

## Çumra- Konya Bölgesindeki Yüksek Genlikli Gravite Anomalilerine Neden Olan Yapıların Araştırılması

Ezgi ERBEK\*<sup>1</sup>, M. Nuri DOLMAZ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 03.07.2019, Kabul / Accepted: 16.09.2019, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2019)

### Anahtar Kelimeler

Gravite anomalisi,  
Tilt açısı,  
Analitik sinyal

**Özet:** Konya ili sınırları içerisinde yer alan Çumra bölgesindeki yüksek gravite anomalilerinin nedeni olan yapılar spektral analiz ve yapı sınırı yöntemleri ile araştırılmıştır. Gravite verilerinin güç spektrumundan anomalilere neden olan yapıların ortalama derinlikleri hesaplanmıştır. Tilt açısı yöntemi ile ise bu yapıların sınırları ve üst yüzey derinlik değerleri belirlenmiştir. Gravite verilerine uygulanan analitik sinyal yönteminden yararlanılarak elde edilen tahmini taban derinlik dağılım haritasında derinlik değerlerinin 1.6 km ile 9.4 km arasında değiştiği görülmektedir.

## Investigation of The Structures Causing High Gravity Anomalies in Çumra-Konya Region

### Keywords

Gravity anomaly,  
Tilt angle,  
Analytic signal

**Abstract:** The structures which are the cause of high gravity anomalies in Cumra, Konya province were investigated by spectral analysis and boundary analysis methods. The average depths of the structures causing anomalies were calculated from the power spectrum of the gravity data. Tilt angle method was also used to determine the boundaries of these structures and the upper surface depth values were determined. Using the analytical signal method applied to the gravity data, the estimation basement depth distribution map was drawn and it was shown that the depth values ranged between 1.6 km and 9.4 km.

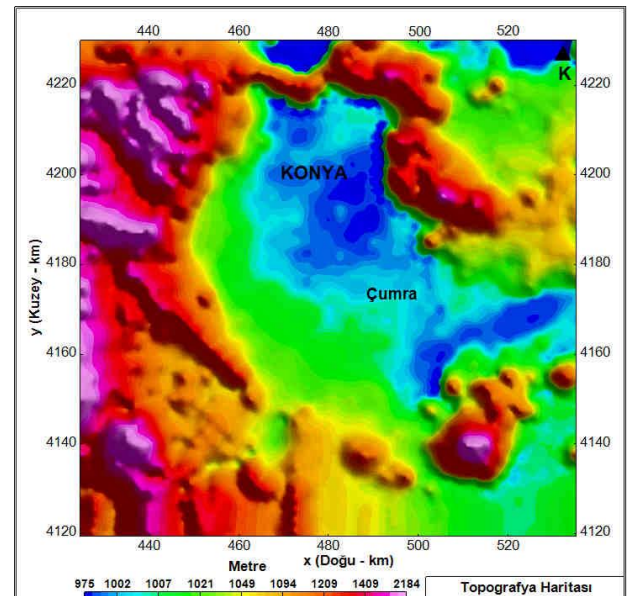
### 1. Giriş

Çalışma alanını içine alan Çumra bölgesi Konya ili sınırları içerisinde yer almakta olup, havza yapısında ve ova olarak nitelendirilebilecek bir birikinti alanıdır [1]. Bölgedeki topografik yükseklik 975 m ile 2184 m arasında değişmektedir. Çalışma alanında ova kısmın deniz seviyesinden yüksekliği ortalama 1000 m civarında değişirken, batı kısımlara doğru yükseklik değerleri 2184 m'ye ulaşmaktadır (Şekil 1).

