve odak derinliği değerleri

Nesil No	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)
1	38,616	27,760	12,912
50	38,599	27,902	13,728
200	38,600	27,900	14,000

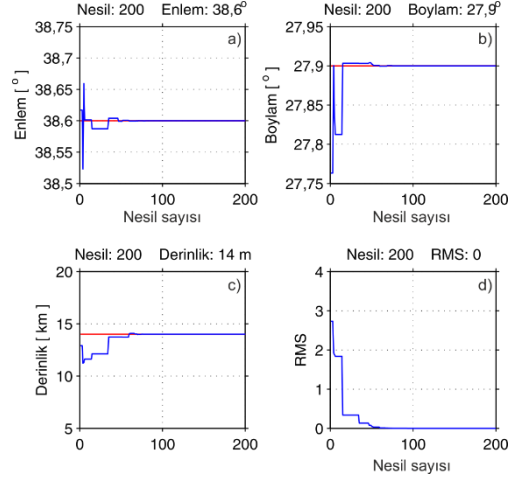
Tablo 3 incelendiğinde, nesillere göre (Nesil 1, Nesil 50 ve Nesil 200) kestirim parametrelerinin değişimi gözlenmektedir. Nesil sayısının artmasına bağlı olarak kestirim parametreleri

gerçek parametrelere yaklaşmaktadır. Her bir kestirim parametre değeri ile gerçek değeri arasındaki değişim miktarı ifade edebilmek için yüzde bağıl hata hesaplaması kullanılmıştır (Tablo 4). Nesil 1’de enlem için yüzde bağıl hata % 0,041 iken nesil 200’de bu değer %0,000 düşmüştür. Benzer şekilde nesil 50’de boylam ve derinlik için yüzde bağıl hata değerleri için % 0,007 ve %0,27’dir. Nesil sayısı arttıkça hata oranların düştüğü görülmektedir. Hata oranlarına bakıldığında merkez üssü değerleri çok düşük hataya sahipken, neredeyse sonuçlar aynı, derinlik değerinde göreceli olarak daha fazladır.

Sismolojide derinlik belirlemesi temel bir problem olması nedeniyle burada da hata değerinin fazla çıkması beklenen bir sonuçtur. Grid Search algoritması (GA) ile yapılan çalışmada değişik derinlik modelleri için merkez üssü konumun bulunmasında GA yöntemi kullanılmış ve derinlik arttıkça hata oranının arttığı vurgulanmıştır[58].

Tablo 4. Nesillere göre Model 1 için depremin merkez üssü ve odak derinliğinin yüzde bağıl hataları

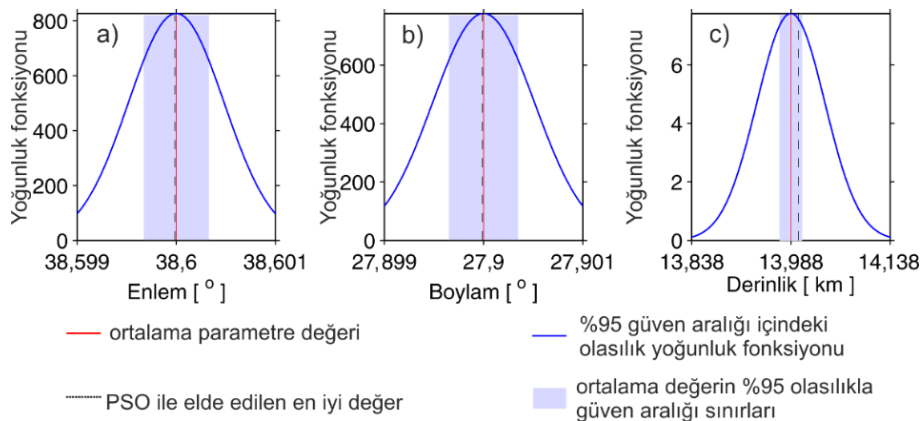
Nesil No	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)
1	0,0410	0,5017	7,7714
50	0,0002	0,0071	0,2720
200	0,0000	0,000	0,000



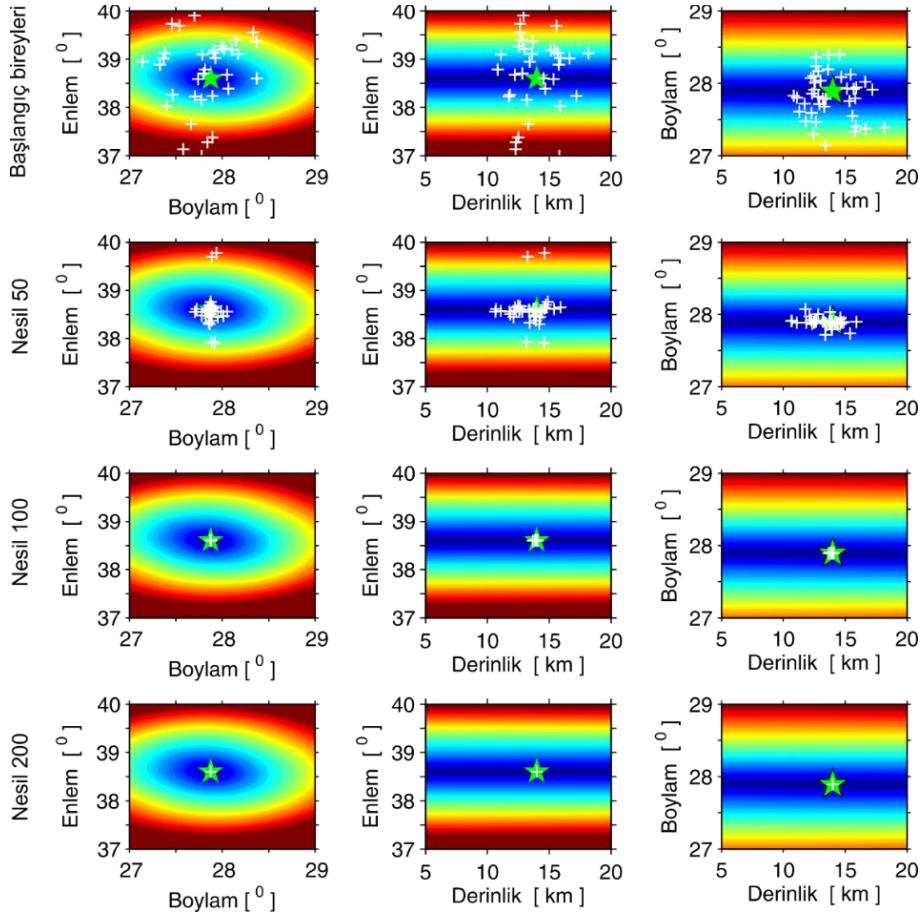
Şekil 8. Model parametrelerinin ve RMS değerinin nesil sayısına göre değişimi

Şekil 8’de, model kestirim parametrelerinin ve RMS değerinin nesil sayısına göre değişimini gösteren grafikler yer almaktadır (Şekil 8a, b, c ve d). Bu grafiklerde RMS grafiği incelendiğinde RMS değerlerinde 40 nesilden sonra azalma gözlenmekte olup model parametrelerinin gerçek değerlere yakınsadığı görülmektedir.

