



2B ve 3B Yorumlama Teknikleriyle Tuz Gölü'nün Güneybatısında Toplanmış Gravite Verilerinin İncelenmesi

Investigation of Gravity Data Collected in the Southwest of Tuz Lake Using 2D and 3D Interpretation Methods

Oya Tarhan Bal ^{1*} 

¹ İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Büyükçekmece, İstanbul, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: tarhan@istanbul.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 20.12.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 07.07.2021

Atıf şekli/How to cite: BAL TARHAN, O.(2022). 2B ve 3B Yorumlama Teknikleriyle Tuz Gölü'nün Güneybatısında Toplanmış Gravite Verilerinin İncelenmesi. DEUFMD, 24(70), 233-245.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247022

Öz

Gravite yöntemi, çökel havzaların araştırılmasında sıklıkla başvurulan yöntemlerdendir. Bu çalışmada, Tuz Gölü havzasının güneybatısında toplanmış gravite verileri 3B Euler dekonvolüsyonu, 2B yapısal modelleme ve çeşitli 3B modelleme işlemleri kullanılarak incelenmiştir. 3B Euler dekonvolüsyonunun, bölgede bulunan fay ve çizgisellikleri yansıttığı gözlenmiştir. SI=0 için elde edilen nokta kaynak derinliklerinin, genel olarak fay derinlikleri ile tutarlı olduğu gözlenmiştir. 2B yapısal modellemede havzanın yoğunluk karşılığının ortalama $\rho_p = -0.6 \text{ g/cm}^3$ kabul edilmesiyle, bilinen jeolojiyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Gravite verilerinden, düzgülleştiricili 3B ters çözüm ile elde edilen modellerin yanalları belirlemede başarılı olduğu, ancak fayların dalımlarını ve havza derinliğini doğru biçimde belirlemede yetersiz olduğu bilinmektedir. 3B ters çözüm sonucu elde edilen modellerde de bu sorunlar gözlenmiştir. Bu nedenle veriler, geleneksel olmayan 3B modelleme yöntemleri ile de değerlendirilmiştir. Bu yöntemlerin, önceki jeofizik çalışmalarla ve bölge jeolojisiyle daha uygun sonuçlar sağlayabildiği gözlenmiştir. Belirsizlik analizleri, yapı sınırlarında belirsizliğin arttığını, ancak havza içerisinde belirsizliğin görece az seviyede olduğunu göstermiştir. Bu, kullanılan yuvarlatıcı fonksiyonların elde edilen modellerdeki çok çözümlülüğü önemli ölçüde azalttığını işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tuz Gölü, Gravite, 3B Euler dekonvolüsyonu, 2B yapısal modelleme, 3B ters çözüm

Abstract

Gravity method is implemented often for the investigation of sedimentary basins. In this study, the gravity data, collected in the southwest of the Tuz Lake basin are investigated using 3D Euler deconvolution, 2D structural modeling and several 3D modeling algorithms. The 3D Euler deconvolution results are observed to be reflecting the faults and lineations in the area. The point source depths for SI=0 are determined to be generally consistent with the fault depths. In the 2D structural modeling studies, results, coherent with the known geology, are obtained by assuming mean density contrast of the basin $\rho_p = -0.6 \text{ g/cm}^3$. The modeling results obtained from 3D regularized inversions are known to be successfully showing horizontal boundaries, while generally unable to solve basin depths and fault dips correctly. For these reasons, the dataset is also evaluated using

nonconventional 3D modeling methods. These methods are observed to be able to provide results, which are more coherent with the previous geophysical studies and the geology of the area. Uncertainty analysis suggests higher uncertainty at the structure boundaries; however, relatively lower uncertainty levels are observed in the basin. This result implies that the applied smoothing functions significantly decrease the non-uniqueness of the recovered models.

Keywords: Tuz Lake, Gravity, 3D Euler deconvolution, 2D structural modeling, 3D inversion

1. Giriş

Çalışma alanı Tuz Gölü'nün güneybatısında yer almaktadır. Tuz Gölü baseni Türkiye'nin önemli çökel havzalarından biridir. Basitçe, metamorfik temel üzerine istiflenmiş ~10 km kalınlığında çökel ile karakterize edilir [1]. Henüz önemli bir üretim gerçekleştirilememesine rağmen hidrokarbon potansiyeli nedeniyle bölgede gerçekleştirilen çoğu jeoloji ve jeofizik çalışma, hidrokarbon keşfine yöneliktir [2]. Bu nedenle, çalışma alanı çevresinde çok sayıda sismik hat bulunmaktadır ve bu verilere dayanan birçok çalışma yayınlanmıştır, önemli örnekleri [2 - 6]' da bulunabilir.

Gravite verileri, sismik yöntemlere ek olarak, havza özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sıklıkla kullanılan yöntemlerdendir [7-9]. Çalışma alanında gravite verileri kullanılarak daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda, havzanın derinliği, incelenen 2 Boyutlu bir hat boyunca düşey prizmalar kullanılarak modellenmiş ve 7 km' yi bulan çökel kalınlıkları önerilmiştir [10].

Yeraltı yoğunluk dağılımının daha ayrıntılı bir ifadesi 3B modelleme teknikleriyle elde edilmektedir. 3B modelleme, genelde farklı durağanlaştırıcılara sahip ters çözüm işleçleri kullanılarak gerçekleştirilir. Önemlilerinden bazıları [11-13]' de bulunabilir. Son 20 yılda ise, Global Optimizasyon yöntemleri hemen her jeofizik yöntemde uygulanmıştır [14-16] ve gravite verilerinin 3B modellenmesi için de çok sayıda işleç geliştirilmiştir [17-22]. Bu işleçlerin bazılarında, Global Optimizasyon yöntemleri belirsizlik analizleri için de uygulanmıştır [21, 22]. Gravite verilerinin 3B modellenmesi için geliştirilmiş alternatif bir yöntem ise Camacho ve diğ. [23] tarafından geliştirilmiş Growth 2.0 işleçidir. Bu işleç, tek bir prizmadan başlayarak, gözlenen-hesaplanan veri çakışmasını en iyi hale getirene kadar modele yeni prizmalar ekler.

Bu çalışmada, bütün gravite verilerin birden değerlendirildiği 3B modelleme teknikleri

uygulanmıştır. Veriler öncelikle, yuvarlatıcı ters çözüm işleci ile değerlendirilmiştir. Daha sonra, geleneksel olmayan yaklaşımlar olan, Growth 2.0 yazılımında ve bir global optimizasyon yöntemi olan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak 3B modellenmiştir. Karşılaştırma amacıyla verilerin 2B yapısal modellenmesi ve 3B Euler dekonvolüsyonu gerçekleştirilmiştir. 3B modelleme sonucu elde edilen modeller, daha önce yayınlanmış sismik hat ve kuyulara ait bulgularla da kıyaslanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. 3B Euler Dekonvolüsyonu

Euler dekonvolüsyonu, bir pencere ile örneklenen gravite anomalisini nokta kaynak olarak temsil etmeye çalışır ve bu nokta kaynağın pencereye uzaklığını ve derinliğini verir. Farklı jeolojik yapılar için uygun geometriyi sağlayan yapısal indeks (SI) değerleri bilinmektedir. Tablo 1'de farklı SI değerleri ve karşılık geldikleri kaynak modelleri verilmiştir [24].

Tablo 1. Farklı kaynaklar için hesaplanmış SI değerleri [24].

Model	SI
Noktasal kaynak, küre	2
Çizgi, silindir, ince tabakalı fay	1
İnce tabaka kenarı, ince sil, ince dayk	0
Kalın tabaka kenarı	-1

3B Euler dekonvolüsyonu aşağıda verilen denklemin doğrusal en küçük kareler çözümü ile gerçekleştirilir [24].

$$\begin{aligned}
& (x - x_0) \frac{d}{dx} h(x, y, z) \\
& + (y - y_0) \frac{d}{dy} h(x, y, z) \\
& + (z - z_0) \frac{d}{dz} h(x, y, z) = -nh(x, y, z)
\end{aligned} \quad (1)$$

Denklemden, h pencereyi, (x,y,z) pencere içerisindeki ölçülen gravite anomalisinin koordinatlarını, n nokta kaynak olarak temsil edilecek yapıya karşılık gelen SI değerini, (x_0,y_0,z_0) nokta kaynağın koordinatlarını ifade etmektedir.

