



Determining the Epicenter of an Earthquake with Particle Swarm Optimization: Ayvacik Earthquake Example

Senol Ozyalin ¹

¹ Dokuz Eylul University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, Buca, Izmir, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1401-9453

Keywords

Particle swarm optimization (PSO), Swarm Intelligence, Epicenter, Canakkale-Ayvacic, Metaheuristic

Highlights

- * The presented method PSO algorithm can be easily applied to the earthquake epicenter.
- * Application of problem solutions based on swarm intelligence in seismology
- * Few parameters controlling the algorithm

Aim

Aim of the study is to determine the epicenter of an earthquake

Location

Ayvacic, Canakkale, Turkey

Methods

Particle swarm optimization (PSO) method has been used in the frame of this study.

Results

Epicenter has been found very close to one which is published by AFAD and the mean percent relative error was determined as 0.239%.

Supporting Institutions

The author declares that this study has used location information of AFAD

Financial Disclosure: The author declares that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest: The author has no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 06.12.2021

Revised: 10.01.2022

Accepted: 11.01.2022

Printed: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1033302



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Senol Ozyalin

Email: senol.ozyalin@deu.edu.tr

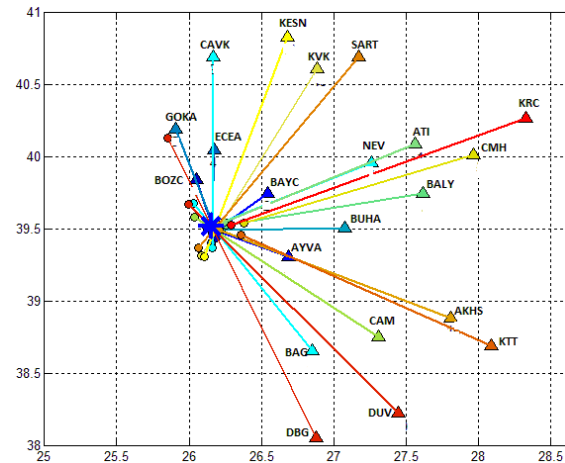


Figure
PSO solution to determine the epicentre of 12 February 2017
Ayvacik-Canakkale earthquake

How to cite:

Ozyalin S., 2022. Determining the Epicenter of an Earthquake with Particle Swarm Optimization: Ayvacik Earthquake Example, Turk. J. Earthq. Res. 4(1), 1-25, <https://doi.org/10.46464/tdad.1033302>



Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Deprem Dış Merkezinin belirlenmesi: Ayvacık Depremi Örneği

Şenol Özyalın¹

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir 35160 Türkiye
ORCID: 0000-0002-1401-9453

ÖZET

Optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan birçok optimizasyon tekniği doğadaki olaylardan esinlenilerek geliştirilmiştir. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), yiyecek veya ortak hedef arayışında sürü (kuş sürüleri, balık sürüleri, böcekler vb.) davranışını işbirlikçi bir şekilde benimseyen, doğadan ilham alan optimizasyon algoritmalarından biridir. Sürüdeki parçacıklar (ya da ajanlar), arama uzayında kendilerini geliştirmelerinin yanı sıra komşularından da bilgi öğrenirler. Bir parçacığın arama algoritması, süreç sırasında o parçacığın en iyi konumu (bireysel öğrenme terimi) ve belirli bir yinelemede çevresindeki en iyi parçacık (sosyal öğrenme terimi) tarafından belirlenir. PSO'daki temel arama stratejisi, sürüdeki parçacıkların bilişsel bilgilerinin ve sosyal davranışlarının sürekli güncellenmesi yoluyla algoritmayı en iyi çözüme doğru yönlendirmesidir. Bu çalışmada önce yöntemin performansını sentetik model ile test edildikten sonra Çanakkale-Ayvacık depreminin dış merkezinin belirlenmesinde bu algoritmanın uygulaması gösterilmiştir. Bu çalışma sonucunda, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayınlanan 06.02.2017 depreminin dış merkezi (26.1351, 39.5303) ile PSO çözümü (26.03,39.50) bulunmuştur. Boylam ve enlem için yüzde bağıl hatalar sırasıyla % 0.402 ve %0.077 bulunmuş ve ortalama yüzde bağıl hata %0.239 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler

Parçacık Sürü Optimizasyonu, Sürü Zekâsı, Deprem dış merkezi, Çanakkale-Ayvacık, Metasezgisel

Öne Çıkanlar

- * Sunulan yöntem PSO algoritması deprem dış merkezine kolaylıkla uygulanabilir
- * Sürü zekâsına dayalı problem çözümlerinin sismolojide uygulanabilmesi
- * Algoritmayı kontrol eden parametre sayısının az olması

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.12.2021
Düzeltilme: 10.01.2022
Kabul: 11.01.2022
Basım: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1033302

Sorumlu yazar

Şenol Özyalın
Eposta: senol.ozyalin@deu.edu.tr

Determining the Epicenter of an Earthquake with Particle Swarm Optimization: Ayvacık Earthquake Example

Senol Ozyalin¹

¹ Dokuz Eylul University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, Buca, Izmir 35160 Türkiye
ORCID: 0000-0002-1401-9453

ABSTRACT

Many optimization techniques used for the solution of optimization problems have been developed by being inspired by the events in nature. Particle Swarm Optimization (PSO) is one of the nature-inspired optimization algorithms that cooperatively adopts swarm behavior (e.g. flocks of birds, flocks of fish, insects, etc.) in search of food or common target. Particles (or agents) in the swarm learn information from their neighbors as well as evolve themselves in search space. A particle's search algorithm is determined by that particle's best position during the process (individual learning term) and the best particle around it at a given iteration (social learning term). The basic search strategy in PSO is to guide the algorithm towards the best solution through continuous updating of the cognitive information and social behavior of the particles in the swarm. In this study, the performance of the method was tested with a synthetic model, and then the application of these algorithms in determining the epicenter of the Canakkale-Ayvacık earthquake was demonstrated. As a result of this study, the epicenter of the 06.02.2017 earthquake published by the Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD) and the PSO solution were found as (26.1351, 39.5303) and (26.03, 39.50), respectively. The percent relative errors for longitude and latitude are determined as 0.402%, and 0.077%, and the mean percent relative error is computed as 0.239%.

Keywords

Particle swarm optimization, Swarm Intelligence, Epicenter, Canakkale-Ayvacık, Metaheuristic

Highlights

- * The presented method PSO algorithm can be easily applied to the earthquake epicenter.
- * Implementation of problem solutions based on swarm intelligence in seismology
- * Few parameters that control the algorithm

Manuscript

Research Article

Received: 06.12.2021
Revised: 10.01.2022
Accepted: 11.01.2022
Printed: 30.06.2022

DOI

10.46464/tdad.1033302

Corresponding Author

Senol Ozyalin
Email: senol.ozyalin@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), doğrusal olmayan ve çok boyutlu bir problemi optimize edebilen ve genellikle minimum parametre gerektiren iyi çözümlere verimli bir şekilde ulaşan bir algoritmadır. Yöntem, sürü halinde hareket eden balıklar ve böceklerden esinlenerek Kenedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilmiştir. Temel olarak sürü zekâsına dayanan bir algoritmadır. Sürü halinde hareket eden hayvanların yiyecek arama ve güvenlik gibi durumlarda amaçlarına daha kolay ulaşmak için rastgele sergiledikleri hareketlerinden ilham almıştır. Her bireye parçacık denir ve parçacıklardan oluşan popülasyona da sürü denir. PSO bireyler arasındaki sosyal bilgi paylaşımını esas alır.

Algoritmanın temel amacı, arama uzayında hareket eden, amaçlarını veya bir uygunluk fonksiyonu tarafından verilen ihtiyaçlarına en uygun yeri arayan bir parçacık sürüsü yaratmaktır. Sürüdeki her parçacık için bir bellek bileşenine sahiptir. Bu yaklaşımda, her bir parçacık kendi pozisyonunu, en uygun cevaba ve/veya hesaplama sınırlamalarına varana kadar, bir önceki deneyiminden yararlanarak sürünün en iyi pozisyona sahip olan bireyine yaklaştırılmasına dayanır. Yaklaşma işlemi genetik algoritmalarda olduğu nesil sayısınca yapılır. Yaklaşma hızı rasgele gelişen durumdur ve çoğu zaman sürü içinde bulunan parçacıkları yeni hareketlerinde bir önceki pozisyonundan daha iyi pozisyona gelir (Chen ve diğ. 2017). Bir kuş sürüsünün V-şekilli uçuş modelinde gözlemlenen eşzamanlılık, kuşlar arası mesafeyi optimize etme ve enerji tasarrufunu maksimize etme çabasının bir sonucudur (Weimerskirch ve diğ. 2001). Carlisle ve Dozier (2001) tarafından yapılan çalışmada yaygın olarak kullanılan çok çeşitli kıyaslama fonksiyonları için minimumları bulmada PSO'nun başarılı bir şekilde uygulandığını gösterilmiştir.

PSO, birçok farklı mühendislik ve tıp alanında başarıyla kullanılmış bir optimizasyon tekniğidir. Yöntem, mühendislik elektromanyetikleri (Robinson ve Rahamat-Samii 2004), makine öğrenimi (Juang 2004) ve ters saçılma (Donelli ve diğ. 2006) gibi birçok konuda problemi çözmek için uygulanmıştır. Yapısal tasarım (Perez ve Behdinan 2007), güneş fotovoltaik sistemleri (Khare ve Rangnekar 2013), Sars-Cov-2'nin salgın modellemesi (Godio ve diğ. 2020), hidrojeoloji (Fernández-Martinez ve diğ. 2012), jeoteknik mühendisliği (Cheng ve diğ. 2007, Armaghani ve diğ. 2017, Yin ve diğ. 2018), rezervuar mühendisliği (Ahmadi ve diğ. 2013), bilgisayarlı görme (Jin ve diğ. 2017), yapay sinir ağları (Song ve diğ. 2012), biyomedikal mühendisliği (Wachowiak ve diğ. 2004), güç sistemleri (AlRashidi ve El-Hawary 2009), robotik ve sinyal işleme (Poli 2008) alanlarında başarıyla kullanılmıştır.

Jeofizikte ise, PSO algoritması manyetik verilerin değerlendirilmesinde (Essa ve Elhussein 2018, Liu ve diğ. 2018), gravite anomalilerin değerlendirilmesinde (Darisma ve diğ. 2017, Essa ve Geraud 2020, Essa ve Munsch 2019, Essa ve diğ. 2021, Pallero ve diğ. 2017), SP anomalilerinin değerlendirilmesinde (Essa 2020, Essa ve Elhussein 2020, Peksen ve diğ. 2011, Biswas ve Sharma 2014, Sindirgi ve Ozyalin 2021), DC çalışmalarında (Fernandez-Álvarez ve diğ. 2006, Garcia-Gonzalo ve Fernandez-Martinez 2014, Gallardo ve Meju 2003, Peksen ve diğ. 2014), MT çalışmalarda (Grandis ve Maulana 2017, Karcioğlu ve Gurer 2019, Pace ve diğ. 2019), EM çalışmalarda (Godio ve diğ. 2016), sismolojide odak mekanizması çalışmalarda (Ozyalin ve diğ. 2017a) kullanmışlardır.

Bu yöntemler genellikle uygulamalı jeofizik alanlarına uygulanmıştır. Bu çalışmada ise yöntemin sismoloji dalında uygulanabilirliği analiz edilmiştir. (Ozyalin ve diğ. 2017b) Yapay Arı Kolonisi algoritmasını kullanarak ilksel bir çalışma yapmıştır. Sismoloji terimi, faylar ve fayların neden olduğu depremleri çağrıştırmaktadır. Biga yarımadası ve çevresinde çok sayıda fay bulunmaktadır. Bu tür faylar büyüklü küçüklü depremler yaratmaktadırlar. Tarihte ve yakın dönemlerde bölgede büyük depremler meydana gelmiştir. Bölgede meydana gelecek büyük bir deprem can ve mal kaybına sebep olabilir. Bu nedenle her bölge için deprem risk çalışmaları yapılması önemlidir. En fazla deprem riski taşıyan bölgeler 2019 yılından önce 1. derece deprem bölgesi olarak isimlendirilirdi. AFAD 2018 yılında maksimum ivme dağılımına

göre Türkiye Deprem Tehlike Haritası yayınlamış ve ülkeniz yeni harita 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Bu haritaya göre Çanakkale-Ayvacık bölgesi de maksimum ivme değeri yaklaşık 0.3g olarak alınabilir. Bu ivme değeri de küçümsenmeyecek derecede öneme sahiptir.