Şekil 9 ‘de PSO’dan elde edilen en iyi parametre kestirim değerleri ve onlara ait olasılık yoğunluk fonksiyonları yer almaktadır. %95 güven aralığına sahip olasılık yoğunluk fonksiyonları hesaplanmıştır. PSO’dan elde edilen parametre değerlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları ile karşılaştırmasında güven aralıkları



Şekil 9. 40 ayrı bağımsız PSO çözümünden elde edilen en iyi çözümlere ait parametrelerin istatistiksel değerlendirilmesi



Şekil 10. Gürültüsüz teorik model için her bir gerçek model parametre çiftinin çevresinde hesaplanan hata enerjisi haritaları. Yeşil yıldız depremin parametre gerçek yerini, beyaz artılar olası çözümleri göstermektedir

çinde kalması çözümün başarısının bir göstergesidir. Şekil 10'da farklı parametre çiftleri için RMS hata haritaları hazırlanmıştır. Literatürde RMS ya da hata enerjisi yaygın kullanılmaktadır ve parametrelerin çözüme katkısını göstermektedir. Araştırmacılar farklı jeofizik problemlerin çözümünde bu haritaları hazırlayarak ayrıntılı tartışmışlardır [59]. Şekil 10'da enlem ve boylam parametre çifti için üretilen hata dağılımına bakıldığında küresel dağılım göstermekte olup global minimumda kümelendiği görülmektedir. Ancak, derinlik-boylam ve derinlik-enlem parametre çiftleri için eş konturların şekli küresel dağılım göstermemektedir. Şeklin en üsteki satırında

başlangıç popülasyon dağılımları her parametre çifti için beyaz artılarla gösterilmiştir ve araştırma uzayı içinde rastgele dağılmıştır.

İkinci satırda nesil 50 için dağılım incelendiğinde çözüm kümesinin bir araya yaklaştığı açıkça gözlenmektedir. Nesil 100'de yeşil yıldızla gösterilen çözüm kümesi üzerinde gruplaşmış ve son nesilde ise tüm popülasyon tek bir noktada yoğunlaşmıştır.

4.2. Gürültü etkisinin irdelenmesi (Model 2)

Günlük yaşantıda karşılaşılan olası gürültülerin (varış zamanlarının hatalı okunması, kayıtlardaki gürültü düzeyinin öngörülebilir

düzyden fazla olması, depremin oluş zamanının hatalı belirlenmesi) merkez üssü ve odak derinliğinin parametre kestirimi üzerindeki etkisini test etmek için varış zamanlarına gürültü eklenmiştir.

Model 2 çalışmasında, model 1'de kullanılan model parametre (istasyonların konumları ile depremin merkez üssü ve odak derinliği) değerlerinin aynı kalması koşuluyla varış zamanlarına gürültü eklenerek PSO yönteminin başarısı test edilerek çözüm sonuçları ve gürültünün etkileri irdelenmektedir.

Bu amaçla modelden hesaplanan istasyondaki varış zamanlarına sıfır ortalamaya ve $\pm 0,15$ sn. standart sapmaya sahip normal bir dağılım gösteren rastgele gürültü eklenmiştir.

Gürültü içeren veri kümesine Model 1 çalışmasında kullanılan PSO katsayıları ve parçacık sayısı aynı kalmak koşuluyla 40 adet birbirinden bağımsız PSO çözüm kümesindeki en düşük RMS hatasına sahip kestirim parametreleri çözüm kümesi olarak atanmıştır. Şekil 11'de ve Tablo 5'de model 2 senaryo depremi için çözüm sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 5. Model 2 için PSO çözümünden elde edilen merkez üssü ve odak derinliği değerleri

Nesil No	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)
1	38,396	28,071	7,677
50	38,601	27,899	13,602
200	38,601	27,901	13,438

Tablo 5 incelendiğinde, nesillere göre (Nesil 1, Nesil 50 ve Nesil 200) kestirim parametrelerinin değişimi gözlenmektedir. Nesil sayısının artmasına bağlı olarak kestirim parametreleri gerçek parametrelere yaklaşmaktadır. Her bir kestirim parametre değeri ile gerçek değeri arasındaki değişim miktarı ifade edebilmek için yüzde bağıl hata hesaplaması kullanılmıştır (Tablo 6). Bağıl hata, gerçek değere ne kadar yaklaşıldığının oransal bir gösteren bir hata çeşididir. Bağıl hata mutlak hatanın (Xg-Xy) gerçek değere bölümünün 100 ile çarpılarak % bağıl hata değeri (mutlak hata/Xg*100) elde edilir. Burada Xg ve Xy sırasıyla, gerçek ve hesaplanan değerleri temsil etmektedir.