Bu çalışmada, SI=0 için 3B Euler dekonvolüsyonu gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalarda, SI=0 için 3B Euler çözümlerinin fayları başarılı şekilde gösterdiği hem matematiksel olarak ifade edilmiştir hem de teorik ve arazi verilerine uygulanan çalışmalarla gösterilmiştir. Ayrıca, birçok çalışmada SI=0 için çözümlerin, yataylıktan sapan tabakaların (subhorizontal layers) derinliğine yakınsadığı belirtilmiş ve çözümler Moho derinliği gibi sınırların belirlenmesinde kullanılmıştır [25, 26].

2.2. 2B ve 3B Modelleme

Gravite verilerinin 2B modellenmesi, anomali kaynağının, ölçüm hattına dik yönde sonsuza uzanan prizmatik çokgenler olduğu varsayımıyla, Won ve Bevis [27] tarafından tanımlanan düz çözüm işlemleriyle gerçekleştirilmiştir. Anomalilere sebep olan yapılar, belirli sayıda köşe noktası ile ifade edilmiştir. Gözlenen-hesaplanan veri çakışması istenen seviyeye gelene kadar, yapının yoğunluk karşılığı değeri ve köşe noktalarının koordinatları deneme-yanılma yöntemiyle kullanıcı tarafından değiştirilmiştir.

Jeofizik veriler 3B modellenirken, ortam sıklıkla dörtgen prizmalar ile modellenir. Dörtgen prizmalar için düz çözüm denklemi [28] de bulunabilir. Bu çalışmada kullanılan bütün 3B modelleme işlemleri yeraltını dörtgen prizmalar kullanarak ayrıklaştırmaktadır.

3B ters çözüm yöntemleri, veri kümesinin tamamını destekleyen yoğunluk karşılığı modelleri sağladığı için sıklıkla tercih edilmektedir [29-32]. 3B ters çözüm yöntemleri, genel olarak, farklı jeolojik yapılar arasında yanal yöndeki sınırları başarıyla belirlemektedir. Buna karşın, yapıların dalımlarını hatalı

belirleyebilirler ve yapıları düşey yönde uzatarak yapıların alt sınırlarının belirsiz olmasına neden olabilirler [32].

Jeofizikte çözülmesi gereken problemler genelde aşırı tanımlı ve kötü koşullanmıştır. Bu nedenle, ters çözüm işlemi, farklı düzleştiriciler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu çalışmada kullanılan ters çözüm yöntemi, yuvarlatıcı durağanlaştırıcı ile Tikhonov düzleştiricisi kullanılmaktadır. Gravite ters çözümünde kullanılan denklemler doğrusal olmakla birlikte, hücrelerin alabileceği değerler için alt ve üst değerler tanımlandığında, bu doğrusal ilişki bozulmaktadır. Bu nedenle doğrusal olmayan ters çözüm sıklıkla uygulanmaktadır [33, 34]. Kullanıcı tarafından belirlenen bir başlangıç modelinden yola çıkarak, her bir yinelemede model parametreleri aşağıdaki denkleme göre güncellenir.

$$m_{i+1} = m_i + [\mu(\partial_x^T \partial_x + \partial_y^T \partial_y + \partial_z^T \partial_z) + (WJ_i)^T (WJ_i)]^{-1} (WJ_i)^T W(g - F[m_i]) \quad (2)$$

Denklemden, m , model parametre vektörü; g , gözlenen veri vektörü; $F[m_i]$, mevcut yinelemedeki model parametreleri için düz çözüm (hesaplanan veri); J_i hesaplanan verilerin model parametrelerine göre kısmi türevlerini içeren Jacobian matrisi; W , ağırlık matrisi; ∂_x , ∂_y ve ∂_z , sırasıyla x, y ve z yönlerinde sonlu farklar türev operatörü; μ , yuvarlatıcı ve çakışma arasındaki dengeyi belirleyen Lagrange sayısıdır. Yuvarlatıcı ters çözümde, istenen gözlenen-hesaplanan veri çakışmasını sağlayan en basit model arandığı için, modelleme nispeten yüksek μ sayısından başlatılır ve yinelemelerle birlikte değeri düşürülür.

Bu çalışmada Lagrange sayısının belirlenmesi için soğuma yaklaşımı (cooling approach) kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre ideal Lagrange sayısı aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\mu = \frac{\max(\text{diag}((WJ)^T(WJ)))}{2^{(i-1)}} \quad (3)$$

Denklemden, diag , parantez içerisindeki işlemde edilen kare matrisin köşegenel (diagonal) elemanlarından oluşan vektörü veren işlemidir; i , yineleme sayısıdır. Eğer daha büyük yuvarlatmaya gerek duyulursa, yukarıdaki denklemlerle elde edilen Lagrange sayısı, kullanıcı tarafından belirlenen bir katsayı ile çarpılabilir.

Son 20 yılda, bilgisayarların işlem kapasitelerinin artmasıyla, çok sayıda düz çözüm gerçekleştirilmesini gerektiren global yöntemlerinin jeofizik problem çözümündeki yeri de artmıştır. Bu yöntemler jeofizikte genelde kötü koşullanmış olan kısmi türevler matrisini (Jacobian) ve bu matrisin tersinin alınması işlemini gerektirmediğinden düzgünleştirici fonksiyonellere ihtiyaç duymazlar. Bu nedenle, istenen yapısal özellikleri sağlayabilen modeller daha kolay elde edilebilmektedir. Bu tip işleçlerin bir örneği, Camacho ve diğ. [23] tarafından geliştirilmiş Growth 2.0 gravite modelleme programıdır.

İlgili işleç, olası yoğunluk karşılığında sahip bir prizmayı, modelde olası bir konuma yerleştirir. Araştırmacılar bu işlemi tohumlama (seeding) olarak adlandırmışlardır. Daha sonra, deneme-yanımla yöntemi ile bu prizmaya komşu yeni prizmalar oluşturularak yapı büyütülmektedir. İşlem istenen gözlenen-hesaplanan veri çakışması sağlanana kadar devam ettirilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan son işleç ise, bir Global Optimizasyon yöntemi olan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ile yoğunluk karşılığı modelleri oluşturmaktadır. Yöntem, [15] çalışmasında verilen işlecin 3B Gravite modellenmesi için uyarlanmış şeklindedir.

PSO, en uygun model parametrelerini sağlayana kadar, uygunluğunu sınavacağı modelleri kısmen rastgeleleştirilmiş bir yaklaşımla belirleyen ve güncelleyen bir işleçtir. İşleçte, herhangi i. yinelemede M adet model parametresini içeren N adet model parametre vektörü üretilmektedir.

$$X_i = x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}, \dots, x_{i,N} \quad (4)$$

Buna göre herhangi n. model parametre vektörünün içeriği aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$X_i = x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}, \dots, x_{i,N} \quad (5)$$

PSO, herhangi i. yinelemede modellerin aşağıdaki şekilde güncellenmesi gerektiğini önerir [35].

$$V_{i+1,n} = \chi(V_{i,n} + c_1\phi_1(P_{n,best} - x_{i,n}) + c_2\phi_2(P_{g,best} - x_{i,n})) \quad (6)$$

Burada, i yineleme sayısı, ϕ_1 ve ϕ_2 katsayıları [0,1] arasında düzgün dağılımlı rastgele sayılar, $P_{n,best}$ ile n. model için işlecin elde ettiği en iyi model parametreleri verilmektedir. $P_{g,best}$ ise N adet model içerisinde elde edilmiş en iyi model parametreleridir. χ model parametrelerinin hızlı değişmesini engelleyen sönümlenme katsayısıdır.

$$\chi = 2k / |2 - c - (c^2 - 4c)|^{1/2} \quad (7)$$

Denklemlerde, $c=c_1+c_2$ olarak verilmiştir ve c_1, c_2 katsayılarının değerleri genellikle $c \geq 4$ koşulunu sağlayacak şekilde belirlenir. Bu çalışmada [35]'de önerildiği üzere, $c_1 = c_2 = 2.05$ ve $\chi = 0.7298$ seçilmiştir.

