



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>

MADEN TETKİK VE ARAMA
DERGİSİ



Gülbahçe fay zonu ve çevresinin (İzmir, Türkiye'nin kuzeyi) gravite ve manyetik anomali verileri kullanılarak kabuk incelenmesi ve tektonik stres dağılımının araştırılması

Assessment of crustal thinning and tectonic stress distribution of Gülbahçe fault zone and its surroundings (İzmir, West Türkiye) using gravity and magnetic anomalies

Oya ANKAYA PAMUKÇU^{a*}, Ayça ÇIRMIK^a, Fikret DOĞRU^b, Ece ÜNLÜ^a ve Barış Can MALALİÇİ^c

^aDokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği, İzmir, Türkiye

^bAtatürk Üniversitesi, Oltu Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknoloji, Erzurum, Türkiye

^cMaden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Bouguer Gravite Anomalisi, Gülbahçe Fay Zonu (GFZ), Manyetik, Mikrogravite, Parasnis Metodu.

ÖZ

Gülbahçe Fay Zonu (GFZ) İzmir ili ve çevresi için oldukça önemli bir tektonik yapı ve sismik kaynaktır. GFZ çevresinde, 2005 Seferihisar, 2020 Samos Adası-Ege Denizi ve 2021 Seferihisar gibi büyük depremler meydana gelmiştir. Bu çalışmada, yeni gravite ve manyetik verileri kullanılarak GFZ ve çevresinin kabuk incelenmesi ve tektonik stres dağılımı incelenmiştir. Uyum analizi, manyetik ve serbest hava anomalisi verileri birlikte değerlendirilerek yapılmıştır. Ek olarak, yeraltı yapısının ortalama yoğunluğu Parasnis metodu uygulanarak hesaplanmıştır. Deviatorik stres hesaplaması yapılmış, GFZ ve çevresinin kuzeyden güneye kabuk yapısının gravite ve manyetik anomali özelliklerini kontrol eden fiziksel değişimlerin parametreleri incelenmiştir. Bu nedenle, gravite anomalisinden elde edilen ortalama yoğunluk değerleri çalışma alanının kuzeyinde 2,59 gr/cm³ olarak hesaplanmışken bu değer güneye doğru 2,06, 1,8 ve 1,49 gr/cm³ değerlerine düşmüştür. Serbest hava gravite anomalisi değerleri 0-70 mGal arasında iken, manyetik anomali değerleri -450-150 nT. Deviatorik stres değerleri -0,2-0,1 MPa arasındadır.

Geliş Tarihi: 21.06.2021

Kabul Tarihi: 15.11.2021

Keywords:

Bouguer Gravity Anomaly, Gülbahçe Fault Zone (GFZ), Magnetic, Microgravity, Parasnis Method.

ABSTRACT

Gülbahçe Fault Zone (GFZ) is a significant tectonic structure and seismic source for İzmir city and its surroundings. The major earthquakes occurred at the surroundings of GFZ are 2005 Seferihisar, 2020 Samos Island-Aegean Sea and 2021 Seferihisar earthquakes. In this study, the crustal thinning and tectonic stress distribution of GFZ and its surroundings were analyzed by using the new gravity and magnetic data. The correspondence analysis was applied by appraising together the magnetic and free-air anomaly data. Moreover, the average density of the subsurface structure was calculated by applying the Parasnis method. The deviatoric stress calculation was executed and the change of the physical properties that controls the gravity and magnetic anomaly of the crustal structure of the GFZ and its surroundings from north to south was investigated. Therefore, the average density values, which were obtained from gravity anomalies, were computed as 2.59 gr/cm³ in the north of the study region and it decreased to 2.06, 1.8 and 1.49 gr/cm³ towards to the south. The free-air gravity anomaly values were between 0-70 mGal and the magnetic anomalies were between -450-150 nT. The deviatoric stress values were between -0.2-0.1 MPa.