Nesil 1'de enlem için yüzde bağıl hata % 0,545 iken nesil 50'de bu değer %0,002 düşmüştür. Benzer şekilde nesil 50'de boylam ve derinlik

in yüzde bağıl hata değerleri için % 0,004 ve %0,398'dir. Nesil sayısı artıkça hata oranların düştüğü görülmektedir. Hata oranlarına bakıldığında merkez üssü değerleri çok çok düşük hataya sahipken, nerdeyse sonuçlar aynı, derinlik değerinde yaklaşık %0.5 hata gözlenmiştir. Her iki modelde de odak derinliği için yapılan kestirimlerdeki hataların, merkez üssü koordinatları için yapılan parametre kestirimlerindeki hatalardan biraz daha büyük olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Model 2 için depremin merkez üssü ve odak derinliğinin nesillere göre yüzde bağıl hataları

Nesil No	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)
1	0,525	0,613	45,164
50	0,002	0,004	0,398
200	0,002	0,004	0,562

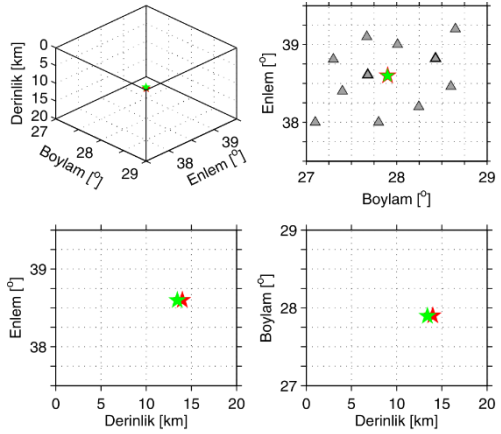
Şekil 11'de parametre kestirimini (merkez üssü ve odak derinliği) yeşil yıldızlar, modelin merkez üssü ve odak derinliği kırmızı yıldızlarla gösterilmiştir. Gürültülü veri olmasına karşın merkez üssü noktasının bulunmasında binde birin altında hatayla çözüm bulunmuştur. Buna karşın odak derinliğinin bulunmasında aynı şeyleri söylemek mümkün değildir.

Şekil 12 nesil sayısına göre model kestirim parametrelerinin ve RMS değerinin değişimini göstermektedir. Derinlik değerleri 10 ile 17 arasında salınım gösterirken nesil 60'tan sonra duraylanarak 13,438 km değerine ulaşmıştır. RMS hatası ise nesil 200'de 0,21 olarak elde edilmiştir. Model 1'deki RMS değeriyle karşılaştırıldığında daha fazla RMS hatasına sahip olduğu gözlenmiştir.

Şekil 13'de 40 ayrı bağımsız PSO çözümünden elde edilen en iyi çözümlere ait parametrelerin istatistiksel değerlendirmesi grafik olarak gösterilmiştir. PSO'dan elde edilen en iyi parametre kestirim değerleri ve onlara ait %95 güven aralığına sahip olasılık yoğunluk fonksiyonları hesaplanmıştır. PSO'dan elde edilen parametre değerlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları ile karşılaştırmasında enlem ve boylam değerleri güven aralığının dışında gözlenirken odak derinliği güven aralığı içinde kaldığı görülmektedir.

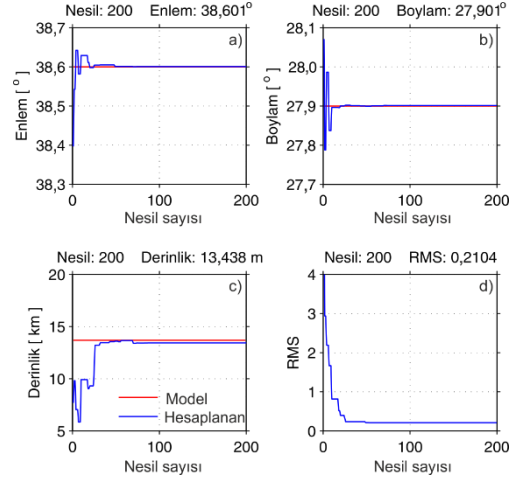
Gürültülü veri kümesi ile yapılan PSO çözümlerine ait eş kontur dağılımına

bakıldığında (Şekil 14) gürültüsüz durumdaki PSO çözümlerindeki eş kontur dağılımına (Şekil 10) çok benzemektedir. Özellikle merkez üssü çözümleri gerçek değerlerine çok yakındır. Beklenildiği gibi kestirilen merkez üssü koordinatları ile gerçek değerleri arasında bazı farklar meydana gelmiştir. Odak derinliğinin konumu gerçek konumuna göre farklı yerlerde kestirildiği görülmektedir. Gürültü eklenerek yapılan çözümlerdeki hata miktarları gürültüsüz veri kümesi kestirimlerdeki hata miktarlarından biraz daha fazla olduğu görülmektedir.

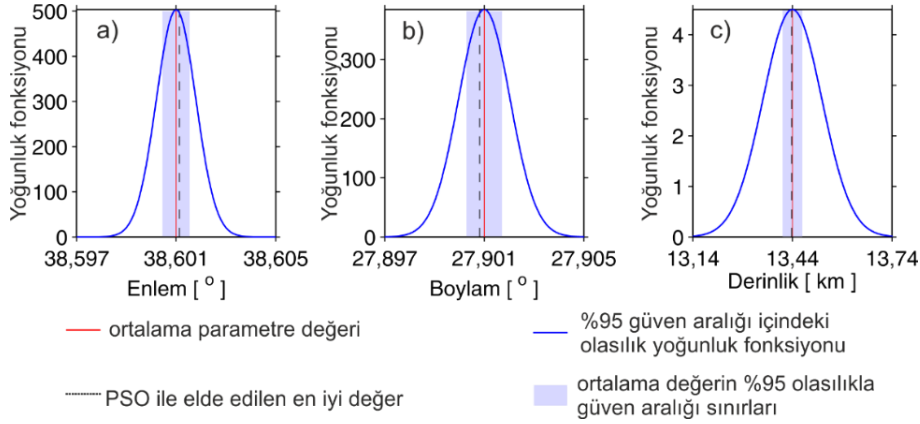


▲ İstasyonların konumu ★ PSO sonucu ★ Depremin gerçek konumu
Şekil 11. İstasyonların konumu, depremin merkez üssü ile odak derinliğinin gerçek ve kestirilen konumu