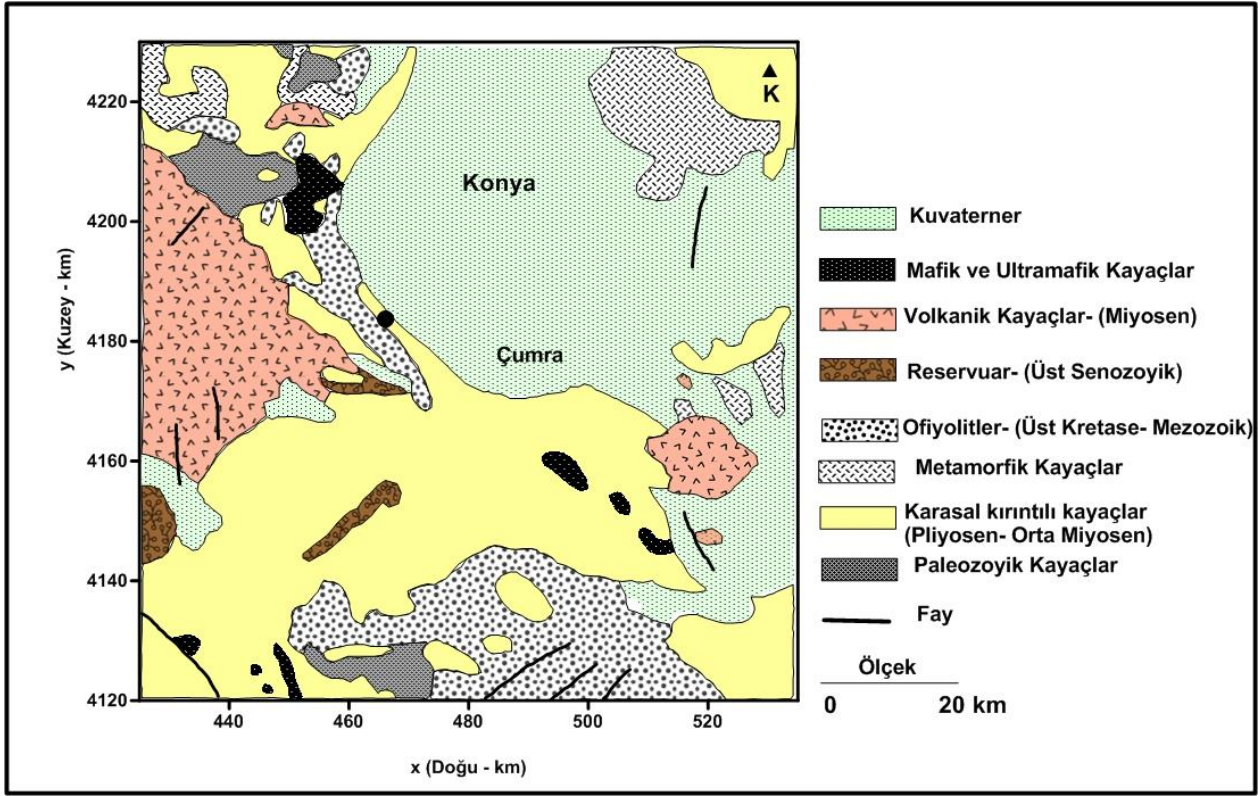
İç Anadolu'da yer alan çalışma alanı geçmiş dönemde bu bölgede yer alan Tetis Okyanusunun varlığından etkilenmiştir. Geç Paleozoyik dönemde doğmuş olan Tetis Okyanusu tektonik evrim sonucunda Tersiyer'de kapanmıştır. Son dönemdeki aşaması olan Neo-Tetis'de meydana gelen havzaların kalıntıları Anadolu'da kolayca gözlenebilmektedir [2].

Bölgede yer alan kayalar Paleozoyik- Kuvaterner yaş aralığında değişmekte olan çökelmiş jeolojik birimlerden oluşmaktadır. Bölgede yaygın olan

Mesozoyik birimler üzerinde ise mafik ve ultramafik kayalar yer almaktadır.



Şekil 1. Bölgenin topografik değişimini gösteren harita.



Şekil 2. Bölgenin sadeleştirilmiş jeoloji haritası [6 ve 8]' den değiştirilmiştir.

Özellikle Çumra ova bölgesinde Kuvaterner'e ait formasyonlar yaygın olarak görülmekte olup, Hakyemez vd. tarafından Çumra, Okçu, Türkmençamili, Güvercinlik ve Karkın formasyonları olmak üzere beş grupta toplanmıştır [3]. Çumra formasyonu silttaşı ve kilttaşlarından oluşmakta ve Okçu, Türkmençamili ve Arıkören formasyonları yanal geçişlidir. Okçu formasyonu ise çapraz ve paralel tabakalı bol gastropod ve dreissensia kavkılı, kavkı kırıntılı az çimentolu çakıltası ve kum taşlarından oluşmuştur. Türkmençamili Formasyonu beyaz, krem rengi, açık gri ve gri renkli marn ve kumlu marnlardan oluşurken Güvercinlik Formasyonu koyu gri, koyu kahverengi ve siyahımsı kahverengi renklerde gevşek yapılı çamur taşlarından oluşmaktadır [3,4]. Karkın formasyonu ise Sarımsı kahverengi ince kumtaşı, silttaşı ve kilttaşlarını içermektedir [5]. Bölgedeki ofiyolitler okyanus tabanı yayılmalarının ürünü olup bu durum Tetis okyanusunun varlığının bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada bölgenin jeolojik ve jeodinamik arka planı da göz önünde bulundurularak, Ateş ve Kearey [6]' in yaptığı çalışmadaki gravite verileri yeniden değerlendirilerek bölgede anomaliye neden olan yapılar, bunların sınırlarının ve yeraltı derinlik dağılımının belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