Ülkemizde Kuzey Anadolu Fay kuşağı, deprem üretkenliği açısından dünyadaki bilinen en önemli fay kuşaklarından birisidir. Biga yarımadası ve çevresinde genel olarak bu fay kuşağının uzantıları görülmektedir. Gelibolu ve Biga yarımadalarındaki Saroz-Gaziköy fayı, Çan-Biga fay kuşağı, Yenice-Gönen fayları aktivite göstermeleri nedeniyle bölgenin diri faylarıdır. Biga yarımadası kuzeybatı kesiminde Kuzey Anadolu Fayı, Ayvacık güneybatı kesiminde Tuzla fayı, Babakale ve Gülpınar fayı ve Edremit Körfezi kuzey kesimlerinde Edremit, Havran Balya fayları bulunmaktadır (Sözbilir ve diğ. 2017). Bu çalışmada, PSO algoritması ile 06 Şubat 2017 ve 12 Şubat 2017 tarihleri arasında Çanakkale ili Ayvacık ilçesinde meydana gelen büyüklükleri $M > 5$ olan depremlerin yaklaşık 22 istasyonda kaydedilen P ve S dalgası varış zamanlarından dış merkezinin konum belirleme çalışması yapılmıştır. Buradan elde edilen bulgular daha önce yayınlanmış olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır

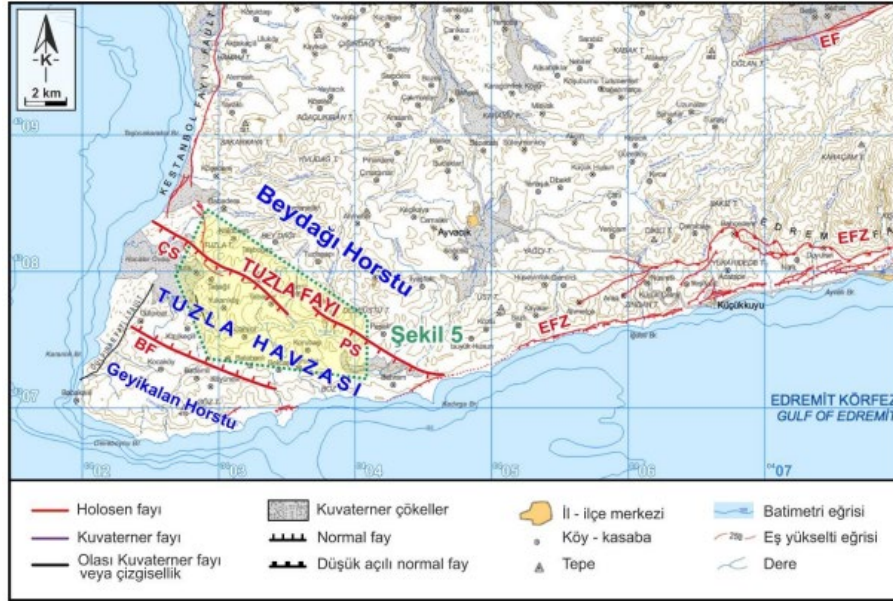
2. ÇALIŞMA ALANI

2.1) Sismotektonik Yapı

Marmara bölgesi, sismik açıdan Türkiye'nin en aktif bölgelerindendir. Bölgeye iki farklı tektonik rejim hâkimdir. Birincisi Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ile ikincisi Ege bölgesini etkileyen K-G yönlü gerilme rejimidir. KAFZ, doğrultu atım tektoniği bölgeyi etkileyen temel unsurdur. Anadolu'nun büyük bir bölümünde kısmen dar, sağ-yanal atımlı fay zonu şeklinde geçerken, Marmara'nın hemen doğusunda üç kola ayrılır. Bunlar; kuzey, orta ve güney koldur. Marmara Denizinin altından geçen Kuzey kol Saroz Körfezi'ne girer ve Orta kesimde Osmaneli-Gemlik-Bandırma Bayramiç hattından ve Güney kesiminde ise Geyve-Yenişehir-Bursa-Gönen-Edremit güzergâhı üzerinden Kuzey Ege Denizine ulaşmaktadır. Bölge tektoniği KAFZ'ce kontrol edilmektedir (Taymaz ve diğ. 1991, Koukouvelas ve Aydın 2002, Nyst ve Thatcher 2004, Kurcer ve diğ. 2016).

Güney Marmara'da batıdan doğuya önemli farklılıklar sergiler. Güneydoğu Marmara bölgesi, doğrultu ve normal atımlı faylarla sınırlanan yaklaşık D-B yönlü romboidal biçimli morfolojik yapılar ile karakterize edilir. Buna karşın, güneybatı Marmara bölgesi, D-B yönlü normal faylar ve KD-GB yönlü doğrultu atımlı faylar egemendir. Bu fay sistemleri günümüzdeki sismisiteyi kontrol eder (Sengor ve diğ. 2005, Reilinger ve diğ. 2006).

Güneybatı Marmara bölgesindeki Tuzla Fayı'nın ilk haritalama çalışmaları Karacik ve Yilmaz (1995 ve 1998) tarafından yapılmıştır. Tuzla Fayı'nın, Tuzla Köyü kuzeybatı sahilinden başlayarak güneydoğu yönünde Çamiçi Köyü'nün kuzey kısmına kadar ilerlediğini, bu yapısal hattın birbirine koşut veya yarı koşut birçok fay parçasından oluştuğunu ve denizdeki uzantısıyla birlikte 15 km'lik bir segmente karşılık geldiği belirtmiştir (Kurcer ve Elmaci 2017). Bölge fayları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Ayvacık civarının 1/250.000 ölçekli diri fay haritası (Sözbilir ve diğ. 2017, DAUM 2017, Emre ve Doğan 2010). ÇS: Çamköy Segmenti, PS: Paşaköy Segmenti, BF: Balabanlı Fayı, EFZ: Edremit Fay Zonu, EF: Evciler Fayı

Figure 1: Active fault map of Ayvacık area on the 1/250.000 scaled map (Sozibilir et al. 2017, DAUM 2017, Emre ve Dogan 2010). CS: Camkoy Segment, PS: Pasakoy Segment, BF: Balabanli Fault, EFZ: Edremit Fault Zone, EF: Evciler Fault

2.2) Bölgenin Depremselliği

Çanakkale ili Türkiye deprem bölgeleri haritasına göre birinci derecede deprem bölgesinde yer almaktadır. Bölgenin tektonik olarak aktif olması nedeniyle burada yer alan fay segmentleri hem tarihsel hem de aletsel dönemde büyük yıkıcı depremlere neden olan, hem can ve hem de mal kayıplarına yol açmış çok geniş bir deformasyon zonunu teşkil etmektedir. Devamlı gözlenen küçük depremlerin yanı sıra büyük depremlere de yol açmaktadır.

Marmara bölgesi 1900'lerden başlayarak günümüze kadar $M \geq 4$ büyük 500'den fazla deprem üretmiş ve bu depremlerin 15 tanesi büyük deprem sınıfına girmektedir. Bu 15 deprem $M \geq 7$ büyüklüğündedir ve 6 tanesi Marmara bölgesinden geçen fay segmentlerinde meydana gelmiştir (Ambraseys 2001, Ambraseys 2009, Nalbant ve diğ. 1998, Caputo ve diğ. 2012).

Son yüzyılda meydana gelen depremler ise, 1900 yılında ($M=5.2$) Ayvacık-Çanakkale, 1912'de ($M=7.4$) Şarköy ve Mürefte-Tekirdağ (5.2), Gelibolu-Çanakkale, 1935 yılında ($M=6.3$ ve $M=5.2$) Biga-Çanakkale, 1953 yılında Yenice-Çanakkale'de ($M=7.2$), 1968 Ezine-Çanakkale ($M=5.2$)'dir. 1980'lerden sonra 1983 ($M=5.2$) Ayvacık-Çanakkale ve 1983 ($M=5.8$) Biga-Çanakkale, 1999 ($M=7.2$) Düzce, 2013 ve 2014 yıllarında sırasıyla ($M_w=5.7$), ($M_w=6.9$) Kuzey Ege depremleri meydana gelmiştir (Kurcer ve diğ. 2016).

Yakın dönemde ise Çanakkale Ayvacık depremleri olarak bilinen 06.02.2017-12.02.2017 tarihleri arasında $M \geq 5$ ($M_w=5.3$, $M_w=5.3$, $M_w=5.2$, $M_w=5.3$) olan 4 tane deprem üretmesi bölgenin sismik yönden aktif olduğunu kanıtlamaktadır.

2.3) 2017 Çanakkale-Ayvacık Depremleri

AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı ve BÜ Kandilli Rasathanesi katalog verilerine göre, Tuzla Köyü'nün yer aldığı bölge de dâhil, 14 Ocak-16 Şubat 2017 tarihleri arasında büyüklüğü $M_w \leq 5.3$ olan 1000'e yakın deprem yer almaktadır. Depremlerin büyük bir kısmı Tuzla Fayı'nın

deformasyon zonunda (Tuzla ile Assos arasındaki bölge) fayın düşen bloğu üzerinde meydana gelmiştir. Meydana gelen 20 tane depremin büyüklüğü 4'ten büyüktür.

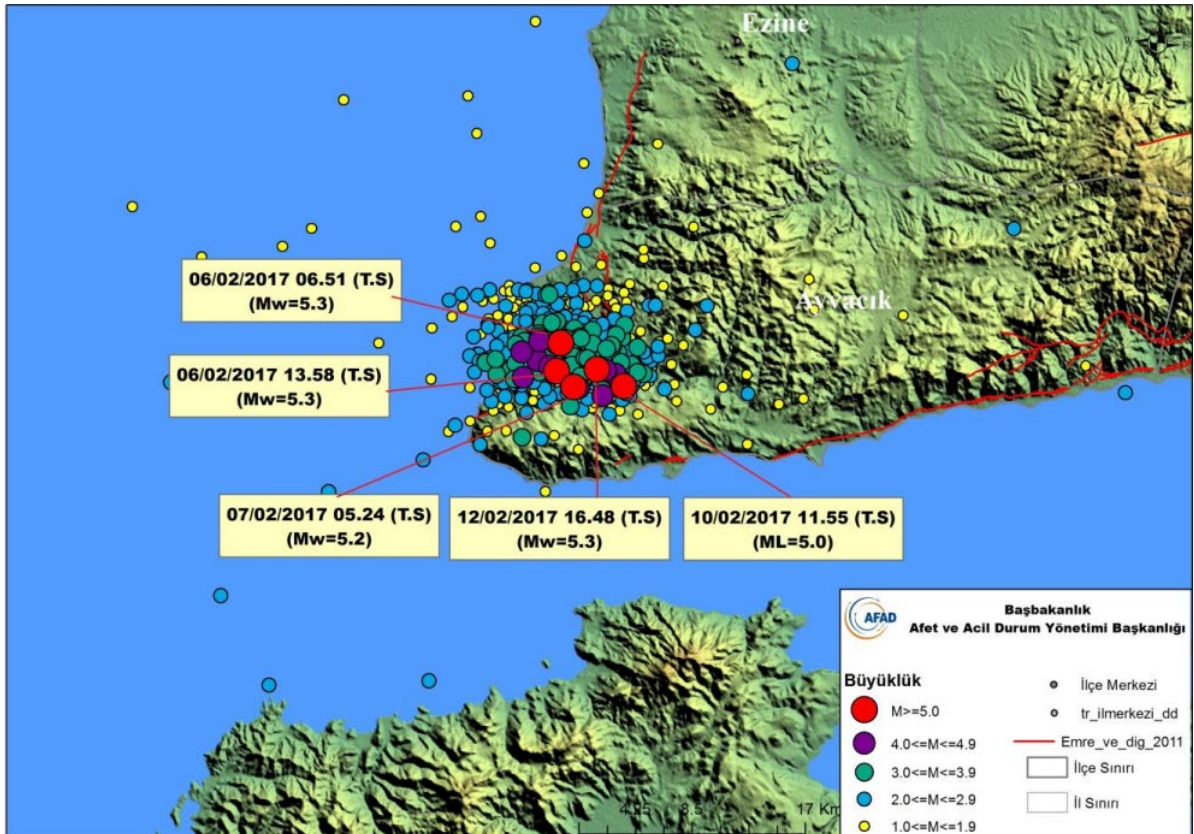
14 Ocak 2017 günü 22:38:59'de meydana gelen depremin büyüklüğü ($M_w=4.4$) belirlenmiş ve aynı gün içerisinde bu deprem öncesinde büyüklükleri 2.0 ile 3.2 arasında değişen 14 adet deprem olduğu belirlenmiştir.