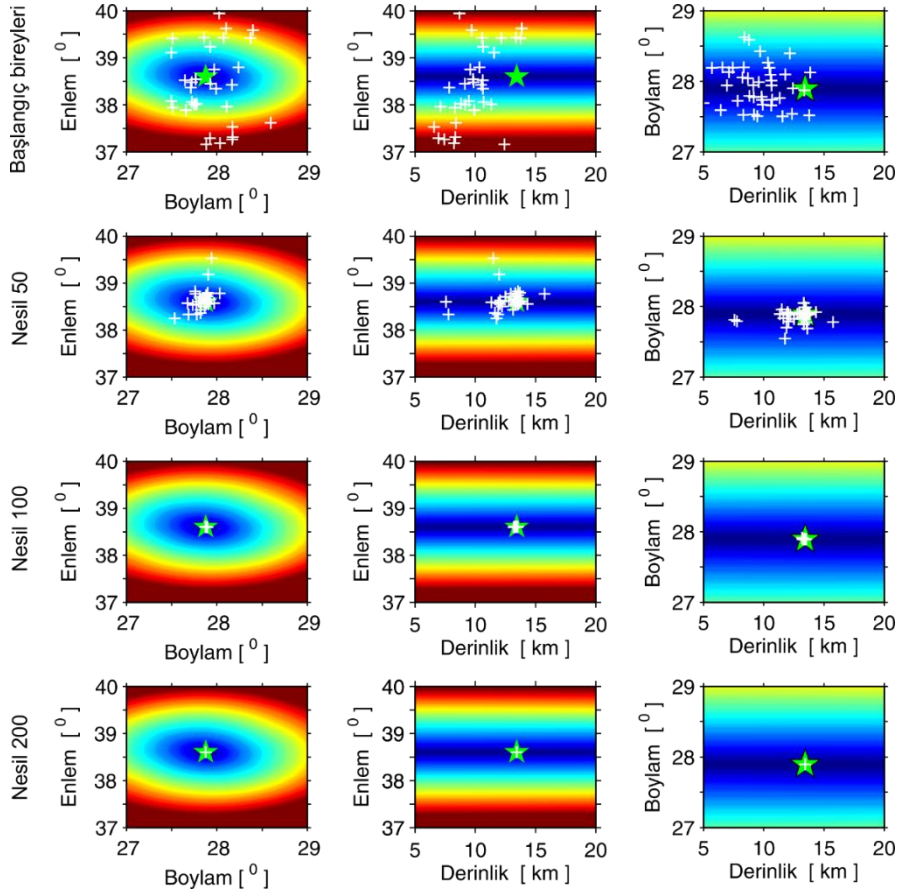
Gürültü içeren veri kümesi ile yapılan çözümlerde, merkez üssü konumları belirlenmesinde, gürültünün ve istasyon ağlarının geometrik şekillerinin çözüm üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığı söylenebilir [58].



Şekil 12. Model parametrelerinin ve RMS değerinin nesil sayısına göre değişimi



Şekil 13. 40 ayrı bağımsız PSO çözümünden elde edilen en iyi çözümlere ait parametrelerin istatistiksel değerlendirmesi.



Şekil 14. Gürültülü teorik model için her bir gerçek model parametre çiftinin çevresinde hesaplanan hata enerjisi haritaları. Yeşil yıldız depremin parametre gerçek yerini, beyaz artılar olası çözümleri göstermektedir.

4.3. PSO algoritmasıyla Samos depreminin merkez üssü ve odak derinliğinin çözümü

Sentetik modeller üzerinde yöntemin geçerliliğini irdeledikten sonra 30 Ekim 2020 tarihinde Ege Denizinde, Seferihisar ilçesinin batısı ile Sisam (Samos) adasının doğusu arasında kalan bölgede Mw: 6,9 büyüklüğünde meydana gelen depremin merkez üssü ve odak derinliği PSO yöntemiyle parametre kestirimi yapılmıştır. Bu depremin merkez üssü İzmir iline en yakın ilçe Seferihisar olup ilçeye bağlı Doğanbey Payamlı köyüne uzaklığı 24 km'dir. Sırasıyla kuzeydoğusunda yer alan Bornova ve Bayraklı ilçelerine uzaklığı ise yaklaşık 65 km ve 70 km'dir (60). Çalışmada 39 adet istasyonda

kaydedilen kayıtlardaki P ve S dalgası varış zamanları kullanılmıştır. Bu istasyonlar AFAD sismik ağına aittir ve tümü ulusal sınırlarımız içindeki karadaki AFAD istasyonlarıdır. Sismik ağ dağılımına bakıldığında depremin merkez üssü ağın hemen dışında yer almaktadır. Bu nedenle kullanılan sismik ağ grubu içinde Ege denizindeki bu depremin merkez üssünün batısında herhangi bir istasyon yer almamaktadır.

Bu çalışmada, PSO çözümlerinde bölgenin bir boyutlu ortalama hız modeli olarak $V_p=6,2$ km/sn. and $V_s=3,48$ km/sn. kullanılmıştır. PSO algoritması yardımıyla yapılan parametre kestirim çalışmasında PSO katsayıları ($W=1$, $C1=2$ ve $C2=2$) ve parçacık sayısı ($N_p=100$) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, parametre

kestirimi için çözüm uzayı sınırları belirlenmiş olup Tablo 7’de gösterilmiştir. Bölgede yapılmış 1B ve 3B hız yapısı çalışmaları bulunmaktadır (61, 62).

Tablo 7. Samos depremi için PSO çözümünde kullanılan çözüm uzayı sınırları

	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)
Min.	36,0	25,0	10,0
Mak.	41,0	30,0	17,0

40 nesilden oluşan PSO çözüm kümesi oluşturulmuş ve en düşük RMS hatasına sahip en iyi parametre değerleri kestirilmiştir. PSO çözümünün nesillere göre deprem kaynağına ait konum bilgileri Tablo 8’de ve Şekil 15’de verilmiştir.

Tablo 8. Samos depremi için PSO çözümünden elde edilen merkez üssü ve odak derinliği değerleri

Nesil No	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)
1	37,875	27,023	15,867
50	37,827	26,650	16,544
100	37,827	26,650	16,544

PSO çözümünün nesillere göre yüzde bağıl hata oranlarını hesaplayabilmek için AFAD tarafından açıklanan (2020 Raporuna göre) rapordaki enlem, boylam ve odak derinlik değerleriyle karşılaştırılmıştır (Tablo 9).

Tablo 9. Samos depreminin merkez üssü ve odak derinliğinin nesillere göre yüzde bağıl hataları

Nesil No	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)
1	0,010	1,198	6,489
50	0,139	0,202	1,644
100	0,139	0,202	1,644

Tablo 10 incelendiğinde AFAD tarafından belirlenen merkez üssü ve odak derinliği sırasıyla 37,879°, 26,703° ve 14,9 km olup PSO yöntemiyle elde edilen parametre kestirimi ise sırasıyla 37,827°, 26,650° ve 16,544 km’dir. İki çözümünden elde edilen merkez üssü arasındaki fark enlemden binde bir hata ile 5,26 km, boylamda binde iki hata ile 6,0 km ve derinlikte ise yüzde 1 hata ile 1,644 km elde edilmiştir. Son

olarak ki merkez üssü arasındaki uzaklık 7,98 km elde edilmiştir.