*Başvurulacak yazar: Oya ANKAYA PAMUKÇU, oya.pamukcu@deu.edu.tr

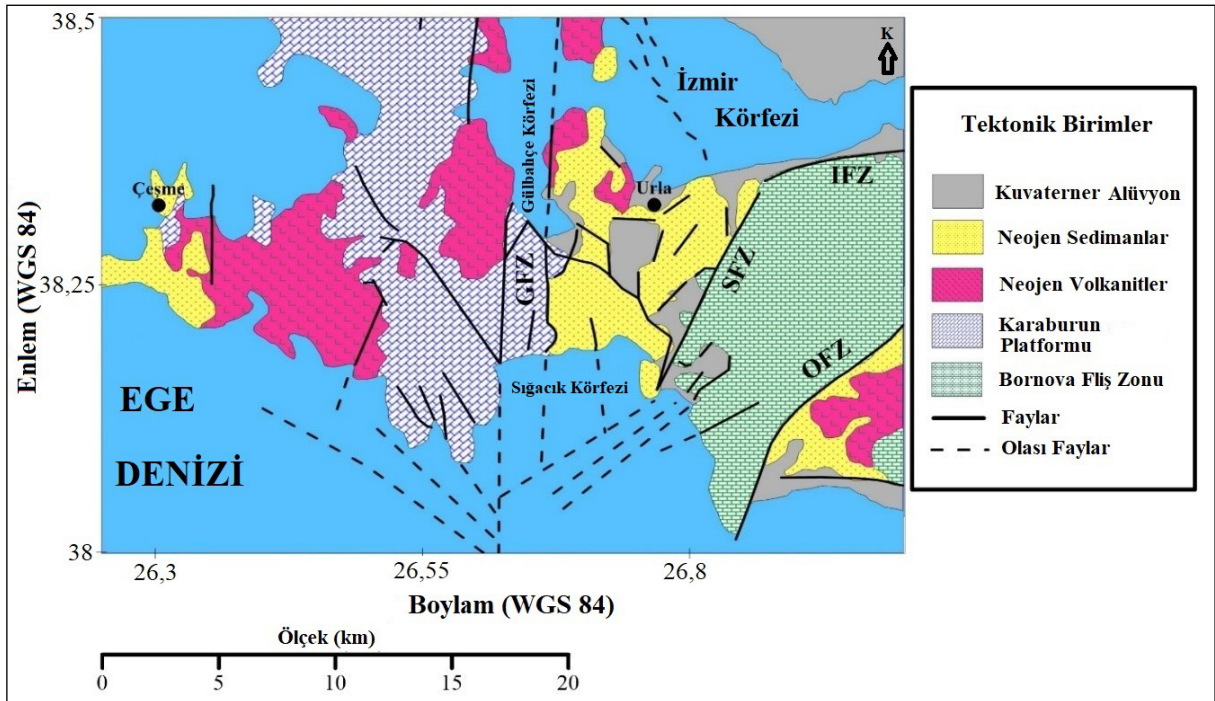
1. Giriş

Çalışma alanı, Karaburun yarımadasını İzmir Körfezi'nden ayıran K-G uzanımlı GFZ ve çevresidir (Emre vd., 2005) (Şekil 1). Çalışma alanını içeren Batı Anadolu; Arap, Afrika ve Avrasya Levhaları'nın arasında bulunan ve büyük bir alana yayılmış sıkışma zonunun bir parçası olan Alpin Kuşağı'nda yer almaktadır (Pamukçu ve Yurdakul, 2008; Çırmık vd., 2016; Çırmık vd., 2017a, b; Çırmık ve Pamukçu, 2017; Doğru vd., 2017, 2018; Doğru ve Pamukçu, 2019; Pamukçu vd., 2019). Batı Anadolu tektonik olarak aktif ve dünyanın hızla deforme olan, genişleyen alanlarından biridir (Dewey ve Şengör, 1979; Ambraseys, 1988; Taymaz vd., 1991; Bozkurt, 2001; Pamukçu ve Yurdakul, 2008; Pamukçu vd., 2012, 2013). Batı Anadolu, Miyosen'den günümüze gelen K-G uzanımlı bir eklentiye sahiptir (Dewey ve Şengör, 1979; Şengör vd., 1985). Güneydoğu Anadolu'da Arap ve Avrasya levhalarının çarpışması sonucunda, Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Zonları oluşmuş, Anadolu Levhası batıya doğru saat yönünün tersine kayma göstermektedir (Şengör ve Yılmaz, 1981). Anadolu Levhası'nın batıya doğru hareketi (Aktuğ ve Kılıçoğlu, 2006) ve Afrika Levhası'nın

Ege-Kıbrıs dalma zonu boyunca Güney Anadolu Levhası'nın altına kuzeye dalması, Batı Anadolu'nun K-G doğrultulu genişleme tektoniğini oluşturmuş (Şengör ve Yılmaz, 1981) ve Anadolu bloğunun doğuya kaçmasına neden olmuştur (Ketin, 1948; McKenzie, 1972; Barka ve Kadinsky - Cade, 1988).

Emre vd. (2005), GFZ'nin baskın yöneliminin doğrultu atılımlı olduğunu bildirmiştir. Ocakoğlu vd. (2005)'in deniz altı verileri, GFZ'nin kuzey segmenti boyunca ters fay içerdiğini ve fayın batı bloğunun doğu bloğu üzerine bindiğini göstermektedir (Emre vd., 2005).

Önceki çalışmalar (Akıncı vd., 2000; Çetiner, 2012; Pamukçu vd., 2013, 2015; Çırmık vd., 2016; Çırmık vd., 2017a, b; Malaliçi, 2019), İzmir ve çevresinin deprensellik açısından yüksek risk taşıdığını göstermiştir. Özellikle, 17 Ekim - 21 Ekim 2005 Sığacık Körfezi deprem serisi ($M_1 = 5,7$; $M_1 = 5,9$), 12 Haziran 2017 Karaburun – Midilli Adası açık deniz depremi ($M_w = 6,3$) ve 30 Ekim 2020 Sisam Adası depremi ($M_w = 6,9$), çalışma alanındaki etkin depremleri temsil etmektedir. Ek olarak, 2020 Sisam Adası depremini takiben çalışma alanının güneyinde



Şekil 1- Çalışma alanının basitleştirilmiş jeolojik haritası (Uzel ve Sözbilir, 2008; Sözbilir vd., 2009; Uzel vd., 2012; Göktaş, 2016; Malaliçi, 2019'dan düzenlenmiştir). GFZ: Gülübaçe Fay Zonu, SFZ: Seferihisar Fay Zonu, IFZ: İzmir Fay Zonu, OFZ: Orhanlı Fay Zonu.

tsunami gözlemlenmiştir (Sözbilir vd., 2020). Sismik olarak aktif olan bu bölge, 2009 yılından günümüze Pamukçu vd. (2013, 2015), Çırmık vd. (2016), Çırmık vd. (2017a, b) ve Malaliçi (2019) tarafından incelenmektedir. Bu çalışmada, GFZ ve çevresinin kabuk incelenmesi ve tektonik stres dağılımı, 2019 yılına kadar elde edilmiş gravite ve manyetik veriler çerçevesinde ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, Dokuz Eylül Üniversitesi'nin bilimsel araştırma projesinden (Proje no: 2018.KB.FEN.010) elde edilen gravite ve manyetik veriler ile riskli bölgenin kabuk yapısı incelenmiştir.

GFZ ve çevresinin karmaşık yapısından kaynaklanan manyetik ve gravite anomalilerini temsil eden bu bölgeler, kabuğun fiziksel karakteristiklerini temsil etmektedir (Pamukçu vd., 2007, 2015). Bu nedenle, bu alanın çalışılmasında ilk kullanılan yöntem gravite ve manyetik verilerinin uyumluluk analizi olmuştur. Bouguer anomalisi ve topografik veriler kullanılarak, Parasnis metodu ile yeraltı yapılarının ortalama yoğunluk hesaplamaları yapılmıştır. Son olarak, söz konusu ortalama yoğunluk ve Bouguer gravite anomalisi değerleri kullanılarak deviatorik stres değeri (Turcotte ve Schubert, 2002; Xu vd., 2015) elde edilmiştir. Sonuç olarak, kabuk yapısına dair edinilen yeni bilgiler ve önceki araştırmalardan elde edilen sonuçlar birlikte incelenmiştir.

2. Veri Analizi

Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi (Proje No: DEU - BAP 2018.KB.FEN.010) projesi ve TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Proje No: 108Y285) projesi tarafından desteklenen projeler kapsamında elde edilen gravite ve manyetik verileri dahilinde incelenmiştir. Dokuz Eylül Üniversitesi Tınaztepe Kampüsü gravite ve manyetik ölçümleri için baz noktası olarak seçilmiş, baz ölçümleri sabah ve akşam olmak üzere günde iki defa yapılmıştır.

GFZ ve çevresinin kompleks gravite ve manyetik anomalisi alanları, kabuğun altında tektonik evrimini ve kompleks özelliklerini temsil eden bir bütünlük sunmaktadır. Yorumsal belirsizlikleri en aza indirmeye yönelik temel yaklaşım anomalilere ait uyumluluk analizlerinin değerlendirilmesidir.