Modellerin bir sonraki yineleme için güncellenmesi aşağıdaki denklemlerle gerçekleştirilir.

$$x_{i+1,n} = x_{i,n} + V_{i+1,n} \quad (8)$$

Bu çalışmada kullanılan yaklaşımda [15], gözlenen-hesaplanana veri çakışmasını sağlama beklenen model parametreleri, model parametre vektörü x' in içeriğinin bir Gauss filtresinden geçirilmiş şeklindedir. Buna göre, yöntemin en küçükleyeceği denklem aşağıdaki şekilde verilir.

$$U = \{ \|Wd - WF[G(X_{i,n})]\|^2 \} \quad (9)$$

Denklemden, W ağırlık matrisi, d gözlenen veriler, G Gauss filtresi, F düz çözüm fonksiyonunu ifade etmektedir. Ters çözümün aksine, model kabalığı (∂m) en küçüklenmek istenen fonksiyona eklenmemektedir. Model parametreleri, istenen Gauss filtre değeri oranında yuvarlatılmaktadır. Algoritma bu nedenle, model kabalığı ve çakışmazlık arasında bir denge aramamaktadır.

PSO yönteminin zaman gereksinimini ve elde edilen sonuçların kalitesini etkileyen en önemli parametreler, popülasyon sayısı (N) ve yineleme sayısıdır. Popülasyon sayısı için genel olarak kabul görmüş bir yaklaşım olmamakla birlikte, [36]'da tanımlanan ve aşağıda verilen denklemden elde edilen sayı uygun olduğu ilgili çalışmada gösterilmiştir.

$$N = 4 + 3 \log(M) \quad (10)$$

Yineleme sayısı, gerçekleştirilen denemelerden sonra en çok 4000 olarak belirlenmiştir; ancak

istenen veri çakışmasının sağlanması durumunda yinelemeler durdurulmuştur. Gauss filtresinin miktarı ise, yüksekten başlatılmış; yinelemeler ilerledikçe değeri düşürülmüştür ve daha kaba modeller elde edilmiştir. Bu durumda, önceki filtre değeri ile elde edilen model, başlangıç modeli olarak kullanılmıştır. Bu işlem her bir 400 yinelemede gerçekleştirilmiştir. Böylece, istenen veri çakışmasını sağlayan yuvarlatılmış (smooth) bir modelin elde edilmesi sağlanmıştır. Düşük model kabalığına sahip (roughness) modellerin aranmasının, çok çözümlülüğü azaltması, bu nedenle elde edilen sonuçların PSO yönteminin rastgele doğasından görece az etkilenmesi beklenmektedir.

PSO ve benzeri yöntemlerle gerçekleştirilen çalışmalarda, yöntem birden fazla defa ve bağımsız olarak uygulanarak, elde edilen modellerin farkının incelendiği belirsizlik analizleri gerçekleştirilmektedir [21, 22]. Bu analizler, elde edilen modellerin geçerliliğinin sınanması için önemlidir. Ancak bu analizlerin zaman maliyeti, çözmeye çalıştığı parametre sayısının fazla olması durumunda oldukça yüksektir.

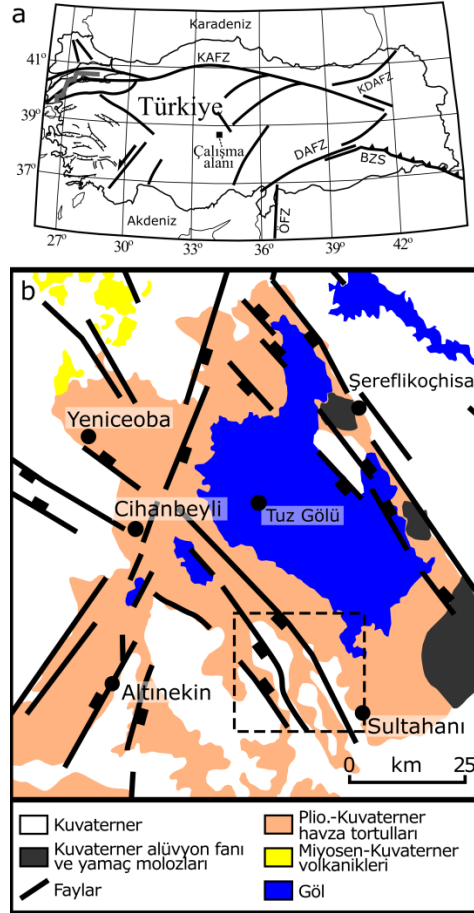
3. Bölgenin Jeolojisi

Tuz Gölü havzası Orta Anadolu'da yer alan, doğuda Kırşehir, Batıda Sivrihisar Bozdağ masifleriyle, kuzeyde İzmir-Ankara Süturu ve Güneyde Ulukışla Baseni ile sınırlanmaktadır; havzanın tabanı ise Paleozoik ve Mezozoik kayalardan oluşmaktadır [1, 2]. Tuz Gölü havzası ~10 km kalınlığında çökel içermektedir [1, 2] ve bölgede hidrokarbon potansiyeline sahip şeyl ve kumtaşları bulunmaktadır [2].

Tuz Gölü baseni karmaşık bir yapıya sahiptir. Özsayın ve diğ. [5] tarafından Tuz Gölü baseni için iki aşamalı bir deformasyon rejimi önerilmiştir. Buna göre, önce Üst Miyosen öncesi Kuzey Kuzeybatı-Güney Güneydoğu yönlü sıkışma, daha sonra Pliyosen'den günümüze kadar devam eden Kuzey-Güney, Kuzeydoğu-Güneybatı yönlü genişleme rejimidir.

Çalışma alanının yüzeyi Kuvaterner alüvyon ve Plio-Kuvaterner çökellerle kaplıdır (Şekil 1), havza çökelleriyse görece sınırlı alanlarda yüzeylenmiştir [37]. Bölge çökellerinin stratigrafisi, sırasıyla, Plio-Kuvaterner kireç taşları, Messiniyen karbonat ve kil taşları, Tortoniyen kireçtaşları, Paleojen kilaşları, marl ve silt taşlarıyla betimlenmektedir. Bu çökellerin altındaysa Üst Kretase metamorfik

kayaçlarından oluşan temel yer almaktadır [4]. Önceki çalışmalarda, havza içerisindeki kayalara derine doğru artan yoğunluk değerleri önerilmiştir. Fernandez-Blanco ve diğ. [4] tarafından değerlendirilen ve Türkiye Petrolleri tarafından sağlanan kuyu verilerine göre, benzer özellikler sismik hız değişimi için de geçerlidir.



Şekil 1. a) Türkiye'nin aktif tektoniğini kontrol eden faylar ve çalışma alanının konumu (KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, KDAFZ: Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu, BSZ: Bitlis Sütur Zonu, ÖFZ: Ölüdeniz Fay Zonu). b) Çalışma alanı ve çevresinin basitleştirilmiş jeolojisi. Çalışma alanının sınırları siyah kesik çizgi ile gösterilmiştir.

Tersakan Sultanhani Fay Zonu'nun (TSFZ) bir bölümü de çalışma alanı içerisinde yer almaktadır [38]. ~70 km uzunluğundaki TSFZ'nin çalışma alanı içerisindeki fayları, normal ve doğrultu atımlı bileşenlere sahip

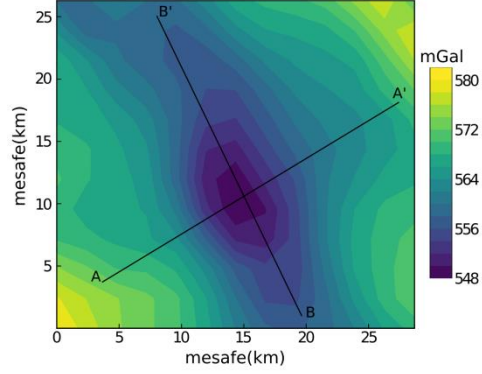
faylar olarak betimlenmişlerdir [4, 5]. Fernandez-Blanco ve diğ. [4] çalışmasında, bu fay zonu Sultandağı Fay Zonu (SFZ) olarak adlandırılmıştır ve havza gelişimini kontrol eden bir fay olarak nitelemiştir. Bu fay zonu, iki ana koldan ve bu iki fayın arasında gelişen daha küçük faylardan oluşmaktadır. TSFZ, çalışma alanı çevresinde Plaeosen birimlerin derinliğini önemli şekilde artmasına sebep olmaktadır [4]. Aydemir ve Ateş [3], bu bölgede basenin “kanal benzeri” bir görünüme sahip olduğunu ve basenin en derin yerinde 5.5 km derine kadar ulaşabildiğini belirtmiştir.