Sonuçlardan görüldüğü üzere yüzde bağıl hata oranlarına göre merkez üssü konumlarına ait parametre kestirim değerleri odak derinliğine ait parametre kestirim değerlerine göre oldukça birbirine yakındır.

Tablo 10. Samos depreminin merkez üssü ve odak derinliğinin farklı çözümlere göre sonuçları

	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)
AFAD	37,879	26,703	14,900
PSO	37,827	26,650	16,544
Yüz. Bağıl Hata	0,139	0,202	1,644
Uzaklık (km)	5,26	6,00	1,644

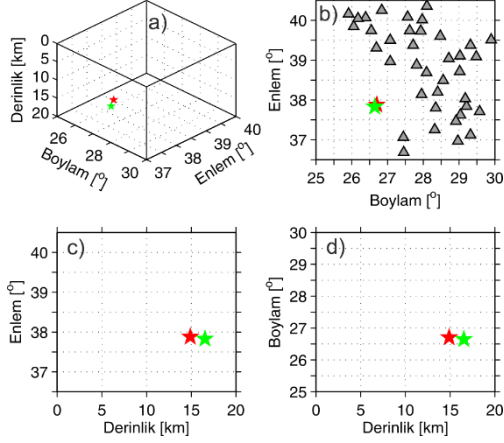
GA yöntemiyle yaptığı çalışmasına göre sentetik deprem modellerinde (odak derinliği yüzeyle) merkez üslerini tam olarak belirlerken, odak derinliği hesaba katıldığında merkez üssünün belirlenmesinde hatalar oluştuğu, odak derinliğine bağıl olarak derinlik arttıkça, merkez üssünün belirlenmesinde hata oranlarının da arttığını tespit etmiştir[58].

Literatürde, tüm konum belirleme çalışmalarında yapılan hata miktarı yerel depremler için 10 km ve uzak depremler için 50 km civarında ise başarılı bir kestirim olduğu düşünülmektedir [53].

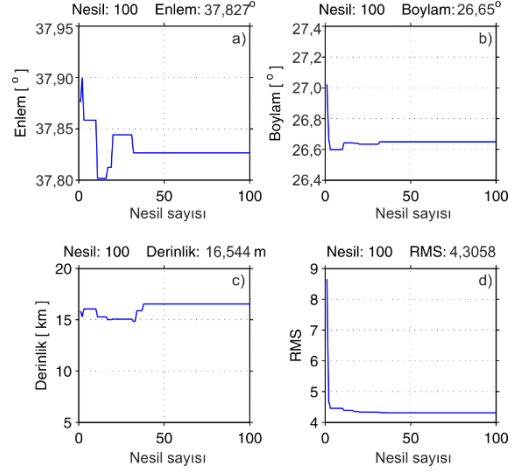
Şekil 16 nesil sayısına göre model kestirim parametrelerinin ve RMS değerinin değişimini göstermektedir. Enlem değerinin nesil 40’dan itibaren 37,8° ile 37,85° arasındaki banda yerleştiği (Şekil 16a), boylam değerinin 26,6° ile 26,8° arasındaki banda (Şekil 16b) yerleştiği gözlenirken, Derinlik değerinin nesil 40’dan itibaren 15 ile 17 arasında salınım gösterirken nesil 40’tan sonra duraylanarak 16,544 km değerine ulaşmıştır (Şekil 16c). RMS hatası ise nesil 100’de 4,30 olarak elde edilmiştir (Şekil 16d).

Şekil 17’de 40 ayrı bağımsız PSO çözümünden elde edilen en iyi çözümlere ait parametrelerin istatistiksel değerlendirmesi grafik olarak gösterilmiştir. PSO’dan elde edilen en iyi parametre kestirim değerleri ve onlara ait %95 güven aralığına sahip olasılık yoğunluk fonksiyonları hesaplanmıştır. PSO’dan elde edilen parametre değerlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu sonuçları ile karşılaştırmasında

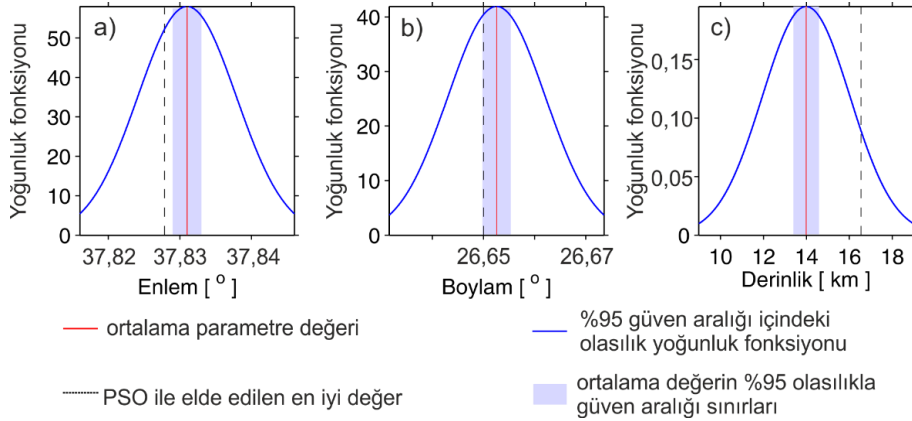
enlem ve boylam değerleri ile odak derinliği güven aralığı içinde kaldığı görülmektedir.