Liteatürde bu bölge veya çevresine ait önceden yapılmış herhangi bir detaylı gravite veya manyetik çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeple, çalışma kapsamında manyetik ve gravite anomalilerine ait uyumluluk analizlerinin yapılması suretiyle, bölgenin kabuk yapısına ait özelliklerin daha iyi araştırılması hedeflenmiştir.

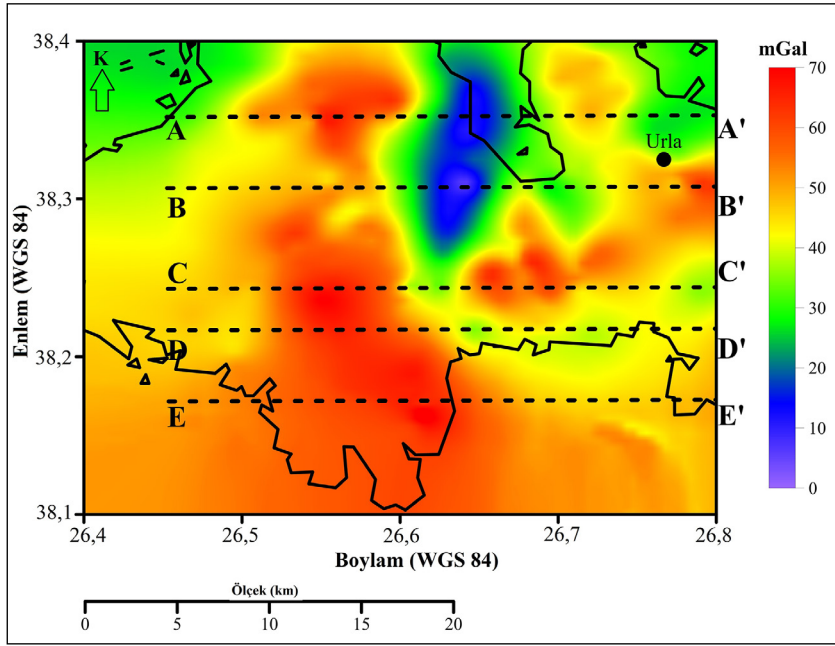
2.1. Serbest - Hava ve Manyetik Anomalilerin Korelasyonu

Ölçülen mikrogravite verilerine, serbest-hava gravite verilerini elde etmek amacı ile baz, enlem ve serbest hava düzeltmeleri yapılmıştır (Şekil 2). Sonraki adımda, manyetik anomalilere Kutba İndirgeme (RTP) uygulanmıştır (Şekil 3).

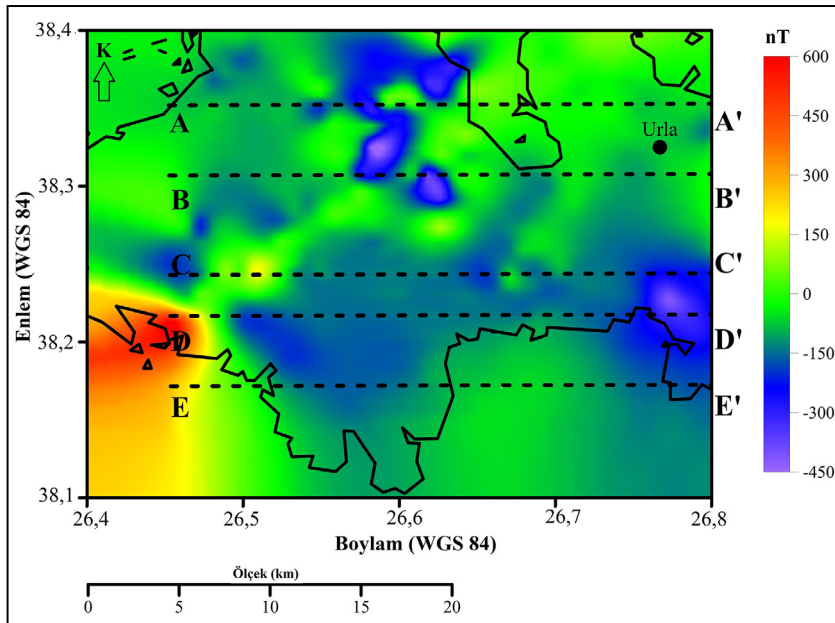
Kabuk özelliklerinin yorumlanmasında gravite ve manyetik anomalilerin uyumunun değerlendirilmesinin önemine işaret eden bir çok araştırma (örn. Von Frese vd., 1982, 1997a, b; Saleh vd., 2006; Pamukçu vd., 2007; De Ritis vd., 2010; Hinze vd., 2013; Erbek ve Dolmaz, 2014; Pamuk, 2019) mevcuttur. Bu araştırmalar, aynı zamanda gravite ve manyetik anomalilere dair uyumluluk analizi yapılarak kabuk kalınlığındaki değişimin tespit edilebileceğini ifade eder.

Gravite ve manyetik verilere ait en önemli faktör sıcaklıktır ve sıcaklık doğrudan gravite ve manyetik anomalileri etkiler (Von Frese vd., 1982; Pamukçu vd., 2007). Ek olarak, yüzey ve yüzey altı yüklerinin de graviteye etkileri vardır. Manyetik anomalisi etkileyen en önemli parametre Curie sıcaklığı ve kabuk incelidikçe azalan derinliktir. Bu durum çerçevesinde, manyetik anomalilerin genliği de azalır. Bu azalan manyetik anomalisi, topoğrafik yük (kütle etkisi) içeren serbest-hava anomalisi ile ters orantılı ise, çalışma alanının o bölümünde ince kabuk etkisinden söz etmek mümkündür (Von Frese vd., 1982; Pamukçu vd., 2007).

Gravite ve manyetik verileri arasında uyumluluk analizi yapılabilmesi için, serbest-hava gravite (Şekil 2) ve manyetik anomalisi (Şekil 3) haritalarından beş profil seçilmiştir. İki veri setine ait uyumluluk analizi Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 2- Serbest-hava anomali haritası.