4. Bulgular

Çalışma alanına ait gravite verileri (Şekil 2), gerçekleştirilecek 3B modelleme çalışmalarıyla kıyaslayabilmek için öncelikle A-A' ve B-B' hatları boyunca 2B modellenmiştir. Önceki çalışmalardan [10, 39] yola çıkarak çökellerin ortalama yoğunluk karşıtlığının $\rho_p = -0.6 \text{ g/cm}^3$ olduğu varsayılmıştır. Bu değer için elde edilecek değerlerin eski çalışmalarla ve bölge jeolojisiyle uyumlu olması beklenmektedir. Modelleme işlemi, her iki hatta gözlenen-hesaplanan veri çıkması istenen seviyeye ulaşana kadar deneme-yanılma ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme sonucunda, metamorfik temel en fazla 5km civarında elde edilmiştir (Şekil 3). Sadece B-B' hattının en başında daha büyük bir derinlik değeri modelde yer almaktadır, ancak bu nokta çalışma alanının kenarında yer aldığından ve yeterince ölçü tarafından desteklenmediği için göz ardı edilmiştir. A-A' hattında 2B modelin merkezinde gözlenen derinlik artışı ise [3]' de bu alan için tarif edilen, 5km derine kadar inen kanal benzeri yapı olarak yorumlanmıştır.

Elde edilen değerler, Aydemir ve Ateş [3]' in gerçekleştirdiği jeofizik yorumlarla, Fernandez-Blanco ve diğ. [4] tarafından sağlanan Türkiye Petrolleri' nin TG-6 kuyusuna ait verilerle ve sismik hatlarla kıyaslanmıştır. TG-6 kuyusu,

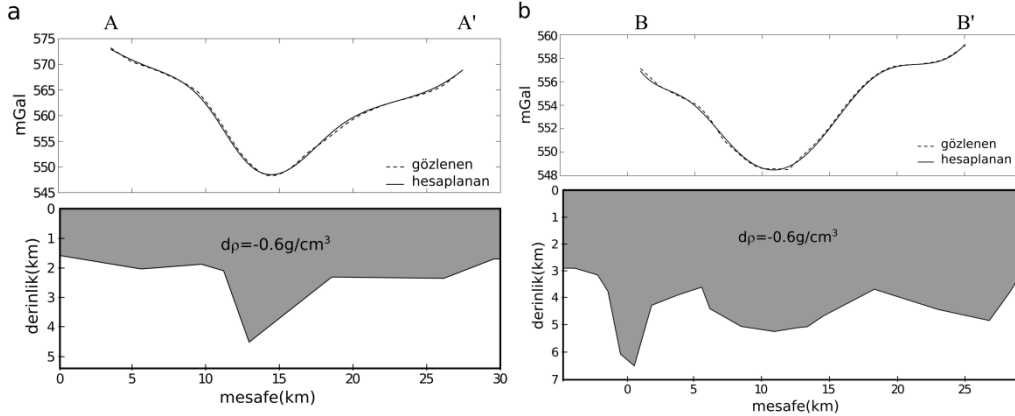
çalışma alanının yakınında yer aldığı için elde edilen değerlerin de benzer olması beklenmektedir. İlgili kuyuda, metamorfik temelin 4690 m derinlikte olduğu bilgisi verilmiştir. Ayrıca, çalışma alanı çevresinde basen derinliğinin 5.5 km'ye ulaştığı belirtilmiştir [3]. Bu değerler, modelleme sonuçlarına yakındır.



Şekil 2. Çalışma alanına ait düşey bileşen gravite verisi ve 2B modelleme için belirlenen hatlar.

Bölge jeolojisinden bilindiği üzere, TSFZ' nin iki ana kolu çalışma alanının merkezinde, GD-KB uzanımlı olarak yer almaktadır (Şekil 1). A-A' hattı boyunca elde edilen 2B modelde, fayların metamorfik temel topografyasında neden olduğu değişim gözlenmektedir. Bu fayların konumunu ve uzanımını daha detaylı göstermek için verilerin trendi temizlenmiş (Şekil 4) ve $SI=0'$ a karşılık gelen 3B Euler dekonvolüsyonu sonuçları Şekil 5'de verilmiştir.

Basenin derinliğinden dolayı, veriye etkisi görece yüksek dalgaboyludur. Bu anomalinin veriden atılmasının önüne geçmek için sadece doğrusal trend analizi uygulanmıştır. Şekil 5'de, 3B Euler dekonvolüsyonu çözümlerinin fayların genel gidiş doğrultusunu yansıttığı görülmektedir.



Şekil 3. A-A' ve B-B' hatları boyunca gözlenen verilerin 2B yapısal modellenmesi.

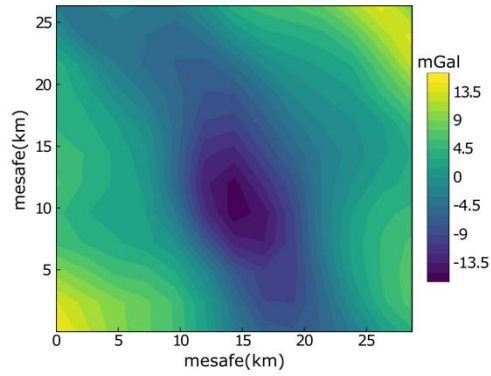
Şekil 5'de Euler çözümlerinin en çok 1-2 km arasında derinlikleri işaret ettiği gözlenmektedir. Buna karşılık olarak, A-A' hattının güneyinde yer alan sismik yansıma kesitinde [4], üst sınırı neojen birimlerin tabanına kadar uzanan fayların 1-2 km derinde birim kalınlıklarını önemli derece etkilediği görülmektedir. Ayrıca, 3B Euler çözümleri GD-KB uzanımlı bu üç fay kolunu birbirine bağlayan GB-KD uzanımlı bir başka çizgiselliği daha işaret etmektedir.

2B modelleme ve 3B Euler dekonvolüsyonundan yola çıkarak gerçekleştirilen bu yorumlamalardan sonra, veriler farklı 3B modelleme yöntemleri ile değerlendirilmiştir. 3B modelleme yöntemleri uygulanırken, çakışmazlık ölçütü olarak RMS hata kullanılmıştır.

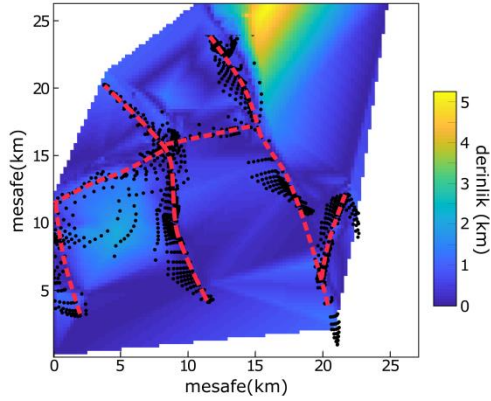
$$RMS = \left(\frac{((W(g-F[m]))^T((W(g-F[m])))}{ng} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Denklemden, g gözlenen veri vektörü; $F[m]$ düz çözüm sonucu elde edilen, hesaplanan veri vektörü; W , veri ağırlık matrisi; ng , veri vektörünün eleman sayısıdır.