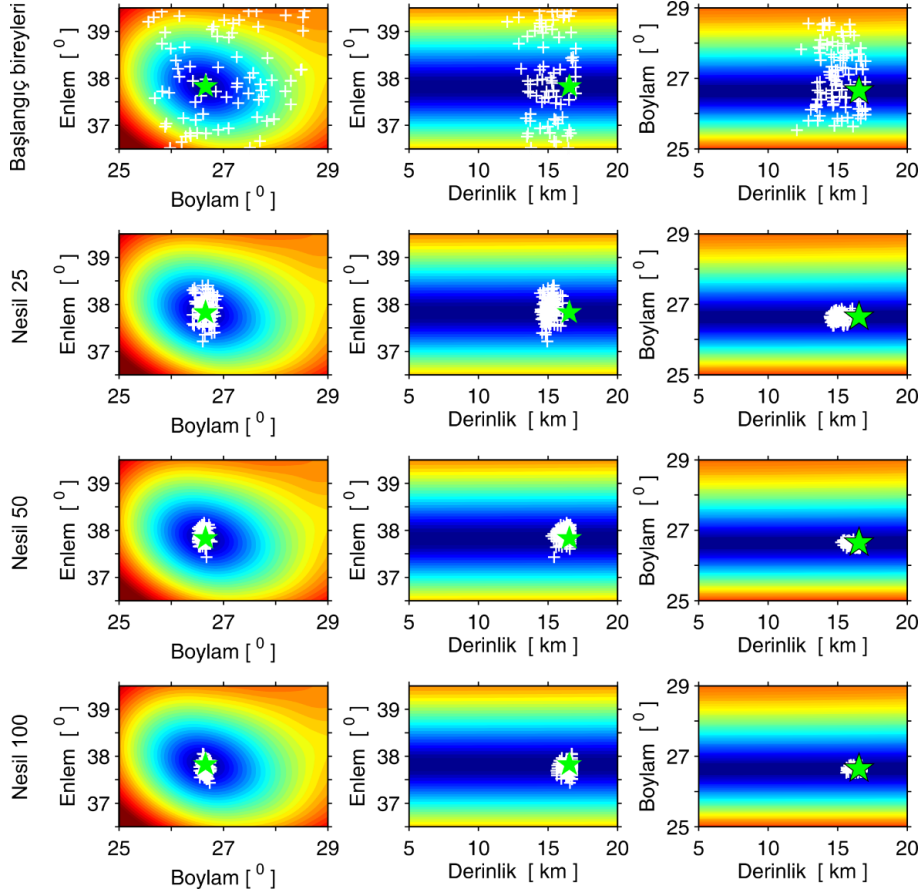
Şekil 15. İstasyonların konumu, depremin merkez üssü ile odak derinliğinin gerçek (AFAD) ve kestirilen konumu



Şekil 16. Model parametrelerinin ve RMS değerinin nesil sayısına göre değişimini



Şekil 17. 40 ayrı bağımsız PSO çözümünden elde edilen en iyi çözümlere ait parametrelerin istatistiksel değerlendirilmesi



Şekil 18. Samos depremi için her bir gerçek model parametre çiftinin çevresinde hesaplanan hata enerjisi haritaları. Yeşil yıldız depremin parametre gerçek yerini, beyaz artılar olası çözümleri göstermektedir.

Şekil 18 nesil 50'de hata enerjilerinin eş kontur çizgilerinin dağılımı ile enlem ve boylam parametre çifti için popülasyonların dağılımına bakıldığında, aday çözümlerin küresel dağılım göstermekte olup global minimumda kümelendiği görülmektedir. Ancak, derinlik-boylam ve derinlik-enlem parametre çiftleri için eş konturların şekli küresel dağılım göstermemektedir. Enlem ve boylam değerlerinin çözüm kümeleri dar alanda salınım gösterirken derinlik değişimi saçılım göstermektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, son yıllarda geniş kullanım alanlarına sahip popülasyon tabanlı meta-sezgisellerden biri olan PSO, bir depremin

parametrelerini (merkez üssü ve odak derinliğini) tahmin etmek için kullanılmıştır.

PSO yönteminin performansını gürültüsüz ve gürültülü sentetik bir deprem modeli üzerinde test edilmiştir. Sentetik deprem modeli sonuçları, elde edilen merkez üssü ve odak derinliğinin gürültüsüz ve gürültülü durumlar için gerçek değerlere yakın olduğunu göstermiştir.

PSO'yı kullanarak yöntemin gerçek veriler üzerindeki başarısını belirlemek için sonuçları daha önce yapılan gerçek depremin çözümleri ile karşılaştırılmış ve yüzde bağıl hataları hesaplanmıştır. Daha ayrıntılı bahsetmek gerekirse, PSO yöntemi, Samos depremine ait

parametre kestirimini saptamak için uygulanmıştır.

Samos depremi için PSO yöntemiyle elde edilen parametre kestirim sonuçları enlem, boylam ve odak derinliği sırasıyla 37,827°, 26,650° ve 16,544 km'dir. AFAD tarafından belirlenen merkez üssü ve odak derinliği değerleri ile PSO çözümüyle elde edilen değerler karşılaştırıldığında enleme göre birbirlerinden olan uzaklık binde bir hata ile 5,26 km, boylamda binde iki hata ile 6,0 km ve derinlikte ise yüzde 1 hata ile 1,64 km elde edilmiştir. Son olarak ki merkez üssü arasındaki uzaklık farkı 7,98 km elde edilmiştir.

Literatürde yerel depremler için konum belirleme çalışmalarında yapılan hata miktarı 10 km ve altında ise başarılı bir kestirim olduğu olgusundan yola çıkarak elde edilen sonuçların PSO yönteminin de, geleneksel yöntemlere göre daha tatmin edici bir sonuç verdiği saptanmıştır.

Bu nedenle, depremin konum belirleme çalışmalarında, PSO uygulamalarının bu çalışmada makul sonuçlar verdiği sonucuna varabiliriz.