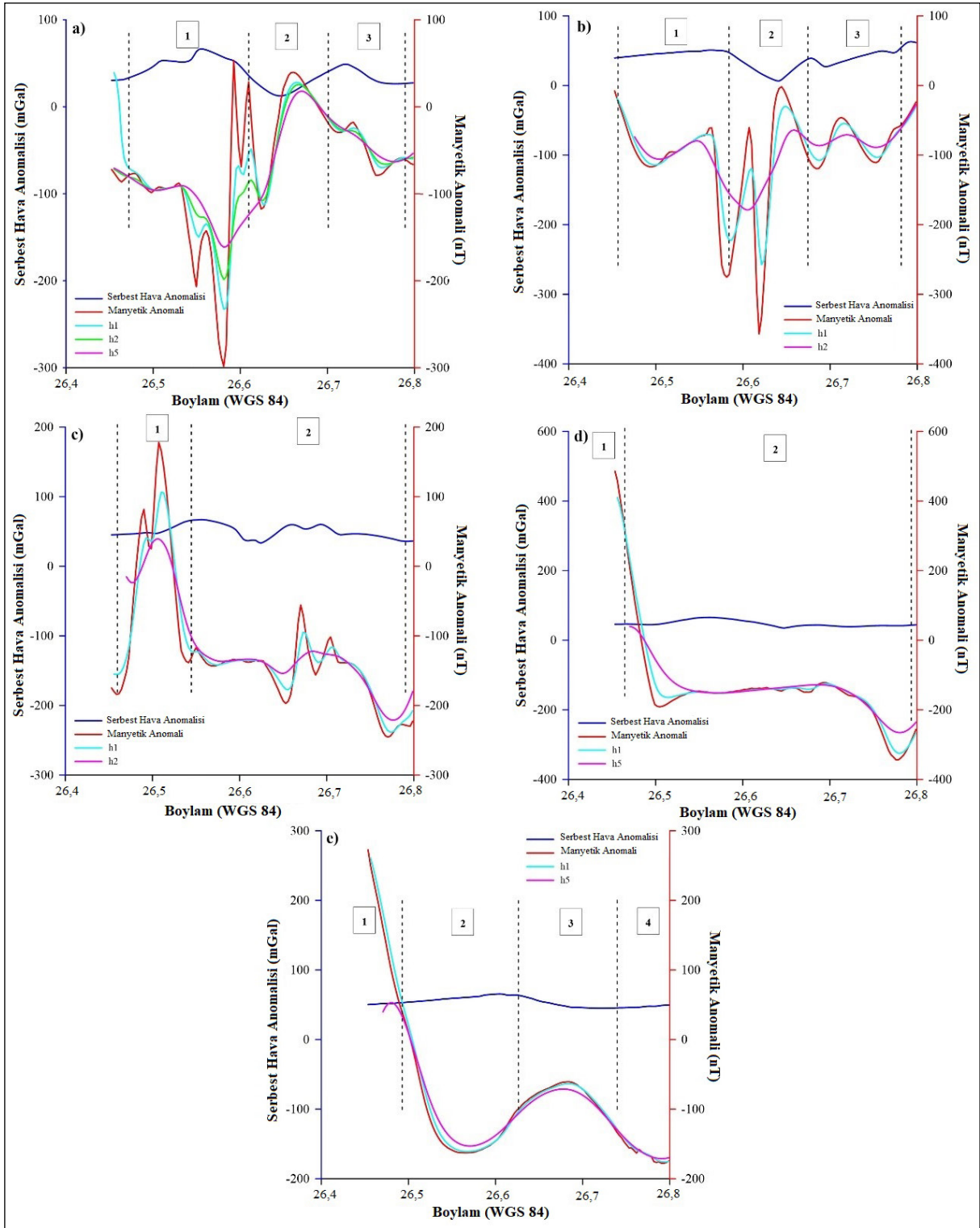
Şekil 3- Çalışma alanının kutba indirgenmiş (RTP) manyetik anomali haritası.

2.2. Bouguer Gravite ve Topoğrafik Anomalilerin Korelasyonu

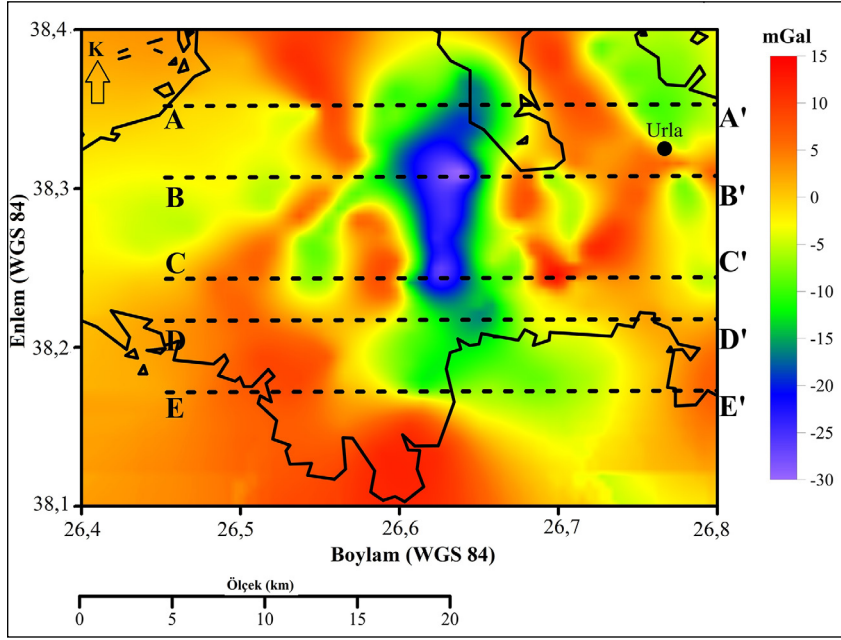
Bouguer ve topoğrafya değerleri arasındaki ilişki, kabuk yapısının izostazi kapsamındaki analizinde önemli rol oynamaktadır (Watts, 2001; Pamukçu ve Yurdakul, 2008; Arslan vd., 2010; Pamukçu ve Akçığ,

2011; Doğru vd., 2018). İzostazi teoremine göre, Bouguer anomalisinde artış olan bölgelerde, topoğrafi anomalisinin azalması beklenir.