15 Ocak 2017 günü 04:03'de meydana gelen depremin dış merkezinin AFAD Deprem Dairesinden yapılan açıklamaya göre Çanakkale ilinin Ayvacık ilçesinin Taşağıl Köyü'dür. Depremden hemen sonra 66 adet artçı deprem meydana gelmiş ve büyüklükleri 1.1 ile 4.3 arasında değişmektedir.

30 Ocak 2017 tarihinde Biga Yarımadası'nda Ayvacık yakın güneybatısında büyüklüğü $M=4$ olan bir deprem daha kaydedilmiştir.

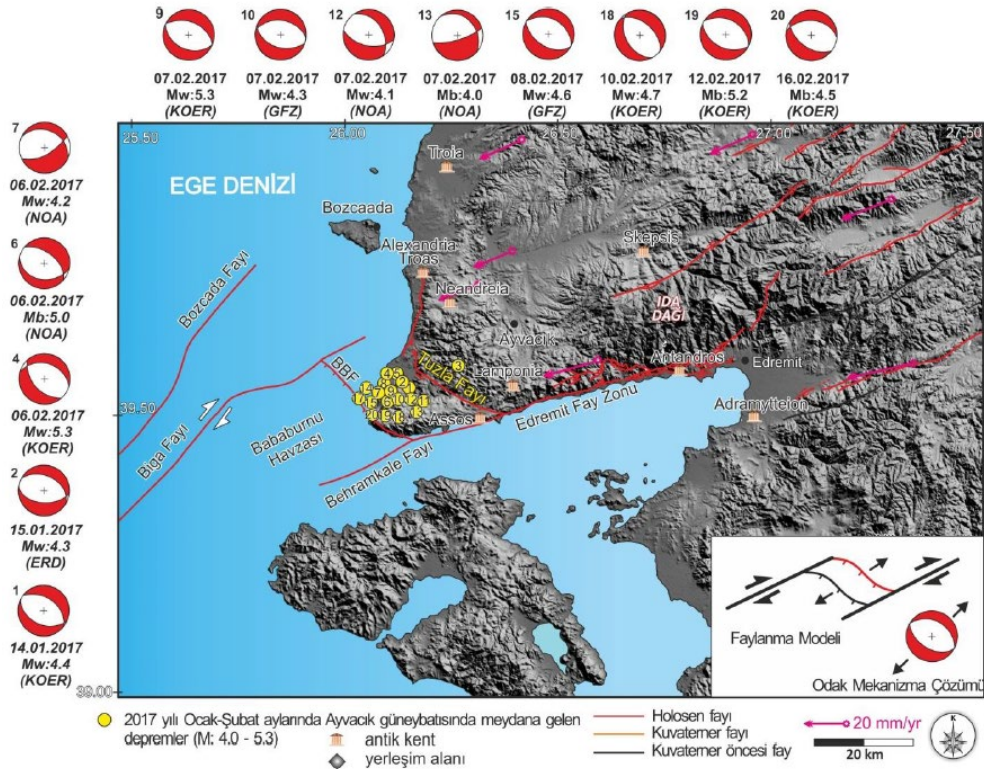
06 Şubat 2017 tarihinde, 03:51:40 UTC saatinde, büyüklüğü 5.3 (M_w) olan depremin dış merkezi Biga Yarımadası'nın batı kenarında meydana gelmiştir. 06-10 Şubat 2017 tarihleri arasında aynı bölgede büyüklükleri 4 ile 5.3 olan 13 adet daha deprem meydana gelmiştir.

12 Şubat 2017 günü, UTC saatine göre 13:48:16'de $M_w:5.3$ büyüklüğünde meydana gelen depremin dış merkezi Çanakkale-Ayvacık ilçesine bağlı Yukarıköy'dür. Bölgede, 13.02.2017 tarih ve saat 09:45 itibariyle 982 civarında artçı deprem meydana gelmiştir (Şekil 2). Bölgede olan depremlerin odak mekanizması çözümleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2: 12 Şubat 2017 Çanakkale-Ayvacık depreminin ($M_w=5.3$) dış merkezi ve 06 Şubat 2017 depremi ile beraber artçı dağılımı (AFAD 2017)

Figure 2: The epicenter of the 12 February 2017 Çanakkale-Ayvacık earthquake ($M_w=5.3$) and the aftershocks with the 06 February 2017 earthquake (AFAD 2017)



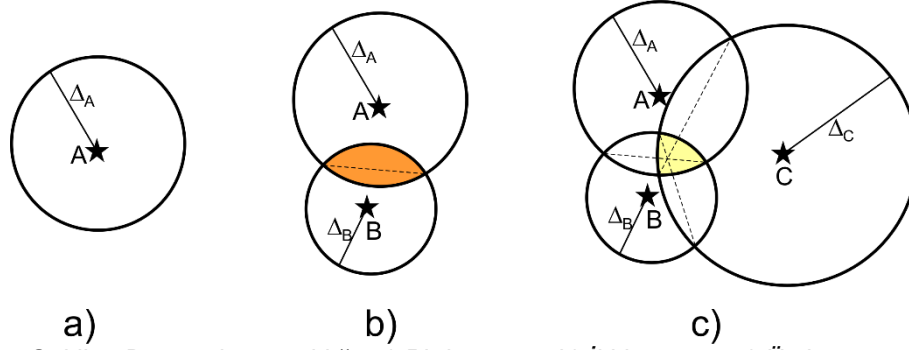
Şekil 3: Tuzla fayı ve Çanakkale-Ayvacak Depremlerinin odak mekanizma çözümleri (Sözbilir ve diğ. 2017)
Figure 3: Tuzla fault and focal mechanism solutions of Çanakkale-Ayvacak earthquakes (Sozbilir et al. 2017)

3. YÖNTEM

3.1) Üç İstasyon Yöntemi

Bir depremin dış merkezini bulmak için, en az üç istasyonda kurulmuş olan sismik kayıtçılardan elde edilmiş sismogramlardan yararlanmak gereklidir. Bir depremin meydana gelmesinden sonra, istasyondaki kayıtçılara sırasıyla hacim dalgaları (P ve S) ve Yüzey dalgaları (Love ve Rayleigh) ulaşır. Sismik ağ içinde yer alan her bir istasyona ulaşan P ve S dalgalarının varış zaman farkı belirlenerek deprem dış merkezinin istasyondan olan uzaklığı hesaplanabilir. Dış merkezini ile istasyon arasındaki uzaklık arttıkça, seyahat uzaklığına bağlı olarak P ve S dalgalarının istasyona varış zamanları artar. Bu nedenle, dalgaların oluştuğu deprem merkezi ne kadar uzak ise, P ve S dalgaları arasındaki zaman aralığı da o kadar uzun olacaktır (USGS 2021).

Sismik yol - zaman grafiğinden yararlanarak bir depremin istasyona olan uzaklığı saptanabilir. Örneğin, Üç istasyon (A, B ve C) sismogram kayıtlarından P ve S dalgaları varış zamanlarından yararlanarak, A istasyonu için, dış merkez uzaklığı 100 km ve Diğer (B ve C) istasyonları için de 50 km ve 200 km elde edildiğini kabul edelim. Harita düzlemi üzerinde her bir istasyon yeri merkez alınarak, elde edilen uzaklıklar yarıçap olacak şekilde çizilen dairelerin kesişme yeri yaklaşık depremin dış merkezini verir (Şekil 4). Şekil 4a'da bir istasyon olması durumunda çember üzerindeki her bir nokta dış merkez noktasına karşılık gelecektir. Şekil 4b' de iki istasyona ait dairelerin kesim noktası (turuncu bölge) ve Şekil 4c' de üç istasyona ait dairelerin kesişme bölgesi (sarı bölge) dış merkez noktasını verecektir. İstasyon sayısı ne kadar artarsa kesişme bölgesi o kadar küçülecektir.



Şekil 4: Dış merkez uzaklığı; a) Bir istasyon, b) İki istasyon, c) Üç istasyon
Figure 4: Epicentral distance for; a) One station, b) Two stations, c) Three stations

4.2) Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Global Optimizasyon yöntemleri olarak bilinen sürü tabanlı bir yöntemdir. Sürüdeki her bir hayvan parçacık (birey) olarak isimlendirilir. 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. PSO, Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından sürüler halinde yaşayan kurt, kuş, ateş böceği ve balık gibi canlı türlerinin sosyal davranışlarından yola çıkarak ve ayrıca yaşamlarını sürdürebilmeleri için besin ararken yaptıkları davranışları izleyerek geliştirilen sürü zekâsına sahip, topluluk temeline dayanan metasezgisel bir yöntemdir. Çoğu zaman besin kaynağının aranıp bulunması sırasında tek başlarına bir şey elde edemeyen bireylerin sürü halinde hareket ederek besin kaynağına ulaşmada daha başarılı olmuşlardır. Gözlemler göstermiştir ki sürüdeki her bir bireyin rastgele hareketi, sürü içindeki diğer bireyleri etkilediği, bu etkilenmeyle beraber sürünün ortak amacına daha kolay ulaştığı görülmüştür.

Metasezgisel yöntemler geliştirilirken matematiksel modellere dayandırılmaya çalışılır. Sürü davranışına benzeyen basit matematiksel modeller oluşturulurken bireylerin üç basit kurala uyduğu kabul edilir. Bunlar, komşularıyla aynı yöne ilerle, komşularına yakın dur ve komşularıyla çarpışmaktan kaçın gibi kuralara dayandırılır.

PSO algoritmasında, çözüm uzayı rastgele bir süreçle oluşturulmuş bir başlangıç topluluğu ile başlar. Bu yöntemde, sürüdeki bütün bireyler araştırma uzayında rastgele dağılırlar ve bireylere konum (x_i) bilgilerinin yanında bir de hız (v_i) bilgisi atanır. Yineleme işlemi her bireyin uygunluk değerinin bir amaç fonksiyonuna göre hesaplanmasıyla başlatılır. Her bir nesilde (yinelemede) hız ve konum bilgileri güncel tutularak araştırma uzayında en iyi konum değerine sahip olmaya çalışılır. Aslında sürü içinde yer alan her bir bireyin konumu jeofizikte bilinmeyen parametreler karşılık gelmektedir (Bkz. 1 ve 2 no'lu eşitlikler).

$$v_{i,d}^{t+1} = \omega * v_{i,d}^t + c_1 * r_1 * (pbest_{i,d} - x_{i,d}^t) + c_2 * r_2 * (gbest_{i,d} - x_{i,d}^t) \quad (1)$$

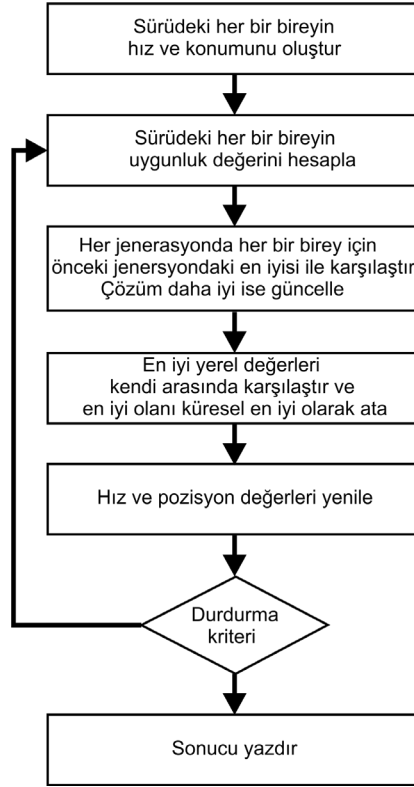
$$x_{i,d}^{t+1} = x_{i,d}^t + v_{i,d}^{t+1} \quad (2)$$

Burada yer alan katsayılar kullanıcının belirlediği parametreleridir. c_1 katsayısı bireyin bilişsel davranışını kontrol ederken c_2 bireyin sosyal davranışını kontrol eder, 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. $pbest$ parçacığın en iyi konum değeri, $gbest$ sürünün en iyi konum değeridir.