Sonuç olarak, klasik ters çözüm uygulamalarında başlangıçta çözümün başarısı iyi bir başlangıç modeline gereksinim duyarken metasezgisel algoritmalar bir çözüm uzayı sınırları içinde yerel en iyiden genel en iyiye yaklaşabilmesi nedeniyle bir depremin konumuna ait parametre kestiriminde başarıyla uygulanabilir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan Samos depremine ait değişik istasyonlardan elde edilen P ve S dalgası varış zaman okumaları AFAD Ulusal Deprem Araştırma Dairesi internet veri tabanından alınmıştır. Veri tabanını erişime açtığı ve kullanıma izin verdiği için teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] Qiu, N., Liu, Q., Zeng, Z. 2010. Particle swarm optimization and least-squares method for geophysical parameter inversion from magnetic anomalies data, IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 29-31 Oct. 2010, Xiamen, 1-5.
DOI: 10.1109/ICICISYS.2010.5658365
- [2] Essa, K.S., Elhussein, M. 2018. PSO (particle swarm optimization) for interpretation of magnetic anomalies caused by simple geometrical structures, Pure and Applied Geophysics, Cilt. 175, s. 3539-3553.
DOI:10.1007/s00024-018-1867-0
- [3] Liu, S., Liang, M., Hu, X. 2018. Particle swarm optimization inversion of magnetic data: Field examples from iron ore deposits in China, Geophysics, Cilt. 83(4), s. 43-59.
DOI: 10.1190/geo2017-0456.1
- [4] Ekinci, Y.L., Özyalın, Ş., Sındırgı, P., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2017. Amplitude inversion of the 2D analytic signal of magnetic anomalies through the differential evolution algorithm, Journal of Geophysics and Engineering, Cilt. 14(6), 1492-1508.
DOI: 10.1088/1742-2140/aa7ffc
- [5] Balkaya, Ç., Ekinci, Y.L., Göktürkler, G., Turan, S. 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.
- [6] 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.
- [7] Kaftan, İ. 2017. Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm, Acta Geophysica, Cilt. 65, s. 627-634.
DOI: 10.1007/s11600-017-0060-7
- [8] Darisma, D., Said, U., Srigutomo, W. 2017. 2D gravity inversion using particle swarm optimization method. In: 23rd European meeting of environmental and engineering geophysics, European Association of Geoscientists and Engineers, Malmö, Sweden, 1-5.
- [9] Pallero, J.L.G. Fernández-Martínez, J.L., Bonvalot, S., Fudym, O. 2017. 3D gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via Particle Swarm Optimization, Journal of Applied Geophysics, Cilt. 139, s. 338-350.
DOI:10.1016/j.jappgeo.2017.02.004
- [10] Essa, K.S., Munschy, M. 2019. Gravity data interpretation using the particle swarm optimization method with application to mineral exploration, Journal of Earth System Science, Cilt. 128, s. 123.
DOI: 10.1007/s12040-019-1143-4
- [11] Essa, K.S., Géraud, Y. 2020. Parameters estimation from the gravity anomaly caused by the two-dimensional horizontal thin sheet applying the global particle swarm algorithm, Journal of Petroleum Science and Engineering, Cilt. 193 s. 107421.
DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107421
- [12] Essa, K.S., Mehaneh, 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
- [13] 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.
- [14] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G. 2020b. Global optimization of near-surface potential Beld anomalies through metaheuristics; In: Advances in Modelling and Interpretation in Near Surface

- Geophysics (eds) Biswas A and Sharma S P, Series of Springer Geophysics, Springer International Publishing, s. 155-188, ISBN: 978-3-030-28909-6.
- [15] 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, s. 923-944.
DOI: 10.1093/gji/ggaa492.
- [16] Göktürkler, G., Balkaya, Ç., Ekinci, Y.L., Turan, S. 2016. Metaheuristics in applied geophysics (in Turkish), Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, Cilt. 22, s. 563-580.
DOI: 10.5505/pajes.2015.81904
- [17] 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
- [18] Santos, F.A.M. 2010. Inversion of self-potential of idealized bodies' anomalies using particle swarm optimization, *Computers & Geosciences*, Cilt. 36, s. 1185-1190.
DOI: 10.1016/j.cageo.2010.01.011.
- [19] Pekşen, E., Yas, T., Kayman, A.Y., Özkan, C. 2011. Application of particle swarm optimization on self-potential data, *Journal of Applied Geophysics* Cilt. 75, s. 305-318.
DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.07.013.
- [20] 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, s. 498-507.
DOI: 10.1088/1742-2132/9/5/498.
- [21] 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.
- [22] Essa, K.S. 2020. Self-potential data interpretation utilizing the particle swarm method for the finite 2D inclined dike: mineralized zones delineation, *Acta Geodaetica et Geophysica*, Cilt. 55, s. 203-221.
DOI 10.1007/s40328-020-00289-2
- [23] Essa, K.S., Elhoussein, M. 2020. Interpretation of magnetic data through particle swarm optimization: mineral exploration cases studies, *Natural Resources Research*, Cilt. 29, s. 521-537.
DOI: 10.1007/s11053-020-09617-3.
- [24] Sındırgı, P., Özyalın, Ş. 2021. A Comparison of the Model Parameter Estimations from Self-Potential Anomalies by Levenberg-Marquardt (LM), Differential Evolution (DE) and Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithms: An Example from Tamiş-Çanakkale, Turkey. In: *Self-Potential Method: Theoretical Modeling and Applications in Geosciences*, Biswas, Arkoprovo, (Editor), Springer, CHAM, s.133-153.
DOI: 10.1007/978-3-030-79333-3_4
- [25] Di Maio, R., Rani, P., Piegari, E., Milano, L. 2016. Self-potential data inversion through a genetic-price algorithm, *Computers & Geosciences*, Cilt. 94, s.86-95.
DOI: 10.1016/j.cageo.2016.06.005
- [26] 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
- [27] Gallardo, L.A., Meju, M.A. 2003. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data: characterization of heterogeneous near-surface materials, *Geophysical Research Letters*, Cilt. 30 s. 1658-1664.
DOI: 10.1029/2003GL017370
- [28] Fernández-Álvarez, J.P., Fernández-Martínez, J.L., García-Gonzalo, E., Menéndez-Pérez, C.O. 2006. Application of a Particle Swarm Optimisation (PSO) algorithm to the solution and appraisal of the VES inverse problem, Liège, Belgium, ss. 12-17.
- [29] Shaw, R., Srivastava, S. 2007. Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data, *Geophysics*, Cilt. 72, s. 75-83.
DOI: 10.1190/1.2432481
- [30] Fernandez Martínez, J.L., Mukerji, T., García Gonzalo E., Suman, A. 2012. Reservoir characterization and inversion uncertainty via a family of particle swarm optimizers, *Geophysics*, Cilt. 77, s.1-16.
DOI: 10.1190/geo2011-0041.1
- [31] Pekşen, E., Yas, T., Kiyak, A. 2014. 1-D DC resistivity modeling and interpretation in anisotropic media using particle swarm optimization, *Pure Applied Geophysics*, Cilt. 171, s. 2371-2389.
DOI:10.1007/s00024-014-0802-2
- [32] Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Erhan, Z., Ekinci, Y.L. 2012. Exploration for a cave by magnetic and electrical resistivity surveys: Ayvacık Sinkhole example, Bozdağ, İzmir western (Turkey), *Geophysics*, Cilt. 77, s. 135-146.
- [33] Grandis, H., Maulana, Y. 2017. Particle swarm optimization (PSO) for magnetotelluric (MT) 1D inversion modeling, *Earth and Environmental Science*, Cilt. 62, ss 012033.
DOI:10.1088/1755-1315/62/1/012033
- [34] Karcıoğlu, G., Gürer, A. 2019. Implementation and model uniqueness of Particle Swarm Optimization method with a 2D smooth modeling approach for Radio-Magnetotelluric data, *Journal of Applied Geophysics*, Cilt. 169, s. 37-48.
DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.06.001
- [35] Pace, F., Santilano, A., Godio, A. 2019a. Particle swarm optimization of 2D magnetotelluric data, *Geophysics*, Cilt. 84, s. 125-141.
DOI: 10.1190/geo2018-0166.1
- [36] Godio, A., Massarotto, A., Santilano, A. 2016. Particle swarm optimization of electromagnetic soundings. In: 78th Annual international conference and exhibition. European Association of Geoscientists and Engineers, Barcelona, Spain, s. 1-5
DOI: 10.3997/2214-4609.201602024
- [37] Alkan, H., 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