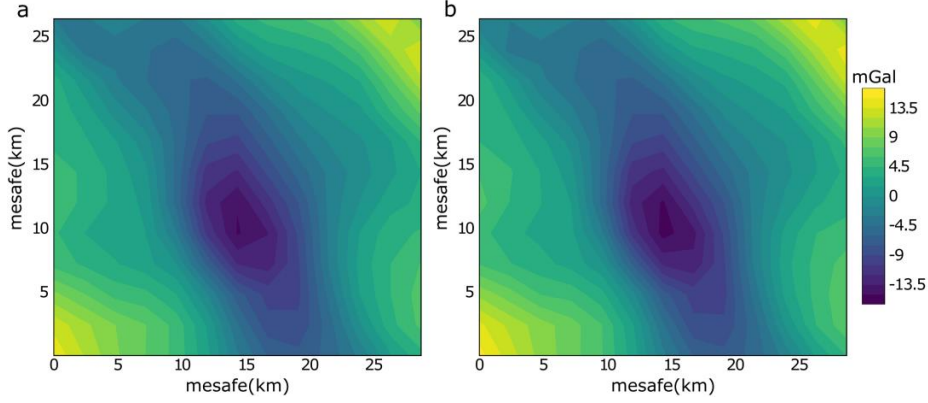
Öncelikle, denklem (2) ile yuvarlatıcı ters çözüm işleci kullanılmıştır (Şekil 6, 7) ve sonuçları yorumlanmıştır.



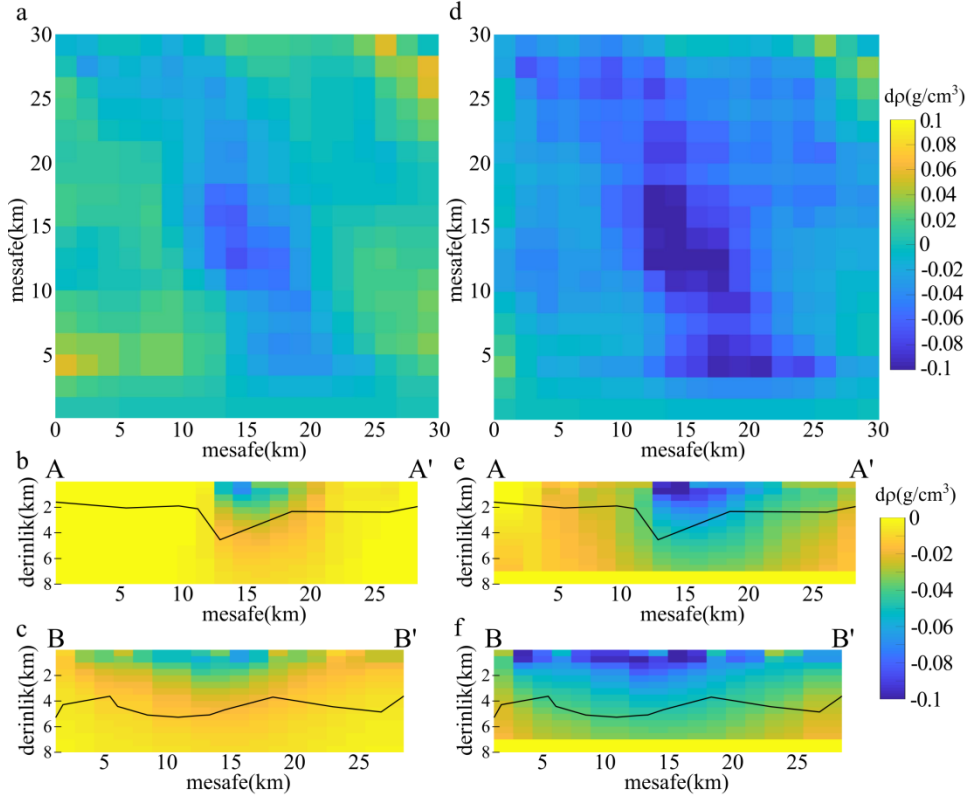
Şekil 4. Trendi temizlenmiş gravite verileri



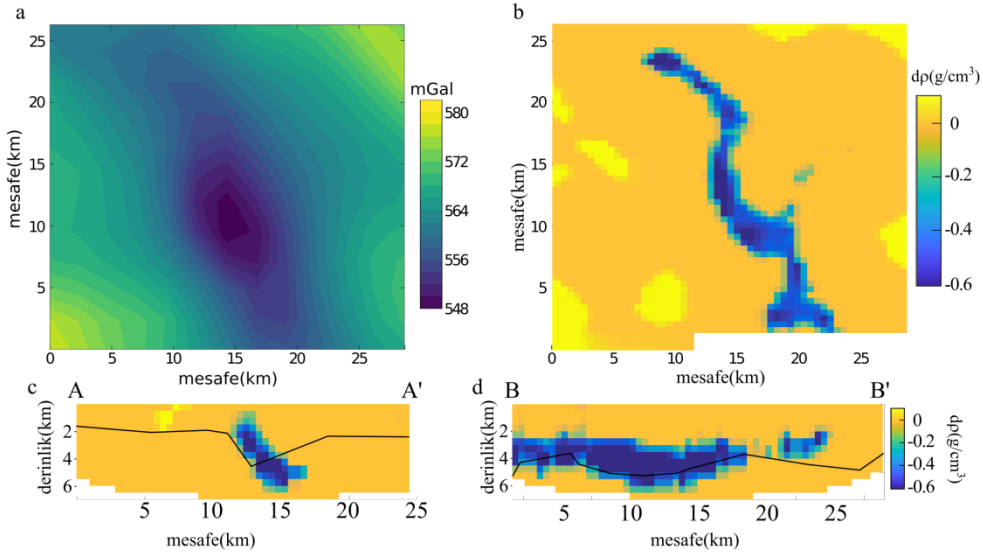
Şekil 5. 3D Euler dekonvolüsyonu sonucu SI=0 için elde edilen noktaların dağılımı, derinlik haritası ve belirlenen çizgisellikler.



Şekil 6. a) Bütün model parametrelerinin serbest olması durumu için 3B ters çözüm sonucunda elde edilen modele ait hesaplanan veriler (1 mGal RMS), b) $z \geq 7$ km için +0.13 yoğunluk farkının sabitlenmesi durumunda elde edilen modele ait hesaplanan veriler (1 mGal RMS).



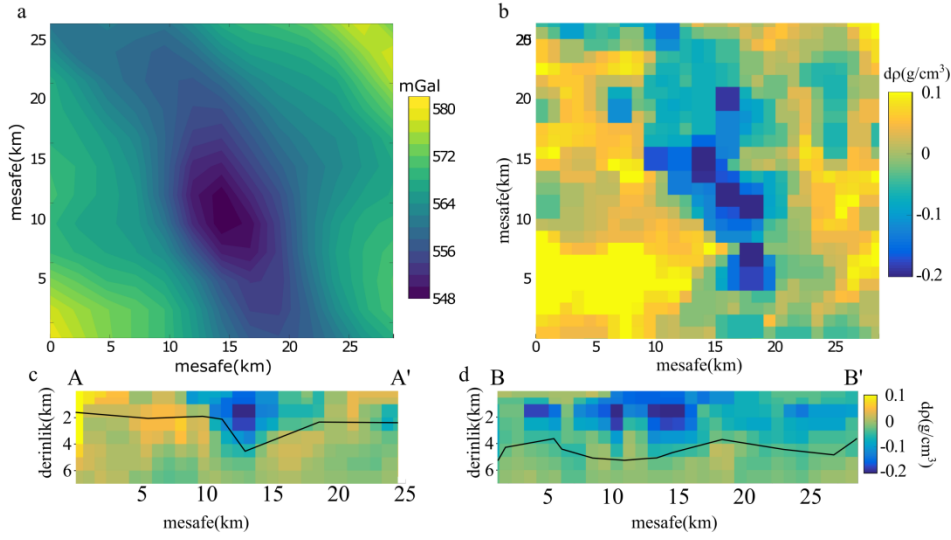
Şekil 7. Bütün model parametrelerinin serbest olması durumu için 3B ters çözüm sonucunda elde edilen modele (1 mGal RMS) ait $z=1$ km derinlikten alınmış kat haritası (a), A-A' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (b) ve B-B' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (c). ≥ 7 km için +0.13 yoğunluk farkının sabitlenmesi durumunda elde edilen modelden $z=1$ km derinlikten alınmış kat haritası (d), A-A' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (e) ve B-B' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (f). Şekilde, 2B yapısal modelleme çalışmalarından elde edilmiş derinlikler siyah çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 8. Growth 2.0 işleci kullanılarak elde edilmiş modele ait hesaplanan veriler (a), elde edilen modele ait $z=2\text{km}$ için kat haritası (b), A-A' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (c) ve B-B' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (d). Şekilde, 2B yapısal modelleme çalışmalarından elde edilmiş derinlikler siyah çizgi ile gösterilmiştir.