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.

Bu süreç, önceden tanımlanmış bir nesil sayısına veya arzu edilen bir uygunluk değerine varıncaya kadar devam eder. Şekil 5'te yukarıda açıklanan algoritma adımları bir akış diyagramı şeklinde verilmektedir.



Şekil 5: PSO parametrelerinin vektör olarak gösterimi
Figure 5: Vector representation of PSO parameters

3. VERİ

PSO algoritmasında veri seti olarak AFAD kayıtlarında yer alan Çanakkale-Ayvacak ilçesinde 06 Şubat 2017 ile 12 Şubat 2017 tarihleri arasında büyüklüğü 5'ten büyük deprem kayıtları kullanılmıştır. 06.02.2017 günü, saat 10:58:02 UTC saatinde M_w :5.3 büyüklüğünde meydana gelen depremin 22 istasyondaki kayıtları ve 07.02.2017 günü, saat 02:24:02 UTC saatinde M_w :5.2 büyüklüğünde meydana gelen depremin 21 istasyondaki kayıtları kullanılmıştır. Ayrıca 10.02.2017 günü, saat 08:55:26 UTC saatinde M_w :5.0 büyüklüğünde meydana gelen depremin 12 istasyondaki kayıtları ve 12.02.2017 tarihli ve saat 13:48:16 'da M_w :5.3 büyüklüğünde meydana gelen depremin 21 istasyondaki kayıtları ele alınarak yorumlanmıştır (Tablo 1). Bu istasyonlarda elde edilen sismogramlardan P ve S varış zamanları okunarak her bir istasyona ait dış merkez yarıçapları belirlenmiştir. Bu parametreler algoritmanın girdisini oluşturmaktadır.

Tablo 1: 06.02.2017-12.02.2017 tarihleri arasında meydana gelen deprem bilgileri
 Table 1: Earthquake information between 06.02.2017-12.02.2017

Tarih	Saat	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)	Sembol	Büyükük	İstasyon sayısı
06.02.2017	10:58:02	39.5303	26.1351	8.72	M _w	5.3	22
07.02.2017	02:24:04	39.5205	26.1510	6.24	M _w	5.2	21
10.02.2017	08:55:26	39.5236	26.1946	7.01	M _L	5.0	12
12.02.2017	13:48:26	39.5336	26.1700	7.00	M _w	5.3	21

4. UYGULAMA

4.1) Parametre kestirimi

Parametre kestirimini elde edebilmek için yapılan çalışmalarda hata enerjisini en küçükleme amaçlayan amaç fonksiyonunun belirlenmesi esastır. Bazı çalışmalarda, gözlenen ile hesaplanan veri arasındaki hata enerjisini hesaplayan amaç fonksiyonu kullanılırken, burada her bir istasyona ait episantr uzaklıkları arasındaki toplam uzaklığın en küçük olmasına dayanan amaç fonksiyonu kullanılmıştır (3 no'lu eşitlik).

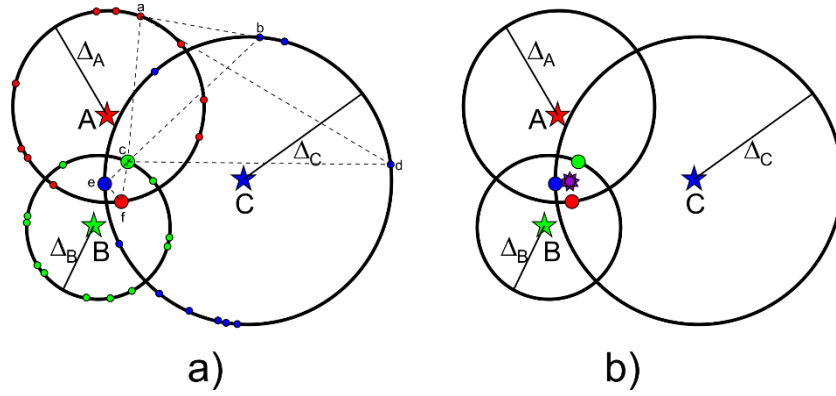
$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

Burada, M istasyon sayısını, x ve y ise o istasyona ait boylam ve enlemi ifade etmektedir. Parametre kestirimi için arama uzayının boyutlarının tanımlanması için her bir parametre için ayrı ayrı alt ve üst sınırların belirlenmesi gerekir. PSO algoritmasında önceden belirlenen parametre aralığı dikkate alınarak rastgele konumlar belirlenerek başlangıç topluluğu oluşturularak süreç başlatılır. Arama uzayında azimut açısı [0,360] derece arasında rastgele üretilerek çember üzerindeki enlem ve boylam değerleri aşağıda verilen denklem çiftiyle üretilir (3 ve 4 no'lu eşitlikler).

$$x_b = xc_b + \Delta * \cos(\alpha) \quad (4)$$

$$y_e = yc_e + \Delta * \sin(\alpha) \quad (5)$$

Burada, α azimut açısını, Δ episantr uzaklığını, xc_b ve yc_e istasyon koordinatlarını, x_b ve y_e parçacığın koordinatlarını ifade etmektedir. A çemberi üzerindeki her bir parçacık, B ve C çemberi üzerindeki tüm parçacıklar 5 denklemlerle verilen hata enerjisi hesaplanmasıyla değerlendirme süreci başlar (Şekil 6). Örneğin, a, b ve c noktaları için hata enerjisi E1; a, d ve c için hata enerjisi E2 ve son olarak ta c, e ve f noktaları için hata enerjisi E3 olduğunu varsayarsak, Şekil 6'da E3 hata enerjisinin en küçük olduğu görülmektedir (Şekil 6a). Hata enerjisinin en küçük olduğu c, e ve f noktalarına ait parametrelerinin aritmetik ortalaması depremin dış merkezini vermektedir (Şekil 6b).



Şekil 6: PSO parametrelerinin vektör olarak gösterimi
Figure 6: Vector representation of PSO parameters

4.2) Model depremin dış merkezinin PSO ile çözümü

4.2.1) Model 1

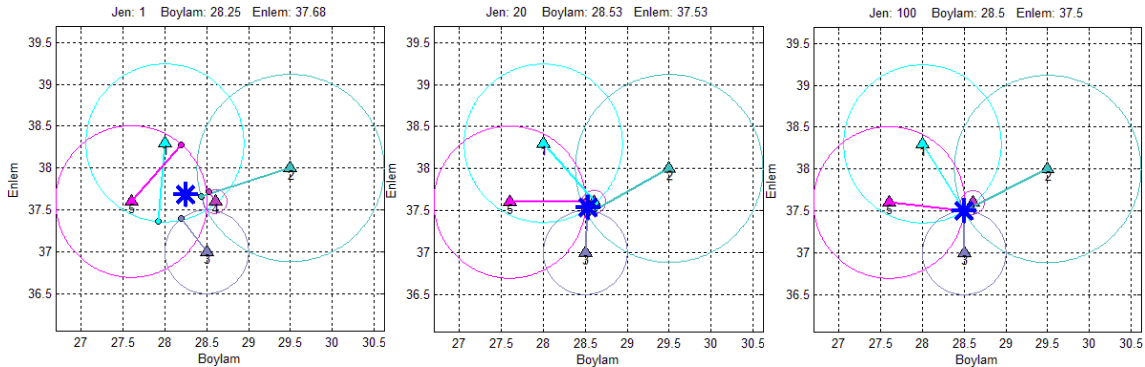
Yöntemi test etmek için varsayımsal olarak sentetik bir veri seti (her bir istasyona gelen P ve S dalgalarının varış zamanları) oluşturulmuştur. Yapay veri setinin oluşturulması bölgedeki kabuk hız modeline bağlıdır. Çeşitli araştırmacılar bölgelere göre kabuk hız modeli belirleme çalışmaları yapmışlardır (Ozer ve Polat 2017a,b). Bu çalışmada sabit kabuk hız modeli belirlenmiş olup bölgenin ortalama hız modeli $V_p=6.0$ km/sn ve $V_p/V_s=1.78$ olarak alınmıştır. Grid araştırma algoritmasını (GA) kullanılarak yapılan çalışmada bölge için sabit hız modeli alınmıştır (Gokalp 2021). Bu veri setinde 4 istasyon belirlenerek istasyonlara ait model parametreleri, ki bunlar konum (enlem, boylam) ve episantr uzaklıkları, Tablo 2'de verilmiştir. Burada model depremin dış merkezi (Boylam, Enlem) sırasıyla 28.5° ve 37.5° olarak belirlenmiş olup model oluşturma sırasında kullanılmıştır.

Tablo 2: Model 1 için istasyon konumları ve episantr uzaklıkları
Table 2: Station locations and epicenter distances for Model 1

İstasyon No	Boylam ($^\circ$)	Enlem ($^\circ$)	Episantr Uzaklığı (km)
1	28.0	38.3	104.673
2	29.5	38.0	124.094
3	28.5	37.0	55.500
4	28.6	37.6	15.651

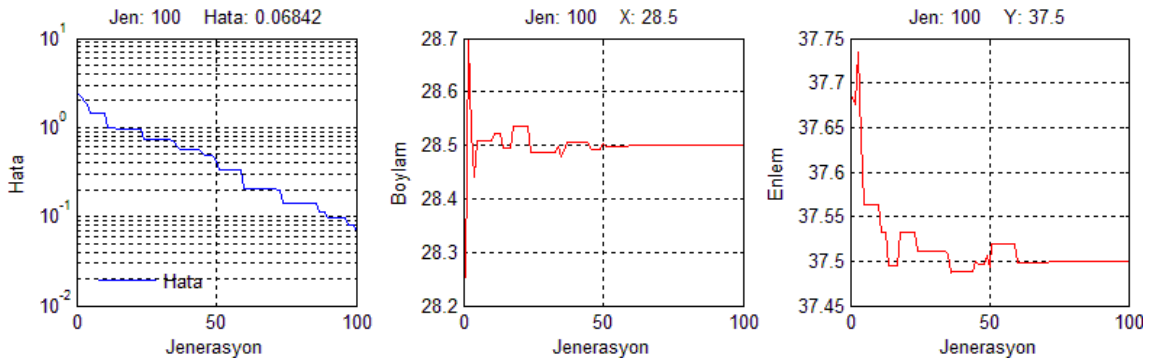
Meta-sezgisel algoritmalarının başarısı probleme göre çoğunlukla o algoritmanın katsayılarına bağlıdır. Burada model parametrelerinin kestirimi için seçilmiş olan PSO algoritmasında kullanılacak olan bu katsayılar (w , $c1$ ve $c2$) Kennedy ve Eberhart (1995) önermiş olduğu katsayılarıdır. Sırasıyla 1, 2 ve 2 olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Parçacık sayısı (Np) ise 40 olarak alınmıştır. Literatür çalışmalarında bu katsayılar parametre seçim (parameter tuning) çalışmaları sonucunda belirlenmektedir. Bunun belirlenmesi yöntemin yakınsama hızını artırıyor ve daha düşük nesil sayılarında çözüme ulaşmasına katkı sağlamaktadır.