- [38] Özyalın, Ş., Kartal, R.F., Polat, O. 2017. Odak mekanizmasının parçacık sürü optimizasyonu (pso) ile çözümü, 4. uluslararası deprem mühendisliği ve sismoloji konferansı, 11-13 Ekim 2017, Anadolu Üniversitesi – Eskişehir, 234.
- [39] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) 2020. Samos Depremi Değerlendirme Raporu <https://deprem.afad.gov.tr/downloadDocument?id=2065> (Erişim tarihi: 25.12.2021)
- [40] McKenzie, D. 1972. Active tectonics of the Mediterranean region, *Geophysical Journal International*, Cilt. 30, s. 109-185. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x
- [41] Alptekin, Ö. 1973. Focal mechanism of earthquakes in western Turkey and their tectonic implications. Ph.D. Thesis, New Mexico Institute of Mining and Technology, (unpublished). 190s, Socorro, New Mexico.
- [42] Dewey, J. F., Şengör, A.M.C. 1979. Aegean and surrounding regions: Complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone, *Geological Society of American Bulletin*, Cilt. 90, s. 84-92.
- [43] Mckenzie, D. P. 1978. Active tectonics of the Alpine Himalaya Belt: The Aegean Sea and surrounding regions, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, Cilt. 55, s. 217-254. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1978.tb04759.x
- [44] McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I. 2000. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, Cilt. 105, s. 5695-5720.
- [45] Okay, A.I., Kashişlar, Ö.A., İmren, C., Boztepe, G.A., Demirbağ, E., Kuşçu, I. 2000. Active faults and evolving strike-slip basins in the Marmara Sea, northwest Turkey: a multichannel seismic reflection study, *Tectonophysics*, Cilt. 321, s. 189-218. DOI: 10.1016/S0040-1951(00)00046-9
- [46] <https://blogs.openquake.org/hazard/global-active-fault-viewer/> (Erişim Tarihi: 15.12.2021)
- [47] http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wp-content/uploads/2020/10/20201030_izmir_V1.pdf (Erişim Tarihi: 11.04.2021)
- [48] Emre, Ö., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım, C. ve Göktaş, F. 2005. İzmir yakın çevresinin diri fayları deprem potansiyelleri, MTA Genel Müdürlüğü, Rp: No:10754, s.1-80, Ankara.
- [49] Kuşçu, İ., Öcal, F., Kurtuluş, O. 2010. İzmir ve Sığacık Körfezlerinde Kıyı Ötesi Aktif Faylar, MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi, Rapor No: 11273, 73s., Ankara.
- [50] 30 Ekim 2020 Sisam adası (İzmir Seferihisar açıkları) MW 6.6 depremi raporu Deprem Dairesi Başkanlığı Aralık 2020, Ankara.
- [51] KOERI 2020. Kandilli observatory and earthquake research institute, Istanbul-Turkey. <http://koeri.boun.edu.tr>. (Erişim Tarihi: 15.01.2021)
- [52] Akıncı, A., Cheloni, D., Dindar, A.A. 2021. The 30 October 2020, M7.0 Samos Island (Eastern Aegean Sea) Earthquake: effects of source rupture, path and local-site conditions on the observed and simulated ground motions, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Cilt. 19, s. 4745-4771. DOI: 10.1007/s10518-021-01146-5
- [53] Havskov, J., Ottemöller, L. 2010. *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Springer Science, London, United Kingdom.
- [54] Kennedy, J., Eberhart R.C. 1995. Particle swarm optimization. *IEEE International Conf. on Neural Networks (Perth Australia)*, 27 Nov.-1 Dec. 1995, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1942-1948.
- [55] Shi, Y., Eberhart, R., May, A. 1998. Modified Particle Swarm Optimizer. In *Evolutionary Computation Proceedings, 1998, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 4 May 1998, 69-73. DOI:10.1109/ICEC.1998.699146
- [56] Salmon, S. 2011. Particle Swarm Optimization in Scilab. <http://forge.scilab.org/index.php/p/psotoolbox/downloads/2011>.
- [57] Karaboğa, D. 2014. Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları. 3. baskı. Ankara, Türkiye, Nobel Yayın Dağıtım,
- [58] Gökalp H. 2021. Grid araştırma yöntemi ile yerel ve bölgesel depremlerin konumlarının belirlenmesi. Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, Cilt. 27, s. 393-409, DOI: 10.5505/pajes.2020.69922
- [59] Balkaya, Ç., Kaftan, I. 2021. Inverse modeling via differential search algorithm for interpreting magnetic anomalies caused by 2D dyke-shaped bodies. *Journal of Earth System Science*, s. 130-135. DOI: 10.1007/s12040-021-01614-1
- [60] Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi (DAUM) 2020. Samos Depremi Değerlendirme Raporu <https://daum.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2020/11/Samos-Deprem-Raporu.pdf>. (Erişim tarihi: 11.11.2020)
- [61] Özer Ç., Polat O. 2017. İzmir ve Çevresinin 1-B (Bir-Boyutlu) Sismik Hız Yapısının Belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt:19, s. 147-168. DOI: 10.21205/deufmd.2017195512.
- [62] Özer Ç., Polat O. 2017b. 2017. İzmir ve Çevresinin 3-B Kabuk Hız Yapısı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* Cilt. 32, s.733-747. DOI: 10.17341/gazimfd.337620