Yuvarlatıcılı ters çözüm için çalışma sahası x , y ve z yönlerinde $20 \times 20 \times 18$ dörtgen prizma ile ayrıştırılmıştır. Parametre sayısı, veri sayısından fazla olduğu için problem eksik tanımlıdır; dolayısıyla çok çözümlülük yüksektir. Buna karşın, tanımlanan en büyük ve en küçük yoğunluk karşıtlığı değerleri ve yuvarlatıcı fonksiyon çok çözümlülüğü sınırlandırmaktadır. Modelleme esnasında Lagrange parametresi (denklem 2) olabildiğince yüksek tutularak veriyi destekleyen en yüksek yuvarlatma miktarı hedeflenmiştir. Yuvarlatıcılı gravite ters çözüm işleminde, model parametrelerinin (yoğunluk karşıtlığı) hesaplanan verilere göre türvelerinin en yüksek olduğu yerler, yeryüzüne yakın olan bölümdür. Bu nedenle, derinlik ağırlıklandırması kullanılmadıkça yapılar yüzeye yakın elde edilmektedir [12]. Tuz Gölü havzasında, en düşük yoğunluk karşıtlığı değerleri yüzeye daha yakın olduğundan ve derine doğru artması gerektiğinden, derinlik ağırlıklandırması uygulanmamıştır. İşleç, gözlenen-hesaplanan veri çakışması istenen seviyeye ulaştığında durdurulmuştur (Şekil 6a).

Şekil 7 a, b, c' de verilen modelleme sonuçlarına göre, düşük yoğunluk karşıtlığına sahip bölüm, 2B modelleme sonuçlarına (Şekil 4) ve bölge yakınındaki sismik hatlara göre [4] oldukça sığdır. Bunun sebebi, ters çözüm işlecinin neredeyse hiç pozitif yoğunluk karşıtlığı sağlamamasıdır. Bu nedenle, Türkiye Petrolleri tarafından daha önce oluşturulmuş yoğunluk modellerinden faydalanarak ve ortalama arka plan yoğunluğu 2.67 g/cm^3 varsayılarak $z \geq 7 \text{ km}$ için $d\rho = +0.13$ yoğunluk farkı sabitlenmiştir. Ters çözüm işleci yine istenen gözlenen-hesaplanan veri çakışması sağlanana kadar devam ettirilmiştir (Şekil 6b). Elde edilen modelin (Şekil 7d, e, f) bölge jeolojisine daha uygun olduğu gözlenmiştir. Ancak bu model de yuvarlatıcılı ters çözüm işlecinin bazı olumsuz etkilerini yansıtmaktadır. Elde edilen modelde, düşük yoğunluk karşıtlığına sahip bölgenin alt sınırı çok belirsizdir. Çalışma alanında bulunan iki ana fay kolunun etkilerinin modele yansımış olduğu gözlenmektedir, ancak çalışma alanının GB çeyreğinde yer alan GD-KB uzanımlı üçüncü fay net bir şekilde belirlenememiştir.



Şekil 9. Verilerden PSO işleci kullanılarak elde edilmiş modele ait (1 mGal RMS) hesaplanan veriler (a), elde edilen modele ait $z=2\text{km}$ için kat haritası (b), A-A' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (c) ve B-B' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (d). Şekilde, 2B yapısal modelleme çalışmalarından elde edilmiş derinlikler siyah çizgi ile gösterilmiştir.

Yuvarlatıcılı ters çözüm sonuçları yapı sınırları konusunda yeterli bilgiyi sağlayamadığı için, daha net yapı sınırları sağlayabilen ve matrislerin kötü koşullanmasından etkilenmeyen, geleneksel olmayan modelleme yöntemleri uygulanmıştır. İlk önce, Camacho ve diğ. [23] tarafından geliştirilen Growth 2.0 işleci kullanılmıştır. İşleç ve bağlı olduğu bilgisayar programı kullanılırken, anomaliye sebep olan düşük yoğunluğa sahip yapının $d\rho = -0.6 \text{ g/cm}^3$ kadar yoğunluk karşıtlığına sahip olduğu belirtilmiştir. İşleç, yeraltı modeline, istenen gözlenen-hesaplanan veri çakışması sağlanana kadar (Şekil 8a) prizmalar eklemiş ve Şekil 8 b, c, d' de verilen yoğunluk karşıtlığı modelini vermiştir.

Elde edilen modelde, düşük yoğunluk karşıtlığına sahip yapının alt sınırının 2B modelleme sonuçlarıyla ve bölge çevresindeki sismik hatlarla görece uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak yapının üst sınırı çok derinde yer almaktadır. Bu, işlecin ürettiği modellerin, çökellerin düşey yönde artan yoğunluk değerlerini yansıtmamasının sonucudur. Ayrıca, görece yüksek yoğunluk karşıtlığına sahip ($d\rho = -0.6 \text{ g/cm}^3$) bu yapının yüzeye daha yakın olabilmesi için yoğunluk karşıtlığının azaltılması gerekmektedir. Dolayısıyla, Growth 2.0 işleci ile elde edilen

modele göre, 3B modeller, 2B modeller ile aynı yoğunluk karşıtlığı değerini desteklememektedir. Buna karşın, keskin yapı sınırlarına izin vermesi nedeniyle havza derinliğinin 3B değişimini sağlama konusunda işlecin oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

Veriler, son olarak, bir Global Optimizasyon yöntemi olan PSO işleci ile değerlendirilmiştir. Modelleme için çalışma sahası $32 \times 32 \times 23$ dörtgen prizmatik hücre ile ayrıklaştırılmıştır. Arama uzayı $d\rho = [-1, 1] \text{ g/cm}^3$ olarak tanımlanmıştır. Popülasyon sayısı $N = 36$ ve maksimum yinleme 4000 olarak verilmiştir. Ters çözümde olduğu gibi, bu işleç uygulanırken de çok çözümlülüğü azaltmak için veriyi en iyi destekleyen yuvarlatılmış modeller aranmıştır. Bu amaçla denklem (9)' da Gauss filtresi ile model parametrelerinin mümkün olduğunca yuvarlatılmasına gayret edilmiştir. PSO işleci ile elde edilen modelin de istenen gözlenen-hesaplanan veri çakışmasını sağladığı gözlenmiştir (Şekil 9a). Elde edilen model incelendiğinde (Şekil 9 b, c, d), modelin derine doğru yoğunluk artışı daha iyi yansıttığı ve belirlenen çökel derinliğinin diğer çalışmalarla uyumlu olduğu gözlenmiştir. Modelden $z=1\text{km}$ derinlikte alınan kat haritasında iki ana fay kolunun etkisi görülmektedir. Ayrıca, A-A' hattı boyunca alınan kesitte (Şekil 9c), düşük

yoğunluklu çökellerin dalım açısı ve derinliği bölgede toplanmış sismik yansıma verileri [4] ile daha uyumludur. B-B' hattı boyunca ise çökel derinliği arzu edilen ölçüde belirgin gözlenmemiştir. Buna karşın, genel olarak 3-5 km arasında olduğu görülmektedir ve önceki çalışmalarla görece uyumludur.