Uygulamada, her biri 100 nesilden (J , jenerasyon) oluşan birbirinden bağımsız 10 ayrı bağımsız çözüm arasından en düşük hata enerjisini veren çözüm, parametre çözüm kümesi olarak atanmıştır. PSO algoritmasında yukarıda belirtilen PSO katsayıları ile $Np = 40$ ve $J = 100$ 'den oluşan değer kümesi kullanılarak program çalıştırılmıştır (Şekil 7). Şekil 7a, Şekil 7b ve Şekil 7c, sırasıyla $J=1$, $J=20$ ve $J=100$ nesillere ait çözümleri göstermektedir. $J=1$ çözümünde her bir istasyona ait en iyi konumlar çember üzerinde gösterilmiş olup, 2.214 hata enerjisi ile depremin dış merkezi (28.25,37.68) olarak elde edilmiştir. Burada çözümlerin birbirinden ne kadar uzak olduğu kolaylıkla gözlenmektedir. $J=20$ 'de 0.966 hata enerjisi ile depremin dış merkezi (28.53,37.53) olarak elde edilmiş olup çözümlerin daha da bir araya geldiği görülmektedir. Son olarak $J=100$ 'de 0.068 hata enerjisi ile depremin dış merkezi (28.50,37.50) olarak elde edilmiş olup tam doğru çözüme ulaşılmıştır. Bağlı hata, gerçek değere ne kadar yaklaşıldığının oransal bir gösteren bir hata çeşididir. Bağlı hata mutlak hatanın ($P_{ger}-P_{hes}$) gerçek değere bölümünün 100 ile çarpılarak % bağlı hata değeri (mutlak hata/ $P_{ger} * 100$) elde edilir. Burada P_{ger} ve P_{hes} sırasıyla, gerçek ve hesaplanan değerleri temsil etmektedir. Çözüme ait nesillere ait yüzde bağlı hata değeri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 7: Model 1'e ait depremin dış merkezinin nesillere göre konumları a) $J=1$, b) $J=20$ ve c) $J=100$
Figure 7: Positions of the epicenter of Model 1 earthquake by generation a) $J=1$, b) $J=20$ and c) $J=100$

Parametre çözüm kümesinin değişimlerini daha iyi izleyebilmek için nesillere göre değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8a nesil sayısının artmasıyla hata enerjisinin azaldığını göstermektedir. Şekil 8b ve Şekil 8c'de deprem dış merkezi boylam değeri ile enlem değerinin yaklaşık 60'ıncı nesile kadar salınımlar gösterirken 60'ıncı nesilden sonra duraylanmıştır. Sonuç olarak, kuramsal model veri parametreleri ile kestirilen parametre değerleri arasında iyi bir uyum gözlenmiştir.



Şekil 8: Model 1'e ait depremin dış merkezinin nesil sayısına göre değişimi (a) Hata enerjisi değişimi, (b) Boylam değerlerinin değişimi ve (c) Enlem değerlerinin değişimi

Figure 8: Variation of the epicenter of Model 1 earthquake according to the number of generation a) Change in error energy, b) Change in longitude values, and c) Change in latitude values

Tablo 3: Model 1 için deprem dış merkezinin yüzde bağıl hata miktarları
 Table 3: Percent relative errors of the earthquake epicenter for Model 1

Nesil No	Model Boylam (°)	Model Enlem (°)	Deprem Boylam (°)	Deprem Enlem (°)	Boylam (%) Hata	Enlem (%) Hata	Ortalama (%) Hata
1	28.25	37.68	28.50	37.50	0.877	0.480	0.679
20	28.53	37.53	28.50	37.50	0.105	0.080	0.093
100	28.50	37.50	28.50	37.50	0.000	0.000	0.000

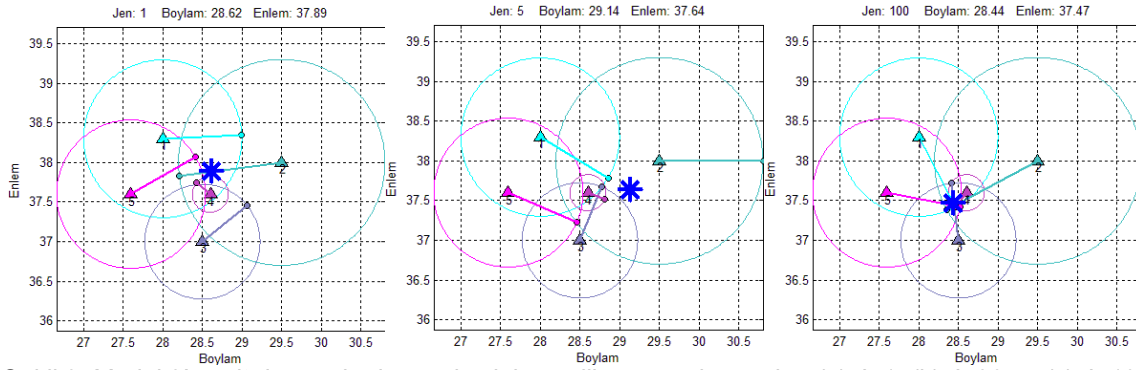
4.2.2) Model 2

Gerçek deprem parametrelerinin çözüm çalışmaları sırasında P ve S dalgası geliş zamanlarının gürültüden dolayı yanlış tespit edilmesi veya buna bağlı olarak episantr uzaklığının hatalı belirlenmesi nedeniyle deprem dış merkezinin yerinin belirlenmesinde hatalara yol açabilmektedir. Bu çalışmada ise gürültünün çözümleri ne kadar etkilediğini test etmek için veriye gürültü eklenmiştir. Model 1'de kullanılan istasyon konumları ile deprem dış merkezi aynı alınmıştır. Kuramsal olarak episantr uzaklıklarının bulunması sırasında aritmetik ortalaması sıfır olan ve ± 15 km standart sapmaya sahip olan rastgele (pseudo random) sayı eklenerek elde edilen gürültülü veri kümesi yaratılmıştır. İstasyon konumları ile gürültülü olarak elde edilen episantr uzaklıkları, Tablo 4'te verilmiştir. Yine benzer şekilde PSO algoritmasının çalıştırılmasında gerekli olan parametreler model 1'de kullanılan parametreler aynen kullanılmış olup model 2 çözümleri Şekil 9'da gösterilmiştir.

Tablo 4: model 2 için istasyon konumları ve episantr uzaklıkları
 Table 4: Station positions and epicenter distances for model 2

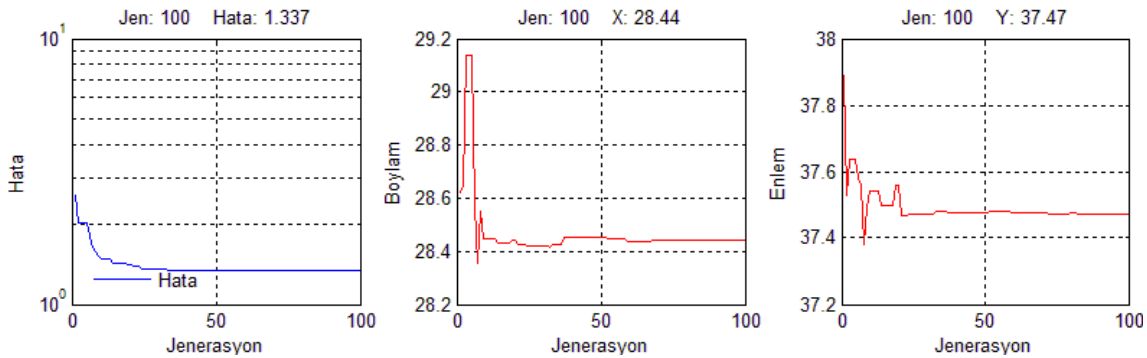
İstasyon No	Boylam (°)	Enlem (°)	Episantr Uzaklığı (km)
1	28.0	38.3	110.685
2	29.5	38.0	144.458
3	28.5	37.0	80.573
4	28.6	37.6	2.5268

Şekil 9a, Şekil 9b ve Şekil 9c, sırasıyla J=1, J=20 ve J=100 nesillere ait çözümleri göstermektedir. J=1 çözümünde her bir istasyona ait en iyi konumlar çember üzerinde gösterilmiş olup, 2.653 hata enerjisi ile depremin dış merkezi (28.62,37.89) olarak elde edilmiştir. Burada çözümlerin birbirinden ne kadar uzak olduğu kolaylıkla gözlenmektedir. J=20'de 1.389 hata enerjisi ile depremin dış merkezi (28.14,37.64) olarak elde edilmiş olup çözümlerin daha da bir araya geldiği görülmektedir. Son olarak J=100'de 1.337 hata enerjisi ile depremin dış merkezi (28.44,37.47) olarak elde edilmiş olup tam doğru çözüme ulaşılmıştır. Çözüme ait nesillere ait yüzde bağıl hata değeri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 9: Model 2'ye ait depremin dış merkezinin nesillere göre konumları (a) $J=1$, (b) $J=20$ ve (c) $J=100$
 Figure 9: Positions of the epicenter of the Model 2 earthquake by generations a) $J=1$, b) $J=20$, and c) $J=100$

Parametre çözüm kümesinin değişimlerini daha iyi izleyebilmek nesillere göre değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10a nesil sayısının artmasıyla hata enerjisinin azaldığını göstermektedir. Şekil 10b ve Şekil 10c'de deprem dış merkezi boylam değeri ile enlem değerinin yaklaşık 60'ıncı nesile kadar salınımlar gösterirken 60'ıncı nesilden sonra duraylanmıştır. Sonuç olarak, kuramsal model veri parametreleri ile kestirilen parametre değerleri arasında iyi bir uyum gözlenmiştir.



Şekil 10: Model 2'ye ait depremin dış merkezinin nesil sayısına göre değişimi (a) Hata enerjisi değişimi, (b) Boylam değerlerinin değişimi ve (c) Enlem değerlerinin değişimi
 Figure 10: Variation of the epicenter of Model 2 earthquake according to the number of generation a) Change in error energy, b) Change in longitude values, and c) Change in latitude values

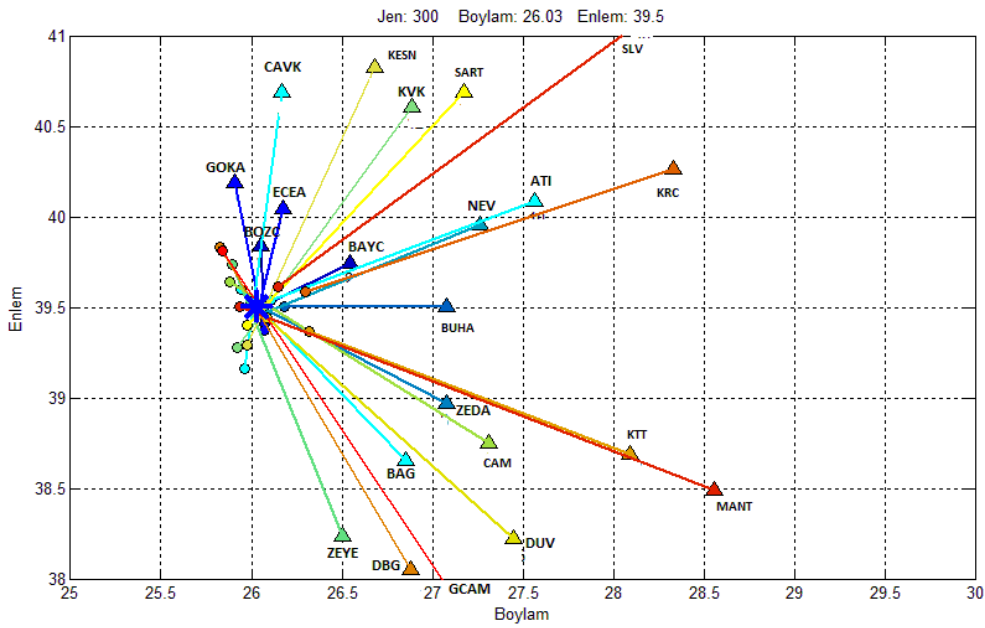
Tablo 5: Model 2 için deprem dış merkezinin yüzde bağıl hata miktarları
 Table 5: Percent relative error amounts of the earthquake epicenter for Model 2