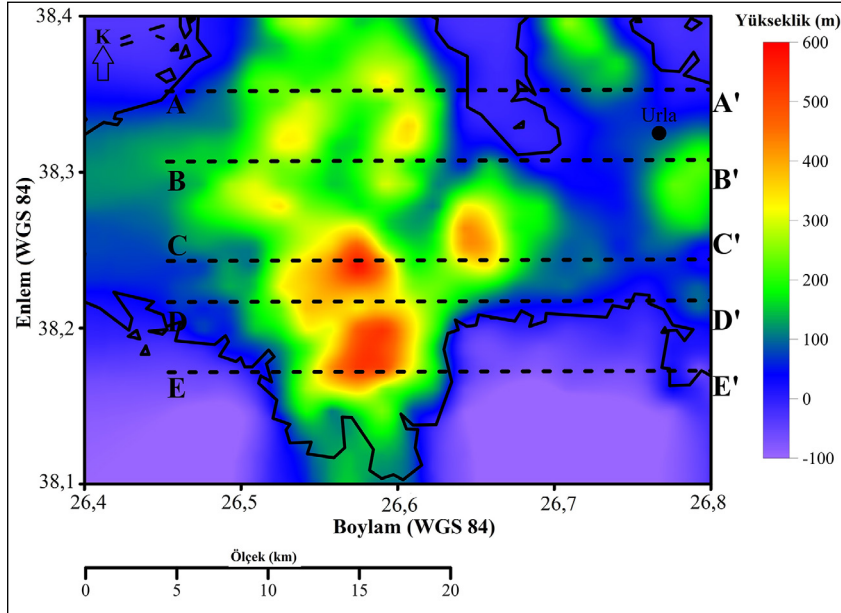
Şekil 6'da görülen, 5 profile ait Bouguer ve topoğrafya değerlerinden kesitler alınmıştır ve iki veri setine ait değişimler Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 4- Serbest-hava gravite ve manyetik anomali haritalarından alınan profillerin uyumluluk analizleri; a) A - A' profili, b) B - B' profili, c) C - C' profili, d) D - D' profili ve e) E - E' profili. Mavi ve kırmızı hatlar sırasıyla serbest-hava gravite ve kutba indirgenmiş (RTP) manyetik anomalilerini temsil eder. Şekil 4a için turkuaz çizgiler h=1 km, yeşil ise h=2 km olan yukarı analitik uzanım seviyesini temsil eder. Şekil 4b ve 4c için pembe h=2 km olan yukarı analitik uzanım, Şekil 4a, 4d ve 4e için ise h=5 km olan yukarı analitik uzanımı temsil eder.



Şekil 5- Bouguer anomalilerine (Şekil 5) birinci derece trend uygulanmıştır.



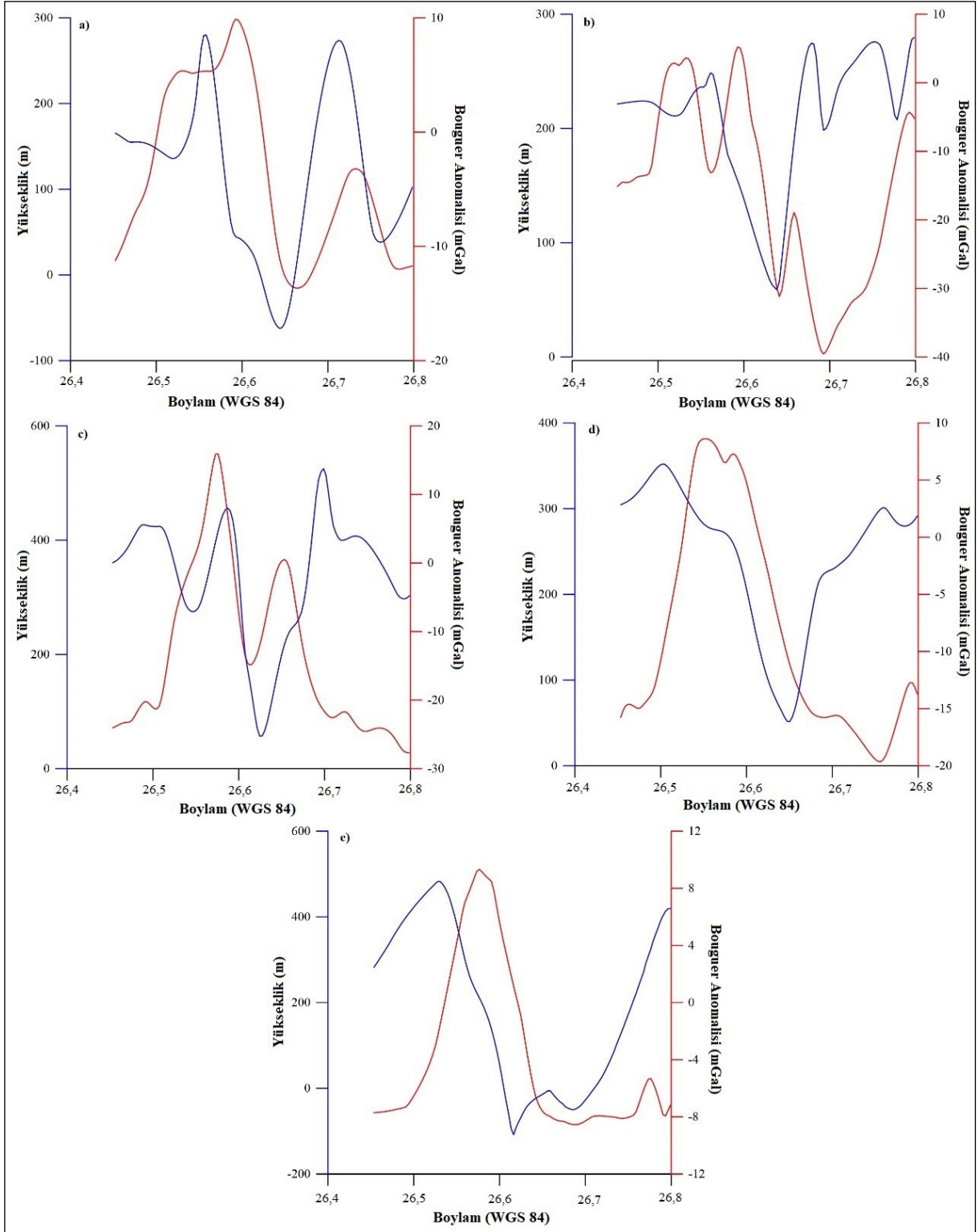
Şekil 6- Topoğrafik harita ve profiller.