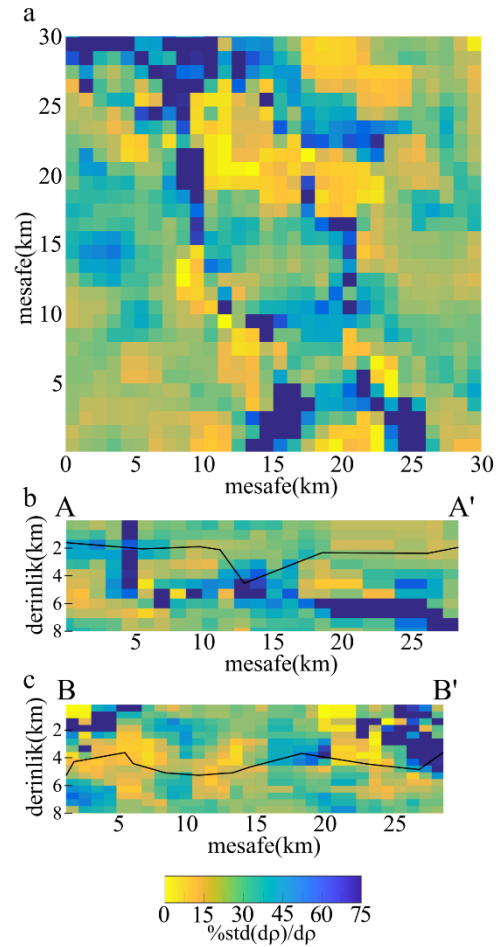
PSO işleci, kısmen rastgele doğasından ötürü, aynı işleç parametreleri kullanılmış olsa bile her çalıştırılmasında birbirinden farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu özelliği sayede yöntem, belirsizlik analizleri için kullanılmaktadır [21, 22]. Bu çalışmada, belirsizlik analizleri için işleç 13 defa yeniden koşturulmuştur ve elde edilen sonuçların dağılımının basit bir analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, her bir hücre için elde edilen yoğunluk karşılığı değerinin, ilgili hücre için elde edilen değerlerin standart sapmasına yüzde oranı Şekil 10'da verilmiştir. Böylece, her hücrenin kendi değerinin yüzde kaç kadar değişebildiği gösterilmiştir. Şekil 10a'da, en büyük belirsizliklerin havzayı iki yandan sınırlayan faylar boyunca olduğu görülmektedir. Daha önce Witter ve diğ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada [32], yuvarlatıcılı 3B gravite tersçözümünde, yapı sınırlarının konumlarının iyi belirlenmesine karşın dalımların hatalı elde edilebileceğini belirtmiştir. Şekil 10'da havza sınırlarındaki belirlenen belirsizlik, bu problemi görselleştirmektedir.

Şekil 10 b ve c incelendiğinde ise, havza içerisinde yer alan hücrelerin belirsizliğinin genelde %30'un altında olduğu gözlenmektedir. Belirsizliğin en yüksek olduğu bölgeler, çoğunlukla çalışma alanının dış sınırına yakın veya havza derinliğinin altında yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar, öngörüldüğü üzere, uygulanan yuvarlatıcının modellerdeki belirsizliği önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Tuz Gölü, Orta Anadolu'da bulunan, derinliği ~10km civarında olan, hidrokarbon potansiyeline sahip bir basendir. TSFZ'nin iki ana kolu, çalışma alanı içerisinde bulunan önemli bir yapıdır. Bölgede toplanmış sismik yansıma kesitlerinden, TSFZ'nin basen oluşumuna katkısı olduğu ve metamorfik temel derinliğini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir.

Bu çalışmada, Tuz Gölü güneybatısında Türkiye Petrolleri toplanmış gravite verileri 2B ve 3B yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. 2B modelleme çalışması, daha önce aynı veri kümesinin prizmatik yapılarla modellendiği [10] temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Düşük yoğunluk karşılığına sahip havza çökellerinin $d\rho = -0.6 \text{ g/cm}^3$ varsayımıyla gerçekleştirilen 2B modelleme sonucunda ~2km derinlikteki metamorfik temelin TSFZ civarında ~5 km derine ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 10. PSO işleci gerçekleştirilen belirsizlik analizi sonuçları. Analiz, işlecin 13 defa çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Şekilde, z=2km için kat haritası (a), A-A' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (b) ve B-B' hattına paralel doğrultuda alınmış kesit (c) verilmiştir.

3B Euler dekonvolüsyonu ile SI=0 için nokta kaynak konumları ve derinlikleri belirlenmiştir

(Şekil 5). Elde edilen çözümler, 1-2 km arası derinlikleri işaret etmektedir. Bu derinlikler, bölgede neojen çökellerin tabanına ulaşan fayların derinliği ile uyumludur [4]. $SI=0$ değeri, ilgili fayların havza çökellerinin derinliğini önemli derecede etkilemesinden dolayı bu fayların derinlikleriyle uyumlu sonuçlar sağlamıştır.

Gerçekleştirilen 3B ters çözüm çalışmalarında, veriler ilk olarak model parametreleri üzerinde herhangi bir sınırlama olmaksızın modellenmiştir (Şekil 7 a, b, c). Elde edilen modelde önceki jeofizik çalışmalara aykırı olarak, basen derinliği çok sığ elde edilmiştir. Bu nedenle, daha iyi bir model elde edebilmek için, $z \geq 7$ km için $d\rho = +0.13 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk karşıtlığı sabitlendikten sonra ters çözüm yeniden gerçekleştirilmiştir (Şekil 7 d, e, f). Bu durumda elde edilen model daha iyi olmakla birlikte, yuvarlatıcı durağanlaştırıcının etkisiyle, basen derinliği belirgin biçimde elde edilememiştir. Her iki modelde de 2B modelleme çalışmalarına göre çok daha düşük yoğunluk karşıtlığı değerleri elde edilmiştir.

Growth 2.0 [23] ile elde edilen modelde (Şekil 8), çökeller için $d\rho = -0.6 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk karşıtlığı atandığı zaman, çökeller yüzeyden itibaren değil, derinde elde edilmiştir. Bu 2B modelleme için kullanılan $d\rho = -0.6 \text{ g/cm}^3$ değerinin tüm veri kümesini desteklemediğini, yoğunluk karşıtlığının daha düşük olması gerektiğini göstermiştir. Ancak algoritmanın önerdiği basen derinliği değerleri, önceki jeofizik çalışmalarla [3, 4] uyumludur. Geleneksel olmayan bir başka 3B gravite modelleme aracı olan PSO işleci kullanıldığında (Şekil 9), A-A' hattı için jeolojiye uygun yapı dalımları ve basen derinlikleri (Şekil 9c) elde edilmiştir. B-B' hattı boyunca basen derinliği ise istenen ölçüde belirgin elde edilememiş olmakla birlikte, genel olarak önceki çalışmalarla uyumludur. PSO işleci ile gerçekleştirilen belirsizlik analizlerine göre, havza sınırlarının bulunduğu alanlarda belirsizlik yükselmektedir. Buna göre bu sınır faylarının dalımlarında bir belirsizlik vardır. 3B gravite modelleme ile elde edilen fayların dalımlarındaki bu belirsizlik daha önceki çalışmalarda da belirtilmiştir [32].

Buna karşın, belirsizlik analizlerine göre havza içerisinde belirsizlik önemli ölçüde daha azdır. Bu durum, uygulanan yuvarlatıcı fonksiyonun modellerdeki belirsizliği önemli ölçüde