Nesil No	Model Boylam (°)	Model Enlem (°)	Deprem Boylam (°)	Deprem Enlem (°)	Boylam (%) Hata	Enlem (%) Hata	Ortalama (%) Hata
1	28.52	37.76	28.50	37.50	0.070	0.693	0.382
20	28.65	37.42	28.50	37.50	0.561	0.213	0.370
100	28.44	37.47	28.50	37.50	0.211	0.080	0.145

4.3) Çanakkale-Ayvacık Depremlerinin Dış Merkezinin PSO ile Çözümü

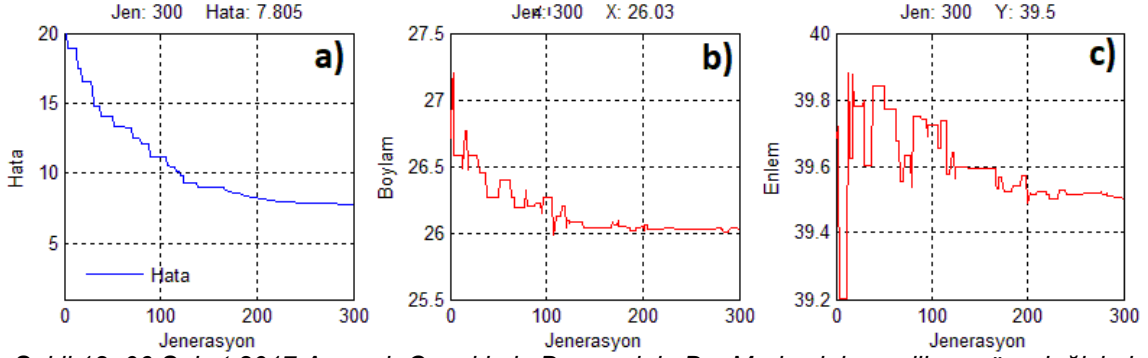
4.3.1) 06.02.2017 Çanakkale-Ayvacık Depremi

06.02.2017 günü, saat 10:58:02 UTC saatinde M_w :5.3 büyüklüğünde meydana gelen depremin 22 istasyondaki kayıtları kullanılmıştır (Tablo 1). Bu istasyonlarda elde edilen sismogramlardan P ve S varış zamanları okunarak her bir istasyona ait dış merkez yarıçapları belirlenmiştir. Bu parametreler algoritmanın girdisini oluşturmaktadır. Model çalışmalarında olduğu gibi Çanakkale-Ayvacık depreminin değerlendirilmesinde de $w=1$, $c_1=2$ ve $c_2=2$ olarak seçilmiştir. Ayrıca, parçacık sayısı 100 ve jenerasyon sayısı 300 olarak belirlenmiştir (Şekil 11). Şekil 11 incelendiğinde istasyonların deprem dış merkezine kuzey, doğu ve güneyinde yer aldığı batısının deniz olması nedeniyle istasyon olmadığı gözlenmektedir. Depremin dış merkezi 300 nesil sonra enlemi 39.50° ve boylamı 26.03° elde edilmiştir.



Şekil 11: 06 Şubat 2017 Ayvacık-Çanakkale Depreminin Dış Merkezine PSO çözümü
Figure 11: PSO solution of the epicenter of the 06 February 2017 Ayvacik-Canakkale earthquake

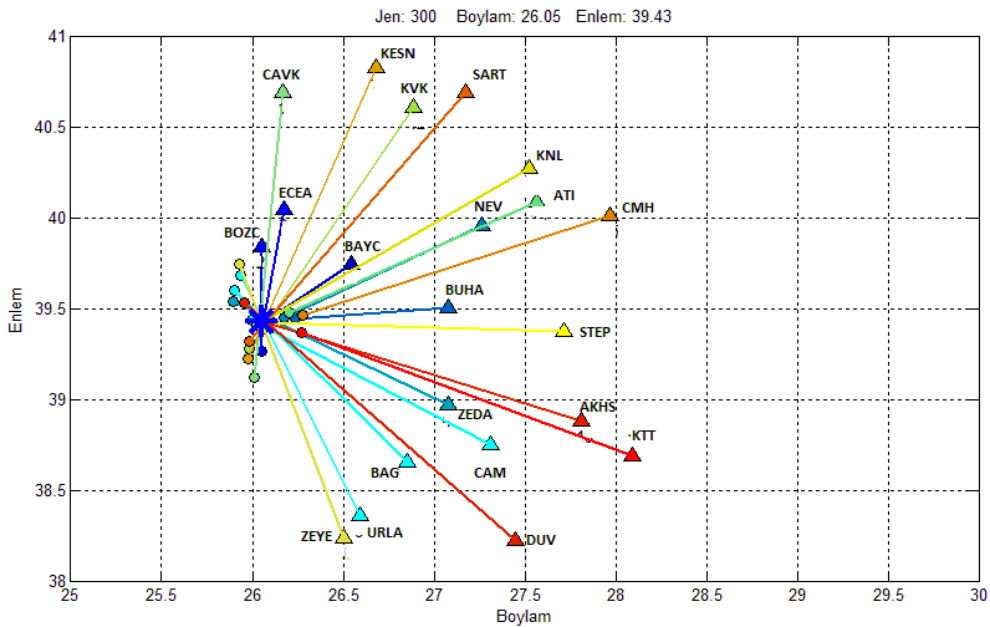
Şekil 12a nesillere göre hata enerjisini göstermekte olup başlangıçta 20 hata enerjisinde başlayıp 300 nesil sonra 7.8 hata enerjisine sahip olduğu görülmektedir. Hata enerjisi 120 nesile kadar hızlı bir düşüş sergilerken 200 nesilden sonra duraylanmıştır. Şekil 12b boylam değerinin nesillere göre değişimini göstermektedir. 27.2° değerinden başlayıp 120 nesilden duraylandığı ve 300 nesilden 26.03° değerine ulaşmıştır. Şekil 12c enlem değerinin nesillere göre değişimini göstermektedir. Başlangıçta 39.2° ile 39.9° arasında salınım gösterirken 200 nesilden sonra duraylanarak 39.50° değerine ulaşmıştır.



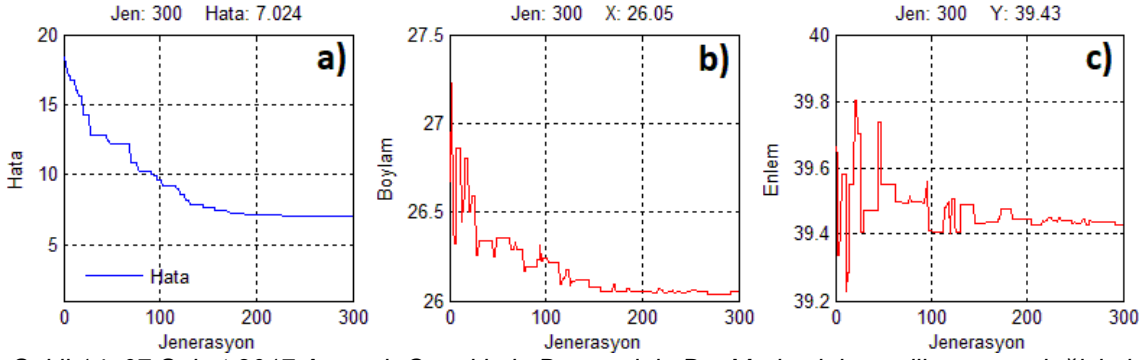
Şekil 12: 06 Şubat 2017 Ayvacık-Çanakkale Depreminin Dış Merkezinin nesillere göre değişimi
Figure 12: Change in the epicenter of 06 February 2017 Ayvacik-Canakkale earthquake according to generations

4.3.2) 07.02.2017 Çanakkale-Ayvacık Depremi

07.02.2017 günü, saat 02:24:02 UTC saatinde M_w :5.2 büyüklüğünde meydana gelen depremin 21 istasyondaki kayıtları kullanılmıştır (Şekil 12). PSO değerlendirme kriterleri yine aynı alınmıştır. Depremin dış merkezi 300 nesil sonra enlemi 39.50° ve boylamı 26.03° elde edilmiştir (Şekil 13). Şekil 14a nesillere göre hata enerjisini göstermekte olup eksponransiyel bir azalma göstermektedir. Başlangıçta 17 hata enerjisiyle başlayıp 300 nesil sonra hata enerjisinin 7.0'lere kadar düşmüştür. Şekil 14b boylam değerinin nesillere göre değişimini göstermektedir. 27.2° değerinden başlayıp 150 nesilden duraylandığı ve 300 nesilden 26.05° değerine ulaşmıştır. Şekil 14c enlem değerinin nesillere göre değişimini göstermektedir. Enlemlerinin değişimi boylam değişimine göre daha salınımlı bir durum sergilemektedir. 200 nesilden sonra duraylanarak 300 nesil sonunda 39.43° değerine ulaşmıştır.



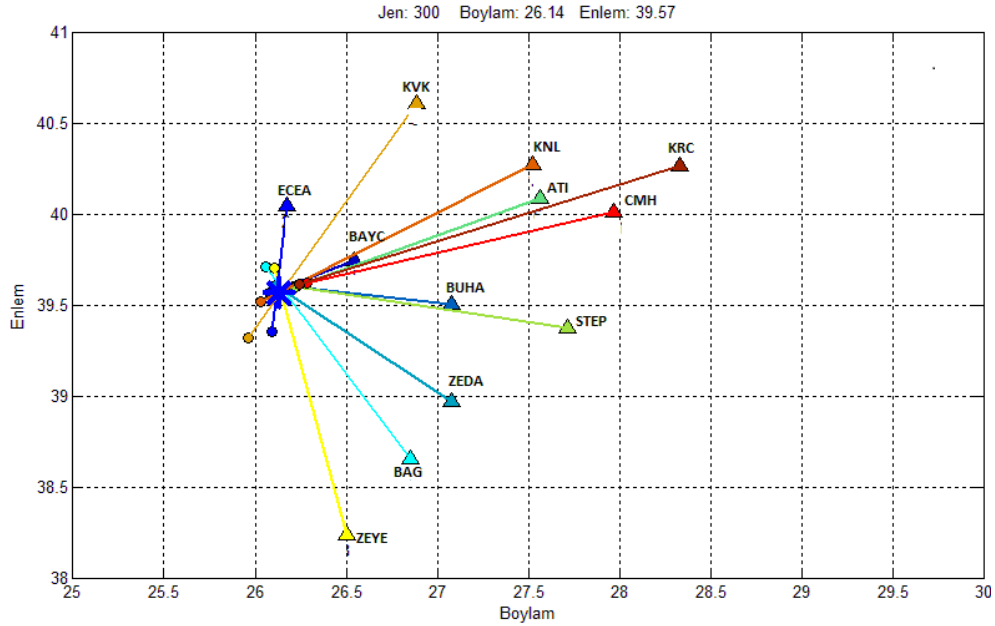
Şekil 13: 07 Şubat 2017 Ayvacık-Çanakkale Depreminin Dış Merkezinin PSO çözümü
Figure 13: PSO solution of the epicenter of 07 February 2017 Ayvacik-Canakkale earthquake



Şekil 14: 07 Şubat 2017 Ayvacık-Çanakkale Depreminin Dış Merkezinin nesillere göre değişimi
Figure 14: Change in the epicenter of 07 February 2017 Ayvacik-Canakkale earthquake according to generations

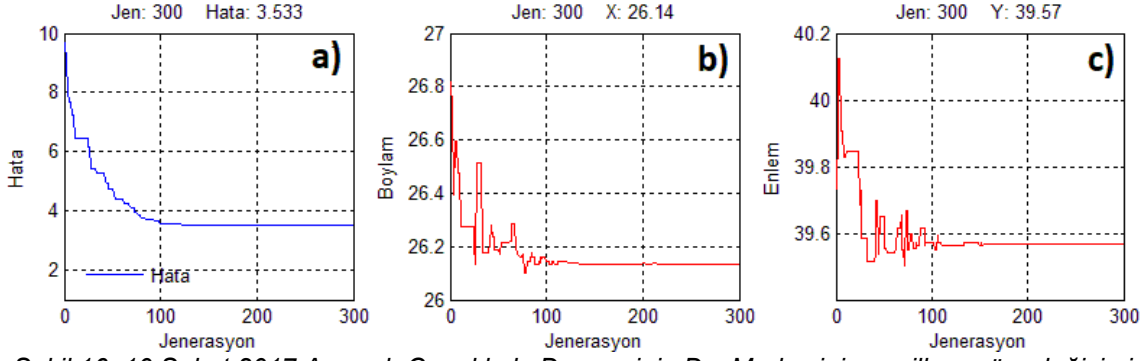
4.3.3) 10.02.2017 Çanakkale-Ayvacık Depremi