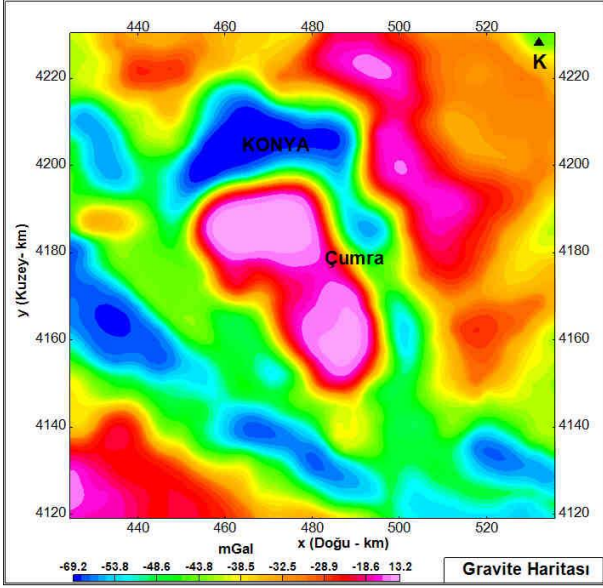
### 2.1. Materyal

Bölgenin jeolojik, jeofizik, jeomorfolojik ve jeodinamik evrimi ile ilgili çok sayıda çalışma

yapılmıştır. Koçyiğit [7] Konya (Ermenek) bölgesindeki ofiyolitik melanjlari araştırmıştır. Bingöl [8] ise bölgede genel olarak kuvaterner depozitlerin varlığından bahsederken, mafik ve ultramafik kayaçların küçük mostralara verdiğini belirtmiştir. Konya ilindeki senozoyik kalk-alkalin volkanizması Temel vd. [9] tarafından incelenmiştir. Hakyemez vd. [3] bölgeyi jeolojik açıdan detaylı olarak araştırmış ve bölgenin en yaşlı biriminin paleozoyik yaşlı mermerler olduğunu ifade etmişlerdir. Jeofizik açıdan Ateş ve Kearey [6] bölgeyi gravite ve manyetik verileri kullanarak değerlendirmiş, Albora vd. [10] hüresel sinir ağlarını kullanarak çalışma alanının yakın çevresinde tektonik modelleme yapmışlardır. Aydın ve İşseven [11] ise bölgedeki yüksek gravite anomali değerlerinin nedenini araştırmışlardır. Bu çalışma ile de bölgeye ait gravite verileri yeniden değerlendirilerek yüksek anomaliye neden olabilecek kaynakların konumları ve bölgede yer alan diğer gömülü yapıların sınırlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Potansiyel alan yöntemlerinden olan gravite yöntemi yer altındaki yanal yönlü yoğunluk değişiminin neden olduğu gravite alanındaki değişimlerin ölçülmesine dayanmaktadır. Yöntem verilerin süzgeçlenmesi ve spektral analiz aşamalarının uygulanması, jeolojik birimlerin dokanak sınırlarının belirginleştirilmesi, veriden istenmeyen etkilerin uzaklaştırılması, sığ veya derin etkilerin kuvvetlendirilmesi, farklı yönelimlerdeki etkilerin ortaya çıkartılması gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan gravite verileri yeniden sayısallaştırılarak analiz edilmeye hazır hale getirilmiştir. 2.5 km aralıklarla

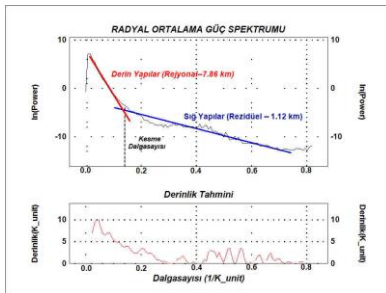
gridlenen gravite anomali haritası Şekil 3' te gösterilmektedir. Elde edilen anomali haritasında anomali değerleri -69.2 ile 13.2 mGal aralığında değişmekte olup, Çumra bölgesi civarında KB-GD uzanımlı elipsoidal belirgin bir anomali vermiştir.