2.3. Paransis Metodu ile Yoğunluk Tayini ve Tektonik Stres Hesaplaması

Paransis (1952) metodu, gravite ve topoğrafya varyasyonları arasındaki ilişkiyi kullanarak yoğunluk tayini hesaplanmasını sağlar. Paransis metodu ile yoğunluk eşitliği;

$$\rho = \frac{0.3086 \cdot \frac{\Delta g}{\Delta h}}{0.04191} \quad (1)$$

Burada, ρ yoğunluk, Δg ve Δh sırasıyla ortalama gravite ve topoğrafya verilerini temsil etmektedir. Çalışma alanının ortalama kabuk yoğunluğu değerleri, Eşitlik 1 kullanılarak, Şekil 2'deki serbest



Şekil 7- Birinci derece trend uygulanmış Bouguer gravite anomalisi ve topoğrafya haritalarına ait profil değerleri; a) A - A' profili, b) B - B' profili, c) C - C' profili, d) D - D' profili ve e) E - E' profili.

hava gravite ve topoğrafya profillerinin verileri baz alınarak hesaplanmıştır. Yoğunluk tayini D - D' profili kullanılarak, iki aşamada hesaplanmıştır ve gravite anomali profilindeki değişimlerden (Şekil 2) dolayı iki yoğunluk değeri (Çizelge 1) elde edilmiştir.

Çizelge 1- Profillerin ortalama yoğunluk değerleri.

Profil Adı	Ortalama Yoğunluk Değerleri (gr / cm ³)	
A - A'	2,59	
B - B'	2,06	
C - C'	2,012	
D - D'	1,40	1,80
E - E'	1,49	

Litostatik stresin matematiksel ifadesi derinliğe orantılı üç normal stres değeri ile verilmektedir. Ancak, izostatik dengeye bağlı stresin litostatik hali, dünyanın her yerinde aynı değildir. Yatay normal stres, iki bölümden oluşur: litostatik ve deviatorik stres. Deviatorik stres ($\Delta\sigma_{xx}$) kıtanın statik dengesine bağlı olabilmekle birlikte (Turcotte and Schubert, 2002), aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$\Delta\sigma_{xx} = -\frac{1}{2} gh\Delta\rho \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (2)$$

Burada, g gravite ivmesi, h kıta kalınlığı ρ_c ve ρ_m sırasıyla kabuk ve manto yoğunluğudur. Bouguer

levhası söz konusu ise, düşey gravite anomalisi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir: (Heiskanen ve Moritz, 1967);

$$\Delta g_z = -2\pi h G \Delta\rho \quad (3)$$

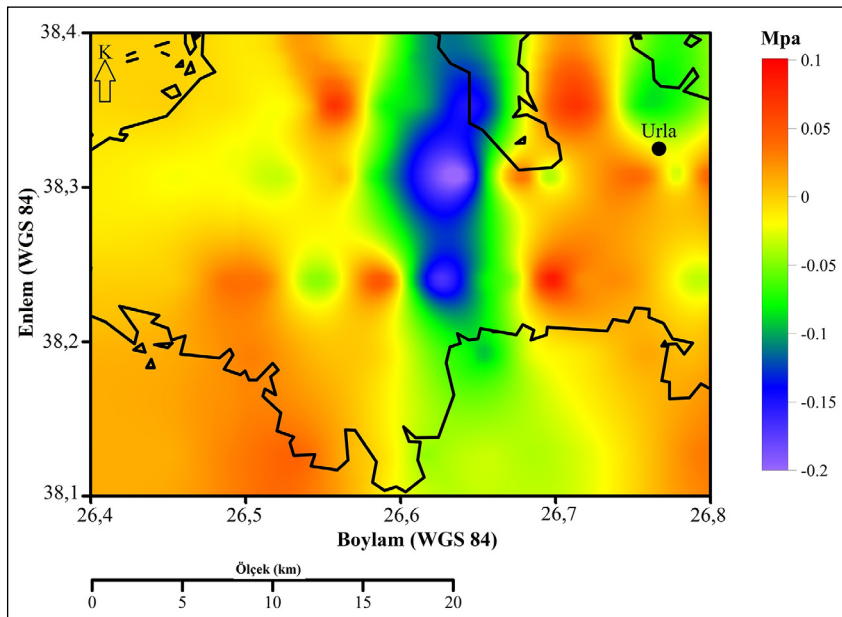
Ortalama kabuk yoğunluğunun ρ_c yerine her bir birimin bloğunun $\rho_{(x,y)}$ yerel yoğunluk değeri kullanılarak, Eşitlik 2 ve 3 birleştirilir ve;

$$\sigma_{xx} = \frac{g\rho_{(x,y)}}{4\pi G\rho_m} \Delta g_z \quad (4)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik 4, gravite anomalisi üzerinden yatay tektonik stresin bulunmasını sağlar (Xu vd., 2015; Pamukçu, 2017).

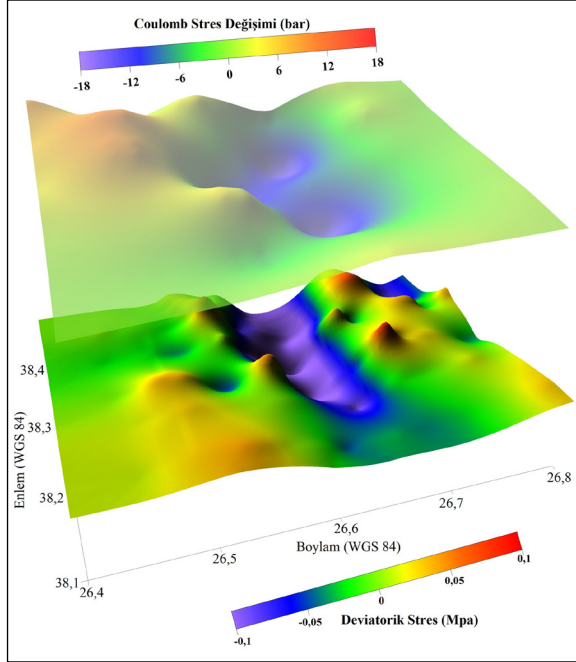
Deviatorik stres, şekil değişimlerine ve makaslama stresinin azalmasına sebep olmakta aynı zamanda yapının bükülme derecesini kontrol etmektedir (Aadnoy ve Looyeh, 2019). Mount ve Suppe (1987), kabuktaki deviatorik stresin, tektonikve yapısal jeolojide önemi henüz tam anlamıyla kavranamamış bir değer olduğunu ileri sürmektedir. Bu bilgi ışığında, Eşitlik 4 kullanılarak elde edilen ortalama yoğunluk değerleri çerçevesinde deviatorik stres değerleri (Şekil 8) hesaplanmıştır.