10.02.2017 günü, saat 08:55:26 UTC saatinde M_w :5.0 büyüklüğünde meydana gelen depremin 12 istasyondaki kayıtları kullanılmıştır (Şekil 13). PSO değerlendirme kriterleri yine aynı alınmıştır. Depremin dış merkezi 300 nesil sonra enlemi 39.57° ve boylamı 26.14° elde edilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15: 10 Şubat 2017 Ayvacık-Çanakkale Depreminin Dış Merkezinin PSO çözümü
Figure 15: PSO solution of the epicenter of 10 February 2017 Ayvacik-Canakkale earthquake

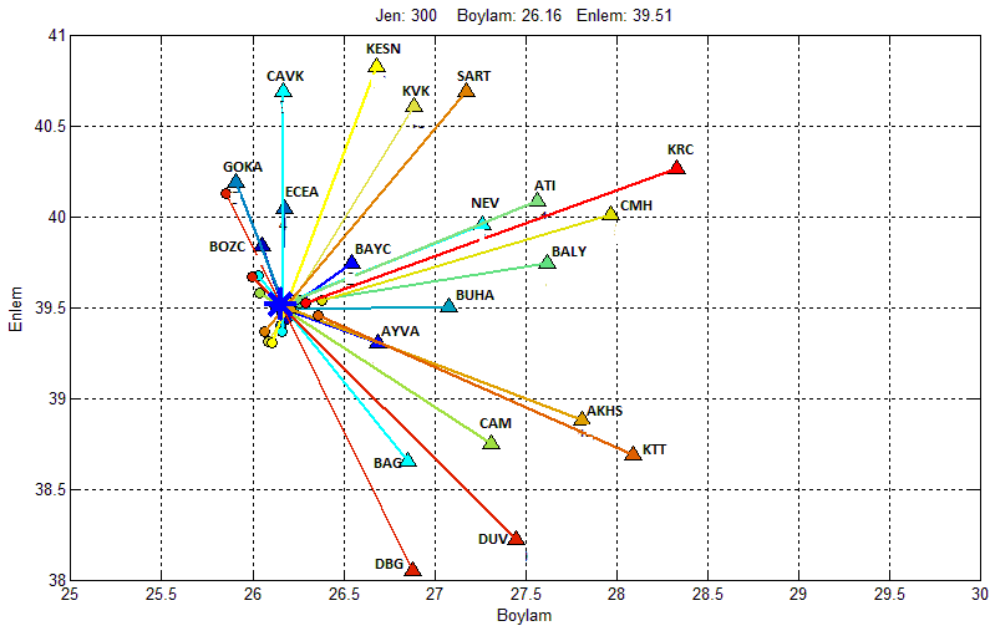
Şekil 16a nesillere göre hata enerjisini göstermekte olup eksponrasiyel bir azalma göstermektedir. Başlangıçta 9 hata enerjisiyle başlayıp 100 nesilden sonra duraylanmış olup ve 300 nesil sonra hata enerjisinin 3.3'lere kadar düşmüştür. Şekil 16b boylam değerinin nesillere göre değişimini göstermektedir. 26.8° değerinden başlayıp 100 nesilden duraylandığı ve 300 nesilden 26.14° değerine ulaşmıştır. Şekil 16c enlem değerinin nesillere göre değişimini göstermektedir. Başlangıçta 40.1° ile başlayıp 100 nesilden sonra duraylanarak 300 nesil sonunda 39.57° değerine ulaşmıştır.



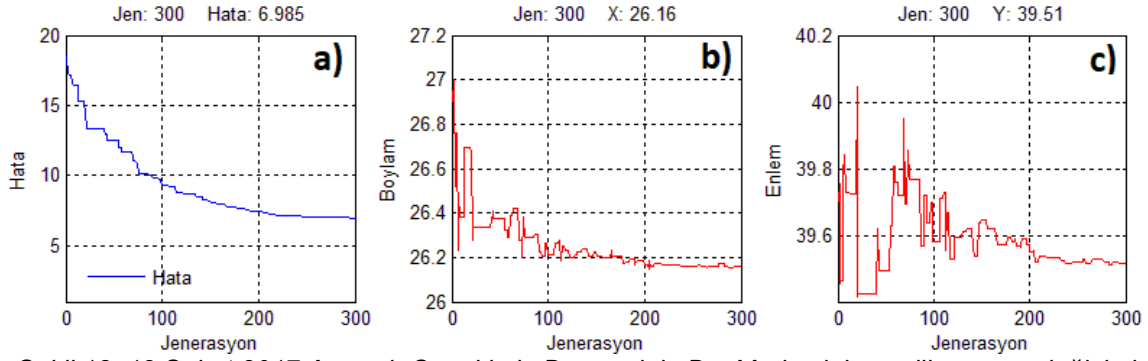
Şekil 16: 10 Şubat 2017 Ayvacık-Çanakkale Depreminin Dış Merkezinin nesillere göre değişimi
Figure 16: Change in the epicenter of 10 February 2017 Ayvacik-Canakkale earthquake according to generations

4.3.4) 12.02.2017 Çanakkale-Ayvacık Depremi

12.02.2017 tarih, saat 13:48:16'de M_w :5.3 büyüklüğünde meydana gelen depremin 21 istasyondaki kayıtları kullanılmıştır. Depremin dış merkezi 300 nesil sonra enlemi 39.51° ve boylamı 26.16° elde edilmiştir (Şekil 17). Şekil 18a nesillere göre hata enerjisini göstermekte olup eksponransiyel bir azalma göstermektedir. Başlangıçta 17 hata enerjisiyle başlayıp 300 nesil sonra hata enerjisinin 3.9'lere kadar düşmüştür. Şekil 18b boylam değerinin nesillere göre değişimini göstermektedir. 27.0° değerinden başlayıp 100 nesilden duraylandığı ve 300 nesilden 26.16° değerine ulaşmıştır. Şekil 18c enlem değerinin nesillere göre değişimini duraylı olmadığını göstermektedir. 300 nesil sonunda 39.51° değerine ulaşmıştır.



Şekil 17: 12 Şubat 2017 Ayvacık-Çanakkale Depreminin Dış Merkezinin PSO çözümü
Figure 17: PSO solution of the epicenter of 12 February 2017 Ayvacik-Canakkale earthquake



Şekil 18: 12 Şubat 2017 Ayvacık-Çanakkale Depreminin Dış Merkezinin nesillere göre değişimi
Figure 18: Change in the epicenter of 12 February 2017 Ayvacik-Canakkale earthquake according to generations

4. BULGULAR

Çanakkale-Ayvacık bölgesinde 06.02.2017-12.02.2017 tarihleri arasında meydana gelen büyüklüğü 5'ten büyük 4 adet depremin yaklaşık 12 ile 22 adet arasında istasyonda kaydedildiği deprem kayıtları kullanılmıştır. Bu verilerden depremin dış merkezi PSO algoritması yöntemi kullanılarak yapılan değerlendirme sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3'te görüleceği üzere 4 adet depremin dış merkezinin PSO algoritması yöntemi kullanılarak yapılan çözüm sonuçları ile AFAD'ın yayınladığı çözüm sonuçları birbirlerine çok yakındır. Yayımlanan 06.02.2017 depreminin dış merkezi (26.1351, 39.5303) ile PSO çözümü (26.03,39.50) bulunmuş olup boylam için yüzde bağıl hata % 0.402, enlem için yüzde bağıl hata %0.077 ve ortalama yüzde bağıl hata %0.239 olarak belirlenmiştir.

Benzer şekilde, 07.02.2017 depreminin dış merkezinin boylam için yüzde bağıl hata %0.386, enlem için yüzde bağıl hata %0.229 ve ortalama yüzde bağıl hata %0.308'dir. Sonuç incelendiğinde küçükte olsa bir farklılık gözlenmiştir

10.02.2017 depremi için değerlendirme sonuçlarına bakıldığında boylam için yüzde bağıl hata %0.208, enlem için yüzde bağıl hata %0.117 ve ortalama yüzde bağıl hata %0.163 bulunmuştur.

Son olarak ta 12.02.2017 depremi için boylam için yüzde bağıl hata %0.038, enlem için yüzde bağıl hata %0.060 ve ortalama yüzde bağıl hata %0.049 elde edilmiştir.

Tablo 6: Çanakkale-Ayvacık depremlerinin dış merkez sonuçlarının yüzde bağıl hataları
Table 6: Percent relative errors of the epicenter results of the Canakkale-Ayvacik earthquakes

Çanakkale (Ayvacık) Depremleri	Deprem Boylam (°)	Deprem Enlem (°)	Hesap. Boylam (°)	Hesap. Enlem (°)	Boylam (%) Hata	Enlem (%) Hata	Ortalama (%) Hata
06.02.2017	26.1351	39.5303	26.03	39.50	0.402	0.077	0.239
07.02.2017	26.1510	39.5205	26.05	39.43	0.386	0.229	0.308
10.02.2017	26.1946	39.5236	26.14	39.57	0.208	0.117	0.163
12.02.2017	26.1700	39.5336	26.16	39.51	0.038	0.060	0.049

5. SONUÇLAR

Bu makalede deprem dış merkezinin bulunması için bir yöntem önerilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda kullanılan yöntemin depremin dış merkezini bulma konusunda başarılı olduğu görülmektedir. Özellikle yapay veri kümesi oluşturulmuş ve çözüm sonucunun yüzde bağıl hatası %0 değeriyle %100'lik bir başarı elde edilmiştir.

Gerçek bir depremin değerlendirilmesi durumunda P ve S kayıtlarındaki olası okuma hataları, buna bağlı olarak episantr uzaklığının yanlış hesaplanması nedeniyle hatalı çözüm sonuçlarının üretilmesi olasıdır. Bu durumu simule etmek için, aynı yapay veri kümesi aritmetik ortalaması sıfır ve ± 15 km standart sapmaya sahip rastgele gürültü eklenerek çözüm yapılmış ve yüzde bağıl hatası %0.145 değeriyle başarılı sonuç elde edilmiştir.

PSO algoritması Çanakkale-Ayvacık depremlerine uygulanmıştır. Depremlerin çözümünden elde edilen deprem dış merkez sonuçları kurumlar tarafından açıklanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Depremlere ait dış merkez koordinatlarının (enlem, boylam) yüzde bağıl hataları ayrı ayrı hesaplanmış ve dört depremde de ortalama yüzde bağıl hata değerleri %0.3 (binde 3) altında olduğu görülmüştür.

Yapılan analizlerde, yüzde bağıl hata oranlarına bakıldığında, PSO algoritması ve diğer çözüm yöntemleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların uyum içinde olduğu, birbirine oldukça yakın ve yüzde bağıl hata oranlarının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak optimizasyon yöntemlerinin depremlerin dış merkezinin çözümünde alternatif bir yöntem olarak PSO algoritmasının kullanılması avantaj sağlayacağı söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan Çanakkale-Ayvacık depremlerine ait değişik istasyonlardan elde edilen P ve S dalgası varış zaman okumaları AFAD Deprem Dairesi Başkanlığının internet veri tabanından alınmıştır. Veri tabanını erişime açtığı ve kullanıma izin verdiği için AFAD'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

AFAD, 2017. 12.02.2017 Ayvacık-Çanakkale Depremi Raporu
Erişim adresi: <http://tdvm.afad.gov.tr>

Ahmadi M.A., Zendejboudi S., Lohi A., 2013. Reservoir permeability prediction by neural networks combined with hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization: reservoir permeability prediction by neural networks, *Geophys Prospect* 61, 582-598

AlRashidi M.R., El-Hawary M.E., 2009. A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems, *IEEE Trans. Evol. Comput.* 13, 913-918

Ambraseys N. ,2001. The earthquake of 1509 in the Sea of Marmara, Turkey, revisited, *Bulletin of the Seismological Society of America* 91(6), 1397-1416

Ambraseys N. 2009. Earthquakes in the Mediterranean and Middle East, a multidisciplinary study of seismicity up to 1900, Cambridge University Press, UK, 947p.