Şekil 3. Çalışma alanına ait Bouguer gravite anomali haritası.

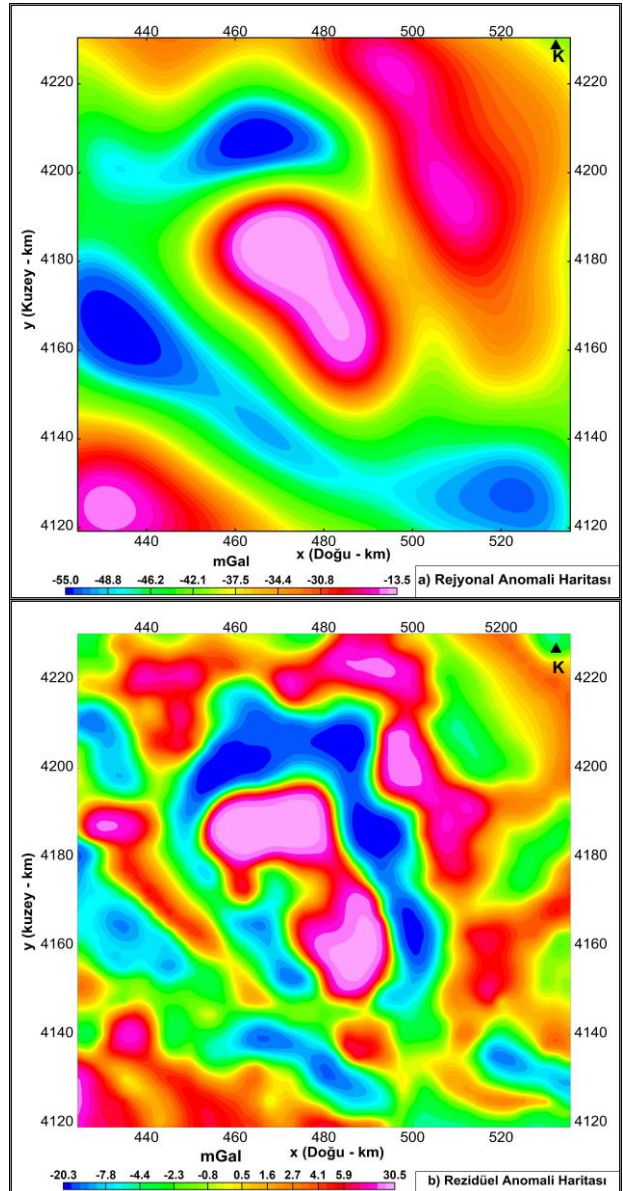
### 2.1.1 Rejyonel - Rezidüel Anomali Ayrımı

Bouguer anomali verilerini oluşturan rejyonel ve rezidüel olmak üzere iki bileşen vardır. Rejyonel anomaliler derinlerdeki yapıların meydana getirdiği etkileri temsil etmekte olup, uzun dalgaboylu ve düşük frekanslı verileri içermektedir. Rezidüel anomaliler ise yüzeye yakın sığ yapıların yarattığı etkilerdir. Bunlar kısa dalgaboylu ve yüksek frekanslı verileri içermektedir. Derin ve sığ yapıların derinliklerini belirlemek için verilere "Fourier Dönüşümü" olarak adlandırılan işlem uygulanmıştır. Bu işlem enerji spektrumlarını hesaplanmasında kullanılır ve bunun sonucunda iki boyutlu güç spectrum eğrileri elde edilir. Bu eğrilerin eğimi ise sığ ve derin yapıların ortalama derinliklerini belirlememize imkan vermektedir. Bu çalışmada FFT uygulanarak Bouguer gravite anomalilerini meydana getiren yapıların ortalama derinlikleri belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Radyal ortalama güç spektrumundan elde edilen ortalama derinlik değerleri  
Şekil 4' ten elde edilen kesme dalgasayısı (0.06 (1/K\_unit) alçak geçişli filtreleme işleminde

kullanılarak rejyonel anomaliler elde edilmiştir (Şekil 5a). Belirlenen kesme dalga sayısının yüksek geçişli filtreleme işlemine kullanılmasıyla da bölgeye ait rezidüel anomaliler elde edilmiş ve anomali dağılım haritası Şekil 5b' de verilmiştir. Derin yapıların yarattığı KB-GD uzanımlı anomalilerin çalışma alanının merkezinde ve KD' sında yer aldığı, sığ yapılardan kaynaklanan etkilerin ise çalışma alanının hemen hemen her bölgesinde yer aldığı görülmüştür. Rejyonel anomaliler için elde edilen derinlik değerinin (7.86 km) alt kabukta yer alan yapılardan kaynaklanmış olabileceği gözlenmiştir. Rezidüel anomali haritasında ise orta kısımda yer alan pozitif anomalileri çevreleyen negatif anomalilerin varlığı bölgedeki farklı yoğunluklu yapıların yer aldığını göstermiştir.