Ayrıca, çalışma alanının Coulomb, normal ve makaslama stresi değişim değerleri Çırmık vd. (2017a)'nin fay parametreleri ve Global Navigasyon

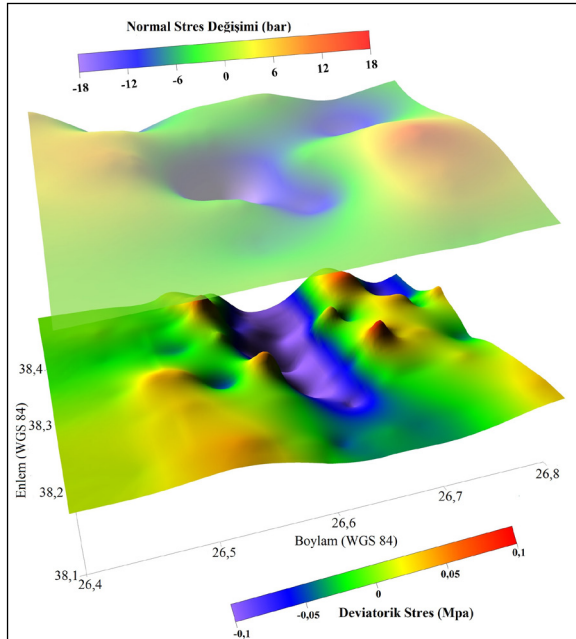


Şekil 8- Gravite verileri ve yoğunluk değerleri kullanılarak elde edilen deviatorik stres değerleri.

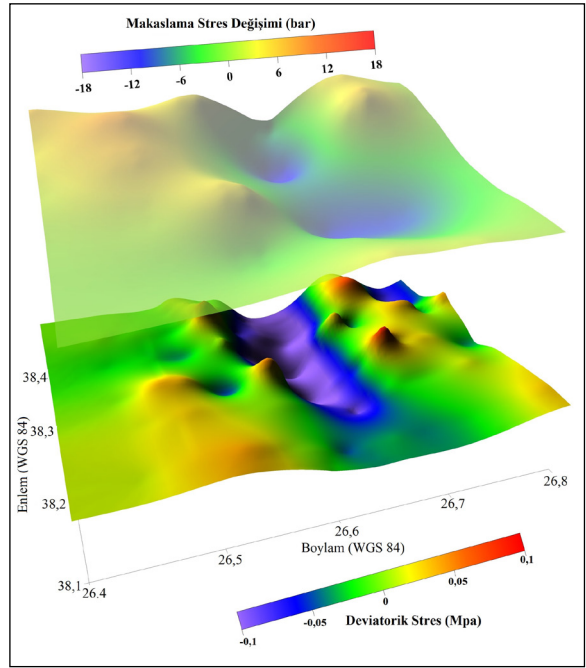
Uydu sistemi (GNSS) verilerinin modellenmesiyle elde edilen stres değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bölgedeki stres değişimleri karşılaştırmak için bu stres değişimleri, deviatorik stres ile birlikte çizilmiştir (sırasıyla Şekil 9, 10 ve 11).



Şekil 9- Çalışma alanının Coulomb ve deviatorik stres dağılımları.



Şekil 10- Çalışma alanının normal ve deviatorik stres dağılımları.



Şekil 11- Çalışma alanının makaslama stresi ve deviatorik stres dağılımı.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada kabuk yapısı ve tektonik stres dağılımlarının incelenmesi amacıyla GFZ ve çevresinde (Şekil 1) yeni mikrogravite ve manyetik veriler ölçülmüştür. Alanın serbest hava gravite anomali değerleri (Şekil 2) 0-70 mGal arasında değişmektedir. Şekil 2’de en düşük değerler kuzey ve merkez GFZ’de olduğu (0 mGal ile ~25 mGal arasında), ortalama değerlerin ise çalışma alanının (Şekil 2) kuzey kıyısında yoğunlaştığı (~30 - 35 mGal) görülmektedir. Bunun yanı sıra, Gülbahçe Körfezi’nin güney kesiminde (Şekil 1) daha düşük değerlere (0 - 35 mGal) rastlanmaktadır. Diğer yandan, çalışma alanının güney kıyısı ve 26,5° - 26,6° boylamları arasında kalan kesim daha yüksek gravite değerleri sunmaktadır. Ek olarak, GFZ’nin güney kesiminin serbest-hava gravite değerleri, kuzey kesimine oranla daha yüksektir.

Kutba indirgenmiş (RTP) manyetik anomali haritasına göre (Şekil 3), değerlerin -450 nT ile 600 nT (Şekil 3) arasında değiştiği gözlenmektedir. Bölgenin çalışma alanının manyetik değerler açısından genel ortalaması 150 nT ile -450 nT arasındadır. Bölgenin bir diğer kesimine ilişkin olarak GFZ (Şekil 3) farklı

(daha düşük) gravite anomali değerlerini temsil etse de, GFZ'ye ait manyetik anomali haritası (Şekil 3), herhangi bir anomalinin net olarak görülmesine imkan tanımamaktadır. 26,4° - ~26,47° boylam, 38,1° - 38,2° enlemleri arasındaki (Şekil 3) yüksek pozitif manyetik değerler dikkat çekmektedir.

Takiben, GFZ ve çevresinin kabuk yapısının incelenmesi için Von Frese vd. (1982) ve Pamukçu vd. (2007)'ne ait yaklaşımlar kullanılarak (Şekil 4) Kutba indirgenmiş (RTP) manyetik, yukarı analitik uzanım uygulanmış manyetik ve serbest-hava gravite anomalisi çerçevesinde 5 profil dahilinde kesitler alınmıştır. Uyumluluk analizi bu veriler arasında yapılmıştır. Serbest hava gravite ve manyetik veriler arasındaki korelasyon incelendiğinde (Şekil 4), ters korelasyonun olduğu durumlarda kabuk incelmesinin olduğu söylenebilir (Von Frese vd., 1982). Yüksek gravite ve manyetizma gösteren alanlar, bölgenin jeolojik birimleri ile karşılaştırıldığında, bu alanların volkanik birimler taşıdığı (Neojen volkanik) görülmektedir (Şekil 1). Bu nedenle, gravite ve manyetik anomalileri arasında pozitif korelasyon (doğru orantı) gösteren bölgelerin topografik bileşenlerine ek olarak volkanik sistemlere bağlı olduğu söylenebilir.