Armaghani D.J., Mohamad E.T., Narayanasamy M.S., 2017. Development of hybrid intelligent models for predicting TBM penetration rate in hard rock condition, *Tunn. Undergr. Space Technol.* 63, 29-43

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* 105, 235-247

Caputo R., Chatzipetros A., Pavlides S., Sboras S., 2012. The Greek database of seismogenic sources (GreDaSS): state-of-the-art for northern Greece, *Ann Geophys.* 55(5),859-894

Carlisle A., Dozier G., 2001. An off-the-shelf PSO: Proceedings of the Workshop on Particle Swarm Optimization, April, Indianapolis, p1-6.

Erişim adresi: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.589.485>

Chen Z., Zhu B., He Y., 2017. A PSO based virtual sample generation method for small sample sets: Applications to regression datasets, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 59, 236-243

Cheng Y.M., Li L., Chi S., Wei W.B., 2007. Particle swarm optimization algorithm for the location of the critical non-circular failure surface in two-dimensional slope stability analysis, *Comput. Geotech.* 34, 92-103

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, p 1-5.

Erişim adresi: <https://www.semanticscholar.org/paper/2D-Gravity-Inversion-Using-Particle-Swarm-Method-Darisma-Said/e32ae8e42b8895a679f898572889dd3713f8d30c>

DAUM, 2017. Ayvacik Depremi Değerlendirme Raporu, Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 22 p.

Erişim adresi: <http://daum.deu.edu.tr>

Donelli M., Franceschini G., Martini A., Mass A., 2006. An integrated multiscaling strategy based on a particle swarm algorithm for inverse scattering problems, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44, 298-312

Emre O., Dogan A., 2010. 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritaları Serisi, Balıkesir Ayvalık (NJ 35-2) Paftası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Essa K.S., 2020. Self potential data interpretation utilizing the particle swarm method for the finite 2D inclined dike mineralized zones delineation, *Acta Geod. Geophys.* 55, 203-221

Essa K.S., Elhussein M., 2018. PSO (particle swarm optimization) for interpretation of magnetic anomalies caused by simple geometrical structures, *Pure Appl. Geophys.* 175, 3539-3553

Essa K.S., Elhussein M., 2020. Interpretation of magnetic data through particle swarm optimization mineral exploration cases studies, *Nat. Resour. Res.* 29, 521-537

Essa K.S., Geraud Y., 2020. Parameters estimation from the gravity anomaly caused by the two-dimensional horizontal thin sheet applying the global particle swarm algorithm, *J. Petrol Sci. Eng.* 193, 2-14

Essa K.S., Munschy M., 2019. Gravity data interpretation using the particle swarm optimisation method with application to mineral exploration, *J. Earth Syst. Sci.* 128, 123

Erişim adresi: <http://doi.org/10.1007/s12040-019-1143-4>

Essa K.S., Mehane S.A., Elhusein M., 2021. Gravity data interpretation by a two-sided fault-like geologic structure using the global particle swarm technique, *Phys. Earth Planet Inter.* 311, 106631

Fernandez-Alvarez J.P., Fernandez-Martinez J.L., Garcia-Gonzalo E., Menendez-Perez C.O., 2006. Application of a Particle Swarm Optimisation (PSO) algorithm to the solution and appraisal of the VES inverse problem, Liege, Belgium, 12-17.

Fernandez Martinez J.L., Mukerji T., Garcia Gonzalo E., Suman A., 2012. Reservoir characterization and inversion uncertainty via a family of particle swarm optimizers, *Geophysics* 77, 1-16.

Garcia-Gonzalo, E., Fernandez-Martinez, J. L., 2014. Convergence and stochastic stability analysis of particle swarm optimization variants with generic parameter distributions, *Applied Mathematics and Computation* 249, 286-302.

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* 30(13), 1658-1658

Godio A., Massarotto A., Santilano A., 2016. Particle swarm optimisation of electromagnetic soundings, 78th Annual international conference and exhibition, European Association of Geoscientists and Engineers, Barcelona, Spain, 1-5.

Erişim adresi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/62/1/012033/pdf>

Godio A., Pace F., Vergnano A., 2020. SEIR modeling of the Italian epidemic of SARS-CoV-2 using computational swarm intelligence. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17, 3535, 1-19

Gokalp H., 2021. Grid araştırma yöntemi ile yerel ve bölgesel depremlerin konumlarının belirlenmesi, *Pamukkale Univ. Muh. Bilim. Dergisi* 27(3), 393-409

Erişim adresi: <https://doi.org/10.5505/pajes.2020.69922>

Grandis H., Maulana Y., 2017. Particle swarm optimization (PSO) for magnetotelluric (MT) 1D inversion modeling, *IOP Conf. Ser. Earth. Environ. Sci.* 62, 012033

Erişim adresi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/62/1/012033>

Jin X., Liu S., Baret F., 2017. Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery, *Remote Sens. Environ.* 198, 105-114

Juang, C.F., 2004. A hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for recurrent network design, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 34, 997-1006

Karacik Z., Yilmaz Y., 1995. Geology of the Ignimbrite Eruptions of Ezine-Ayvacik region, NW Anatolia, Int. Earth Sci. Colloquium on the Aegean Region (IESCA), 415-427

Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/292608313_Geology_of_the_ignimbrite_eruptions_of_Ezine_-_Ayvacik_region_NW_Anatolia

Karacik Z. Yilmaz Y., 1998. Geology of the ignimbrites and the associated volcanoplutonic complex of the Ezine area, Northwestern Anatolia, *J. Volcanol. Geoth. Res.* 85, 1-4

Karcioglu G., Gurer A., 2019. Implementation and model uniqueness of Particle Swarm Optimization method with a 2D smooth modeling approach for Radio-Magnetotelluric data, *J. Appl. Geophys.* 169, 37-48

Kennedy J., Eberhart R.C., 1995. Particle swarm optimization, *IEEE International Conf. on Neural Networks (Perth Australia)*, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1942-1948

Khare A., Rangnekar S., 2013. A review of particle swarm optimization and its applications in Solar Photovoltaic system, *Appl. Soft. Comput.* 13, 2997-3006

Koukouvelas I.K., Aydin A., 2002. Fault structure and related basins of the North Aegean Sea and its surroundings, *Tectonics* 21(5), 1046

Kurcer A., Yalcin H., Utkucu M., Gulen, L., 2016. Seismotectonics of the Southern Marmara Region, NW Turkey, *Bulletin of the Geological Society of Greece* 50(1), 173-181
Erişim adresi: <https://doi.org/10.12681/bqsg.11717>

Kurcer A., Elmaci H., 2017. 06-14 şubat 2017 Ayvacık (Çanakkale) deprem fırtınası saha gözlemleri ve değerlendirme raporu, MTA, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, 26 s.

Liu S., Liang M., Hu X., 2018. Particle swarm optimization inversion of magnetic data: Field examples from iron ore deposits in China, *Geophysics* 83(4), 43-59

Nalbant S.S., Hubert A., King, G.C.P., 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea, *J. Geophys. Res.* 103(24), 469-486

Nyst M., Thatcher W., 2004. New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean, *J. Geophys. Res.* 109, B11406

Özer C., Polat O., 2017a. İzmir ve Çevresinin 1-B (Bir-Boyutlu) Sismik Hız Yapısının Belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 19(55), 147-168
Erişim adresi: <https://doi.org/10.21205/deufmd.2017195512>

Ozer C., Polat O., 2017b. 3-D crustal velocity structure of izmir and surroundings, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32(3), 733-747
Erişim adresi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.337620>

Özyalin S., Kartal R.F., Polat O., 2017a. Odak mekanizmasının parçacık suru optimizasyonu (pso) ile cozumu, 4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim 2017, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
Erişim adresi: [http://www.tdmd.org.tr/TR/pdf/BildiriOzetleriKitabi\(abstracts\).pdf](http://www.tdmd.org.tr/TR/pdf/BildiriOzetleriKitabi(abstracts).pdf)

Özyalin S., Özer Ç., Polat O., 2017b. Yapay Ari Kolonisi yardımıyla episantr tayini: ilksel sonuçları. 4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim 2017, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
Erişim adresi: [http://www.tdmd.org.tr/TR/pdf/BildiriOzetleriKitabi\(abstracts\).pdf](http://www.tdmd.org.tr/TR/pdf/BildiriOzetleriKitabi(abstracts).pdf)

Pace F., Santilano A., Godio A., 2019. Particle swarm optimization of 2D magnetotelluric data, *Geophysics* 84, 125-141

Pallero J.L.G. Fernández-Martinez J.L., Bonvalot S., Fudym O., 2017. 3D gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via Particle Swarm Optimization, *J. Appl. Geophys.* 139, 338-350

Peksen E., Yas T., Kayman A.Y., Ozkan C., 2011. Application of particle swarm optimization on self-potential data, *J. Appl. Geophys.* 75, 305-318

Peksen E., Yas T., Kiyak A., 2014. 1-D DC resistivity modeling and interpretation in anisotropic media using particle swarm optimization, *Pure Appl. Geophys.* 171, 2371-2389

Perez R.E., Behdinan K., 2007. Particle swarm approach for structural design optimization, *Comput. Struct.* 85, 1579-1588

Poli R., 2008. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation, *Journal of Artificial Evolution and Applications* 2008(685175)
Erişim adresi: <https://doi.org/10.1155/2008/685175>

Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., et al., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *Journal of Geophysical Research* 111, B05411

Robinson J., Rahmat-Samii Y., 2004. Particle swarm optimization in electromagnetics, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 52, 397-407

Sindirgi P., Ozyalin S., 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 Tamis-Canakkale, Turkey. (In: Self-Potential Method: Theoretical Modeling and Applications in Geosciences, Editor: Arkoprovo Biswas, Springer CHAM, Berlin/Heidelberg-Germany, 314 p.), 133-153 p.

Song X., Tang L., Lv X., 2012. Application of particle swarm optimization to interpret Rayleigh wave dispersion curves, *J. Appl. Geophys.* 84,1-13

Sözbilir H., Sümer O., Uzel B., Softa M., Tepe C., Eski S., Özkaymak C., Baba A., 2017. 14 Ocak-16 Şubat Çanakkale Ayvacık Depremleri Değerlendirme Raporu, Dokuz Eylül Üniversitesi Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi Diri Fay Araştırma Grubu, İzmir

Sengor A.M.C., Tuysuz O., Imren C., Sakinc M., Eyidogan H., Gorur N., Le Pichon X., Rangin C., 2005. The North Anatolian Fault: A new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, 37-112.

Taymaz T., Jackson J., McKenzie D., 1991. Active tectonics of the north and central Aegean Sea, *Geophys. J. Int.* 106, 433-490.

USGS, 2021.

Erişim adresi: <https://www.usgs.gov/media/images/triangulation-locate-earthquake>

Yin Z.Y., Jin Y.F., Shen J.S., Hicher P.Y., 2018. Optimization techniques for identifying soil parameters in geotechnical engineering: comparative study and enhancement, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 42,70-94.

Wachowiak M.P., Smolikova R., Zheng Y., 2004. An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization, *IEEE Trans. Evol. Computat.* 8, 289-301

Weimerskirch H., Martin J., Clerquin Y., Alexandre P., Jiraskova S., 2001, Energy savings in flight formation, *Nature (London)* 413, 697-698

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*)

Çalışma kapsamında Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından çözümlenen deprem lokasyon bilgileri kullanılmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): Ş.Ö.
- Literatür araştırması (*Literature research*): Ş.Ö.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): Ş.Ö.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): Ş.Ö.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): Ş.Ö.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): Ş.Ö.