Şekil 5. a) Çalışma alanındaki derin yapılardan kaynaklanan etkileri gösteren rejyonel anomali haritası, b) Sığ yapılardan kaynaklanan etkileri gösteren rezidüel anomali haritası

## 2.2. Yöntem

### 2.2.1. Tilt Açısı Yöntemi

Potansiyel alanın düşey türevinin, yatay türevine oranı olarak tanımlanan yöntem, uzanımları ve kontakt alanları tanımlamada, sığ yeraltı yapısının haritalandırılmasında, maden arama ve manyetik kaynakların sınırlarının belirlenmesi için kullanılmaktadır [12, 13]. Yöntemin Türkiye'deki uygulamalarından biri Akın vd. [14] tarafından Kırşehir paftası için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tilt açısı yöntemi kullanılarak Geç Kretase yaşlı volkanik kayaların yer altı konumlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Doğru vd. [15] ise tilt açısı yöntemi ile Batı Anadolu bölgesinin Bouguer gravite anomalilerini inceleyerek jeolojik yapı sınırlarını tanımlamışlardır. Yöntemin matematiksel bağıntısı 2 numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$TDX = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

TDX, potansiyel alanın yatay türevini ifade ederken,  $\frac{\partial f}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial f}{\partial y}$  toplam alanın x ve y yönündeki türevlerini göstermektedir.

$$\text{Tilt} = \arctan \left[ \frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{TDX} \right] \quad (2)$$

Bağıntıdaki  $\frac{\partial f}{\partial z}$  toplam alanın z yönündeki türevini göstermektedir.

Tilt genlikleri, ark-trigonometrik fonksiyon olduğundan dolayı  $\pm \pi / 2$  arasında değişirken, Salem vd. [16]  $\pm \pi / 4$  Radyan konturlar arasındaki yarı mesafenin dikey kontaktlar için kaynak derinliğinin tahminini sağladığını kanıtlamıştır. Genlikler, kaynak yapı üzerinde pozitif değerler gösterirler. Genliklerin negatif değerleri ise, kaynağın kenarına yakın veya kaynak bölgesinin dışında konumlanırlar. Özellikle sığ derinliklerde sıfır konturu yapıların sınırlarını temsil etmektedir.

### 2.2.2. Analitik Sinyal ile Tahmini Taban Derinliği

Analitik sinyal (AS) yöntemi ilk defa Nabighian [17,18,19] tarafından ortaya konmuş, daha sonra Roest vd. [20] tarafından toplam manyetik alanın düşey gradientinden, (x, y) konumundaki üç boyutlu analitik sinyalin genliklerinin kolayca elde edilebileceği gösterilmiştir. Bunu ;

$$AS = \sqrt{\left(\frac{dT}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dT}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dT}{dz}\right)^2} \quad (3)$$

bağıntısı ile ifade etmişlerdir. T, toplam potansiyel alanı,  $\frac{dT}{dx}$ ,  $\frac{dT}{dy}$  ve  $\frac{dT}{dz}$  ise potansiyel alanın x, y ve z yönlerindeki türevlerini göstermektedir.

Yöntem potansiyel alan verilerinin yatay ve düşey türevlerini hesaplayarak, anomaliye neden olan yapıların sınırlarını tanımlamak için kullanılır. Ayrıca yöntemin yer manyetik alanından ve kaynak mıknatıslama yönlerinden bağımsız olması uygulamada büyük avantaj sağlamaktadır.

Ayrıca yöntem hesaplanan AS değerlerinin, AS' in düşey türevine (ASI) oranını kullanarak manyetik cisimlerin derinliğini tahmin etmeyi sağlar.

$$ASI = \sqrt{\left(\frac{\partial fv}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial fv}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial fv}{\partial z}\right)^2} \quad (4)$$

Bağıntıda, fv, potansiyel alanın düşey türevini,  $\frac{dfv}{dx}$ ,  $\frac{dfv}{dy}$  ve  $\frac{dfv}{dz}$  ise potansiyel alanın düşey türevinin x, y ve z yönlerindeki türevlerini göstermektedir.