düşürdüğünü işaret etmektedir. Elde edilen sonuçlar, gravite verilerinin 3B yorumunda geleneksel olmayan modelleme yöntemlerinin türev bazlı geleneksel ters çözüm yöntemlerine göre başarılı olabildiğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışmayı değerlendiren ve içeriğinin geliştirilmesine katkı sunan hakem ve editörlere teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] Arikan, Y., 1975. Tuz Golu havzasinin jeolojisi ve petrol imkanlari. MTA Bull, Cilt. 85, 17-38.
- [2] Cemen, I., Göncüoğlu, M. C., & Dirik, K., 1999. Structural evolution of the Tuzgölü basin in Central Anatolia, Turkey. The Journal of Geology, Cilt. 107(6), 693-706. DOI: 10.1086/314379
- [3] Aydemir, A., & Ates, A., 2006. Structural interpretation of the Tuzgolu and Haymana Basins, Central Anatolia, Turkey, using seismic, gravity and aeromagnetic data. Earth, planets and space, Cilt. 58(8), 951-961. DOI: 10.1186/BF03352600
- [4] Fernandez-Blanco, D., Bertotti, G., & Çiner, A., 2013. Cenozoic tectonics of the Tuz Gölü basin (central Anatolia plateau, Turkey). Turkish Journal of Earth Sciences, Cilt. 22(5), 715-738. DOI: 10.3906/yer-1206-7
- [5] Özsayın, E., Çiner, A., Rojay, B., Dirik, K., Melnick, D., Fernandez-Blanco, D., Bertotti, G., Schildgen, T.F., Garcin, Y., Strecker, M.R. & Sudo, M., 2013. Plio-Quaternary extensional tectonics of the Central Anatolian Plateau: a case study from the Tuz Gölü Basin, Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, Cilt. 22(5), 691-714. DOI: 10.3906/yer-1210-5
- [6] Uğurtaş, G., 1975. Tuz Gölü havzasinin bir bölümünün jeofizik yorumu. MTA Dergisi, Cilt. 85, 38-44.
- [7] Barbosa, V. C. F., Silva, J. B., & Medeiros, W. E., 1997. Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths. Geophysics, Cilt. 62(6), 1745-1757. DOI: 10.1190/1.1444275
- [8] Rao, D. B., 1986. Modelling of sedimentary basins from gravity anomalies with variable density contrast. Geophysical Journal International, Cilt. 84(1), 207-212.
- [9] Silva, J. B., Costa, D. C., & Barbosa, V. C., 2006. Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth. Geophysics, Cilt. 71(5), J51-J58.
- [10] Bal, O. T., & Kara, I., 2012. 3-D Gravity modeling of basins with vertical prisms: Application to Salt Lake region (Turkey). Journal of the Balkan Geophysical Society, Cilt. 15(1), 1-6.
- [11] Boulanger, O., & Chouteau, M., 2001. Constraints in 3D gravity inversion. Geophysical prospecting, Cilt. 49(2), 265-280. DOI: 10.1046/j.1365-2478.2001.00254.x
- [12] Li, Y., & Oldenburg, D. W., 1998. 3-D inversion of gravity data. Geophysics, 63(1), 109-119. DOI: 10.1190/1.1444302

- [13] Portniaguine, O., & Zhdanov, M. S., 1999. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*, Cilt. 64(3), 874-887.
- [14] Akça, I., & Basokur, A. T., 2010. Extraction of structure-based geoelectric models by hybrid genetic algorithms. *Geophysics*, Cilt. 75(1), F15-F22. DOI: 10.1190/1.3273851
- [15] Karcioğlu, 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, 37-48. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.06.001
- [16] 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(2), 305-318. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.07.013
- [17] Berrino, G., & Camacho, A. G., 2008. 3D gravity inversion by growing bodies and shaping layers at Mt. Vesuvius (Southern Italy). *Pure and Applied Geophysics*, Cilt. 165(6), 1095-1115. DOI: 10.1007/s00024-008-0348-2
- [18] Karcioğlu G., B. Tekkeli A., Tarhan Bal O., 2018. Smooth 3D Modeling of Gravity Data Using Particle Swarm Optimization, *New Trends in Geophysics and Engineering 2018*, 7-9 Kasım 2018, İstanbul, Türkiye, pp.1-4
- [19] Montesinos, F. G., Arnosó, J., & Vieira, R., 2005. Using a genetic algorithm for 3-D inversion of gravity data in Fuerteventura (Canary Islands). *International Journal of Earth Sciences*, Cilt. 94(2), 301-316. DOI: 10.1007/s00531-005-0471-6
- [20] Montesinos, F. G., Arnosó, J., Benavent, M., & Vieira, R., 2006. The crustal structure of El Hierro (Canary Islands) from 3-D gravity inversion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Cilt. 150(1-3), 283-299. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2005.07.018
- [21] Pallero, J. L. G., Fernandez-Martinez, J. L., Bonvalot, S., & Fudym, O., 2015. Gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via particle swarm optimization. *Journal of Applied Geophysics*, Cilt. 116, 180-191. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.03.008
- [22] Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., & Özyalın, Ş., 2021. Gravity data inversion for the basement relief delineation through global optimization: a case study from the Aegean Graben System, western Anatolia, Turkey. *Geophysical Journal International*, Cilt. 224(2), 923-944.
- [23] Camacho, A. G., Fernández, J., & Gottsmann, J., 2011. The 3-D gravity inversion package GROWTH2. 0 and its application to Tenerife Island, Spain. *Computers & Geosciences*, Cilt. 37(4), 621-633. DOI: 10.1016/j.cageo.2010.12.003
- [24] Reid, A. B., Ebbing, J., Webb, S. J., 2014. Avoidable Euler errors-the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophysical Prospecting*, Cilt. 62(5), 1162-1168. DOI: 10.1111/1365-2478.12119
- [25] Tedla, G. E., Van Der Meijde, M., Nyblade, A. A., & Van der Meer, F. D., 2011. A crustal thickness map of Africa derived from a global gravity field model using Euler deconvolution. *Geophysical Journal International*, Cilt. 187(1), 1-9. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05140.x
- [26] van der Meijde, M., & Nyblade, A. A., 2014. Reply to "Comment on 'A crustal thickness map of Africa derived from a global gravity field model using Euler deconvolution'". *Geophysical Journal International*, Cilt. 196(1), 96-99. DOI: 10.1093/gji/ggt450
- [27] Won, I. J., & Bevis, M., 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, Cilt. 52(2), 232-238. DOI: 10.1190/1.1442298
- [28] Li, X., & Chouteau, M., 1998. Three-dimensional gravity modeling in all space. *Surveys in Geophysics*, Cilt. 19(4), 339-368. DOI: 10.1023/A:1006554408567
- [29] Cella, F., Fedi, M., Florio, G., Grimaldi, M., & Rapolla, A., 2007. Shallow structure of the Somma-Vesuvius volcano from 3D inversion of gravity data. *Journal of volcanology and geothermal research*, Cilt. 161(4), 303-317. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2006.12.013
- [30] Dutra, A. C., & Marangoni, Y. R., 2009. Gravity and magnetic 3D inversion of Morro do Engenho complex, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, Cilt. 28(2), 193-203. DOI: 10.1016/j.jsames.2009.02.006
- [31] Khalil, M. A., Santos, F. M., & Farzamian, M., 2014. 3D gravity inversion and Euler deconvolution to delineate the hydro-tectonic regime in El-Arish area, northern Sinai Peninsula. *Journal of applied Geophysics*, Cilt. 103, 104-113. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.01.012
- [32] Witter, J. B., Siler, D. L., Faulds, J. E., & Hinz, N. H., 2016. 3D geophysical inversion modeling of gravity data to test the 3D geologic model of the Bradys geothermal area, Nevada, USA. *Geothermal Energy*, Cilt. 4(1), 14.
- [33] Li, Y., 2001. 3-D inversion of gravity gradiometer data. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2001*. 1470-1473. Society of Exploration Geophysicists. DOI: 10.1190/1.1816383
- [34] Chasseriau, P., & Chouteau, M., 2003. 3D gravity inversion using a model of parameter covariance. *Journal of applied geophysics*, Cilt. 52(1), 59-74. DOI: 10.1016/S0926-9851(02)00240-9
- [35] Clerc, M. and Kennedy, J., 2002. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Cilt. 6(1), 58-73. DOI: 10.1109/4235.985692
- [36] Li, X., Yao, X., 2011. Cooperatively Coevolving Particle Swarms for large Scale Optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 16 (2), 210-224.
- [37] Aydemir, A., & Ateş, A., 2005. Preliminary evaluation of Central Anatolian Basins in Turkey using the gravity and magnetic data. *Journal of Balkan Geophysical Society*, Cilt. 8(1), 7-19.
- [38] Gürbüz, A., & Kazancı, N., 2014. Facies characteristics and control mechanisms of Quaternary deposits in the Tuz Gölü basin. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, Cilt. 149(149), 1-18. DOI: 10.19111/bmre.63616
- [39] Özdemir, M., 1984. Tuz Gölü bölgesinin bouguer gravite alanının filtrelenmesi ve temel yapı derinliğinin araştırılması, *İ.Ü. Yerbilimleri Dergisi*, Cilt. 4, 67-86