Maksimum genlik;

$$D = \frac{AS}{ASI} \times N \quad (5)$$

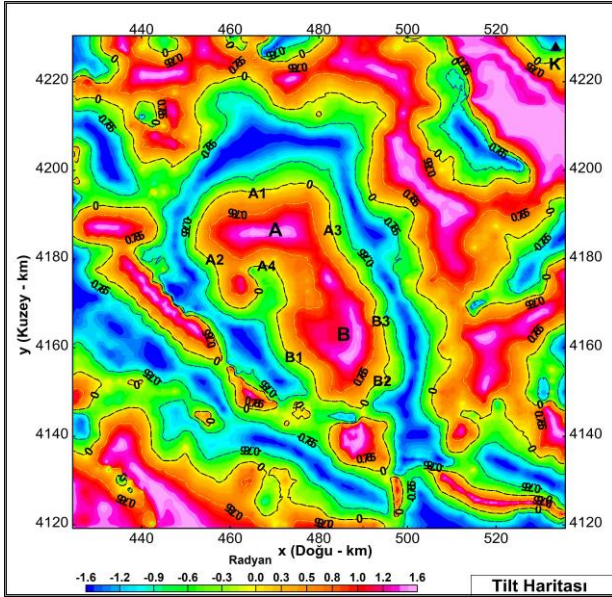
D (m) manyetik gövdenin derinliğini göstermektedir. N, manyetik kaynağın geometrisini temsil eder ve yapısal bir indeks olarak bilinir (küre için N = 4, boru için N = 3, ince dayk için N = 2, manyetik kontakt için N = 1).

## 3. Bulgular

Bölgedeki gravite anomalileri incelendiğinde Çumra çevresindeki KB-GD yönelimli elipsoid pozitif anomalilerin varlığı dikkat çekmektedir. Bu duruma neden olabilecek etkinin Aydın ve İşseven [11] tarafından yapılan çalışmada yer altındaki (4.84 km derinlikli) bir kütle fazlalığından kaynaklanabileceği belirtilmiş ve bu kütle fazlalığını 67.343 Gt olarak hesaplamışlardır. Topografik olarak çevresine göre (-2000 m) düşük kotlu (-1000 m) bir alanda Çumra-Konya civarında yeraltında bulunan gömülü KB-GD uzanımlı yoğun bir materyalin beklenen düşük gravite anomalisi içerisinde çarpıcı şekilde yer alan pozitif bir anomaliye yol açmıştır.

Bu çalışma ile bu yapının sınırlarını belirleyebilmek amacıyla uygulanan Tilt açısı yönteminden elde edilen harita Şekil 6' da verilmiştir. Harita üzerindeki 0 konturları yapıların sınırlarını temsil etmektedir.  $\pm \pi/4$  ( $\pm 0.785$ ) konturları arasındaki yarı mesafeden Çumra civarındaki yapıdan seçilen noktalara (A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3) ait yükselim sınırları için derinlik değerini hesaplamak mümkün olmuştur (Tablo 1).

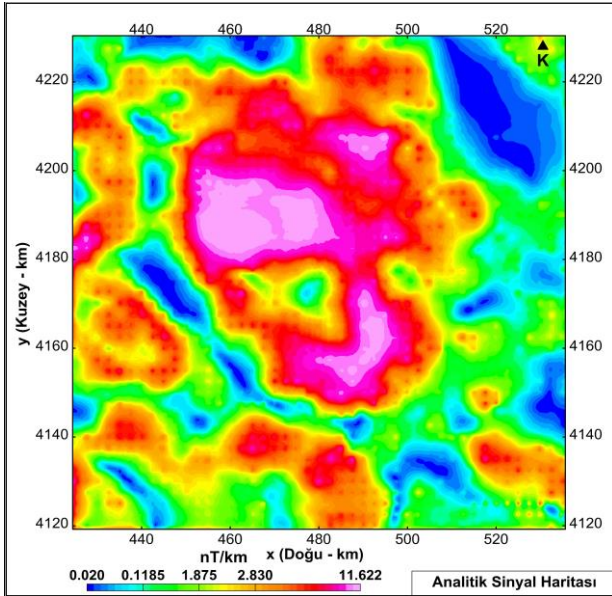
Bölgeye ait oluşturulan analitik sinyal haritası Şekil 7' de verilmiştir. Potansiyel alanın yatay ve düşey türevlerinde dayanan yöntemde genlik değerlerinin yüksek olduğu yerler anomaliye sebep olan yapıya karşılık gelmektedir. Çumra çevresindeki pozitif gravite anomalilerine neden olan yapının sınırları harita üzerinde belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 6. Çalışma alanına ait Tilt açısı haritası. Siyah kesikli çizgiler 0 konturunu gösterirken sarı ve mavi renkli çizgiler ise sırasıyla  $+\pi/4$  ve  $-\pi/4$  konturlarını göstermektedir.

Tablo 1. Tilt haritası üzerinde seçilen noktalar için hesaplanan derinlik değerleri

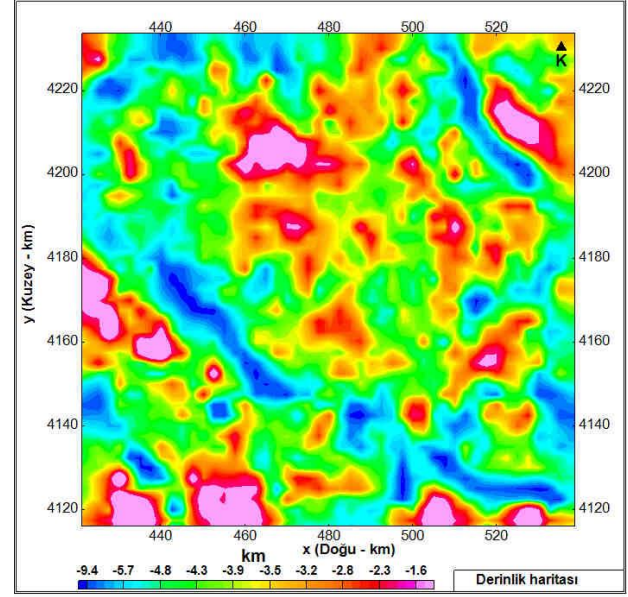
Nokta	X (Doğu)	Y (Kuzey)	Tilt Açısı Derinlik (km) Değeri
A1	465.411	4195.58	3.5
A2	455.266	4180.01	2.5
A3	482.91	4186.88	3.1
A4	467.400	4178.72	8.1
B1	473.368	4158.239	4
B2	494.255	4152.27	5.4
B3	493.459	4166.19	3.2



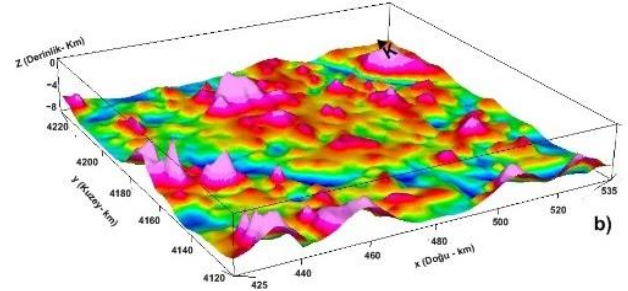
Şekil 7. Çumra ve çevresine ait analitik sinyal haritası

AS yönteminin kullanılmasıyla elde edilen tahmini taban yüzeyi üzerindeki derinlik dağılımı haritası Şekil 8' de verilmiştir. Buna göre bölgeye ait taban yüzeyinin üzerine kadar olan tahmini derinlik dağılımının 1.6 km ile 9.4 km aralığında değiştiği hesaplanmıştır. Hesaplanan sıg derinlik değerlerinin Çumra civarında yer aldığı gözlenmiştir. Ayrıca taban

yüzeyi üzerindeki derinliğin maksimuma (derin) ulaştığı bölge Çumranın GB' sında yer alan KB-GD uzanımlı alan olarak belirlenmiştir.



a)



b)

Şekil 8. a) Çalışma alanına ait taban yüzeyi üzerindeki derinlik dağılım haritası b) Tahmini taban yüzeyinin üzerindeki derinlik dağılımının 3B gösterimi.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada yer altındaki yapıların yoğunluk, derinlik ve geometrilerine bağlı olarak değişen gravite yöntemine ait veriler yeniden sayısal hale getirilerek bölgedeki gömülü yapılara ait bilgiler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Çumra ve çevresi topografik olarak düz bir yapıda olmasına rağmen yüksek gravite anomalileri verdiği gözlenmiştir (Şekil 1 ve 3). Bölgeye ait gravite anomalilerine spektral analiz işlemleri uygulanarak rejyonel anomaliye neden olan kütlelerin ortalama derinliği 7.86 km bulunmuştur. Bölgedeki yüksek anomaliye neden olan yapıların Tetis Okyanusunun kapanması sırasında bölgeye yerleşen bir ofiyolit kütleli olabileceği Aydın ve İşseven [11] tarafından belirtilmiştir. Bu bilgiler ışığında etken yapıya ait sınırlar ve yapının üst derinlik değerleri seçilen noktalar için tilt açısı yöntemi uygulanarak hesaplanmıştır. Ayrıca Kuvaterner birimlerin altında yer alan bu etken yapının ve etrafının taban derinlik dağılımı hesaplanmıştır. Tilt açısı yöntemi kullanılarak yapının üst yüzeyden olan derinlik dağılımının yaklaşık olarak 2.5 km ile 8.2 km

aralığında değiştiği belirlenmiştir. Buna göre bölgedeki en derin kısmın (-9.4 km) Çumranın GB'sında yer alan bölgeye karşılık geldiği görülmüştür. AS haritasındaki maksimum değerler ise Çumra bölgesinde yer alan gömülü ofiolitik kütlelerin sınırlarının sıkışma yönünden etkilenmeden tam konumunu işaret etmektedir. Güç spektrumu kullanılarak bölgenin geneli için anomaliye neden olan derin yapılara ait elde edilen derinlik (~7.1 km) değerlerinin de tilt açısı yönteminden elde edilen değerler (~8 km) ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

### Kaynakça

- [1] Yiğitbaşıoğlu, H., 2001. Konya-Çumra Havzası'nda Arazi Kullanım Özellikleri ve Başlıca Sorunları, AÜ Türkiye Coğ.Arş. ve Uyg. Merk. Der. No:8, Ankara.
- [2] Şengör, A. M. C., Yılmaz, Y., 1981. Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach. *Tectonophysics*, 75(3-4), 181-241.
- [3] Hakyemez, H. Y., Elibol, E., Umut, M., Bakırhan, B., Kara, İ., Dağistan, H., Metin, T., Erdoğan, N., 1992. Konya-Çumra-Akören Dolayının Jeolojisi. M.T.A. Rapor no: 42/24, 64, Ankara.
- [4] Tuncer, B., 2011. Çumra (Konya) ilçesi'nin Beşeri ve Ekonomik Coğrafyası. Selçuk Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, Konya.
- [5] Tapur, T., 1998. Eski Konya gölü ve Çevresinin Fiziki Coğrafya Özellikleri. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 87s, Konya.
- [6] Ates, A., Kearey, P., 2000. Interpretation of gravity and aeromagnetic anomalies of the Konya Region, South Central Turkey. *Journal of the Balkan*, 3(3), 37-44.
- [7] Kocyigit, A., 1976. The ophiolitic melange and other formations in the Karaman, Eremenek (Konya) region. *Bulletin of the Geological Society of Turkey*, 19, 103-116.
- [8] Bingöl, E., 1989. 1:2 000 000 scale geological map of Turkey, Publication of the Mineral Research and Exploration Company of Turkey.
- [9] Temel, A., Gundogdu, M. N., Gourgard, A., 1998. Petrological and geochemical characteristic of Cenozoic high-K calcalkaline volcanism in Konya, central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 327-354.
- [10] Aydın, N. G., İşseven, T., 2018. What is the reason for the high Bouguer gravity anomaly at Çumra, Konya (Central Anatolia)?, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 27(4), 318-328.
- [11] Albora, M.A., Ucan, O.N., Aydoğan, D., 2007. Tectonic modeling of Konya-Beyşehir Region (Turkey) using cellular neural networks. *Annals of Geophysics*, 50(5), 603-614.
- [12] Mille,r H.G., Singh, V., 1994. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics* 32(2-3), 213 – 217.
- [13] Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M., Mackenzie, C., 2004. The meter reader—new insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2), 116 – 119.
- [14] Akın, U., Şerifoğlu, B.I., Duru, M., 2011. Gravite ve manyetik yöntemlerde tilt açısı'nın kullanılması. *MTA Dergisi*, 143, 1-12.
- [15] Doğru, F., Pamukçu, O., Özsöz, I., 2017. Application of tilt angle method to the Bouguer gravity data of Western Anatolia. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, (155), 213-222.
- [16] Salem, A., Williams, S., Fairhead, J., Ravat, D., Smith, R., 2007. Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge*, 26(12), 1502-1505.
- [17] Nabighian, M. N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3), 507-517.
- [18] Nabighian, M.N. 1974. Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, 39(1), 85-92.
- [19] Nabighian, M.N., 1984. Toward a three dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, 49(6), 780 -786.
- [20] Roest, W.R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics* 57(1), 116-12.