Profillerin detaylı incelenebilmesi için bu profiller, gravite ve manyetik değerlerindeki değişimlerine göre bölümlere ayrılmıştır (Şekil 4). Şekil 4a'da A - A' değerlerini taşıyan profil 3 bölüme ayrılmıştır. Bölüm no:1'deki serbest-hava gravite ve manyetik anomali değerleri ters orantıyı temsil etmektedir. Diğer yandan Bölüm no:2'de de görülebileceği üzere manyetizasyonun azaldığı ve serbest-hava gravite anomalisinin arttığı durumlarda kabuk incemesi beklenmektedir. Bu durum aynı zamanda kabuk kalınlaşması veya manyetizmayı artıran bir girişim ile değerlendirilebilir. Bölüm no: 1'de görülen durumun bir benzeri de Bölüm no:3'de görülmektedir. Bu nedenle, her ne kadar iki bölümde de kabuk incemesi görülse de, Bölüm no:1'deki kabuk incemesi 3'e oranla daha yüksektir. Bu durum manyetik değerlerin bölgeye oranı ile açıklanabilir. Aynı kütle yükünü taşıyan bir kabuk yapısında, manyetik anomali değerlerinin oldukça farklı olması durumunda, farklı bir mekanizma yani kabuk içerisinde deformasyon beklenebilir. Şekil 4b, profil B - B' değerlerini göstermektedir ve bu profil 3 bölüme ayrılmıştır. B - B' profilinin değerleri (Şekil 4b) profil

A - A' değerlerine benzerdir (Şekil 4a). 1 ve 3 nolu bölgelerde A - A' profiline benzer şekilde serbest hava gravite anomali değerleri artarken manyetik anomali değerleri azalmaktadır. Fakat Bölüm no:2'de serbest-hava gravite değerleri azaldığında (genel profile göre) manyetik anomali değerleri düşmektedir. Bu sebeple, bu bölgede kabuğun manyetizasyonunu azaltan önemli bir faktöre sahip olduğu söylenebilir. Şekil 4c'de, profil C - C' değerleri verilmiştir ve bu profil 2 bölüme ayrılmıştır. Bölüm no:1'de yüksek pozitif manyetik anomali değerleri dikkat çekicidir. Bu bölgede kabuğa yüksek manyetizasyonlu bir girişimin varlığından söz etmek mümkündür. Ek olarak, (Şekil 4a, 4b'deki A ve B profillerinin aksine, Bölüm no: 2'de manyetik anomali değerlerinin azaldığı ve serbest-hava gravite ve manyetik anomali değerlerinin ters orantılı şekilde değiştiği görülmektedir. Buna sebep olarak bölgedeki kabuk incemesi gösterilebilir. Şekil 4d'de profil D - D' değerleri verilmiştir ve söz konusu profil 2 bölüme ayrılmıştır. D - D' profilinde (Şekil 4d), Bölüm no:1'deki manyetik anomalileri yüksek pozitif değerlere sahiptir. Bölge no: 1 ve 2 arasında manyetik anomali değerleri hızla azalmaktadır. Bunun yanı sıra, Bölüm no: 2'de (Şekil 4d) görülen serbest hava anomalisi ve azalan manyetik anomali arasındaki ilişki profil C - C' (Şekil 4c) ile benzerlik göstermektedir. Bölüm no: 2'de (Şekil 4d), manyetik anomali değerlerinin genliği diğer A, B ve C (Şekil 4a, b, c), şekillerine göre daha stabildir. Şekil 4e'de, profil E - E' değerleri verilmiş ve bu profil 4 bölüme ayrılmıştır. Bu profil üzerinde, yüksek pozitif manyetik anomali genlikleri Bölüm no: 1'de görülmekte ve profil D (Şekil 4d) ile benzerlik taşımaktadır. Bölüm no: 2 (Şekil 4e)'de görüleceği üzere serbest-hava gravite değerleri yükselmekte ve manyetik anomali değerleri düşmektedir. Bu durum A ve B profillerinde (Şekil 4a, b) de gözlemlenmiştir. Bölüm no: 3'te serbest-hava gravite değerleri kısmen azalsa da, manyetik anomali değerlerinde ciddi bir artışı takiben benzer şekilde azalma gözlemlenmiştir. Bölüm no: 4'te serbest hava anomalisinde gözle görülür bir artış olmaksızın, manyetik anomali değerlerinin azalmaya devam ettiği görülmektedir. Bu durum, bölgedeki kabuk incemesi ile ilişkilendirilebilir.

Şekil 5'te 1. derece trend analizi uygulanmış Bouguer gravite anomali değerlerinin -30 mGal ve 15 mGal arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 7, 5 profile ait Bouguer gravite (Şekil 5) ve topoğrafya

anomalilerinin (Şekil 6) ilişkisini temsil etmektedir. İzostazi teoremine göre, gravite ve topoğrafik verilerdeki mevcut ters orantı, bölgedeki yerel izostatik dengeye işaret eder (Watts, 2001; Pamukçu ve Yurdakul, 2008; Çırmık vd., 2017a). Profil A - A' (Şekil 7a)'da profilin neredeyse tamamında gravite ve topoğrafya değerleri ters orantılıdır ve bu nedenle yerel dengelenmeden bahsedilebilir. Profil B - B' (Şekil 7b), profilin başlangıcından ($\sim 26,4^\circ$ boylam) itibaren $26,6^\circ$ boylama kadar ve $26,7^\circ$ ile $\sim 26,78^\circ$ boylamları arasında ters orantılıdır. Bu nedenle, söz konusu alanlarda yerel izostatik dengeden bahsedilebilir. Diğer bir yandan, $26,62^\circ$ boylamı ve çevresinde Bouguer gravite ve topoğrafya değerleri birlikte düşüş gösterdiği için, kabuksal sorunlar (yüksek basınç, sıvı varlığı vb.) ile karşılaşılacağı söylenebilir. Profil C - C' (Şekil 7c), $26,5^\circ$ ile $\sim 26,54^\circ$ ve $26,66^\circ$ ile $26,69^\circ$ boylamları arasında kalan bölgeler için veri setlerinin ters orantı taşıdığı görülmektedir. Bu nedenle, söz konusu alanlarda yerel izostatik dengeden bahsedilebilir. Benzer bölgeler için ($26,62^\circ$ boylamı ve çevresi) (Şekil 7c) profil B - B' (Şekil 7b), gravite ve topografik değerler arasında doğru orantı gözlemlendiği için kabuksal sorunlar muhtemeldir. Profil D - D' (Şekil 7d) ve E - E' (Şekil 7e)'de görüldüğü üzere, profillerin genel olarak tamamında, veri setleri içerisinde ters orantı hâkimdir. Fakat bu durum, $26,62^\circ$ boylamı ve çevresinde (Bouguer gravite ve topografi değerlerinin eş zamanlı düşüşü), profil B - B' ve C - C' (Şekil 7b, c)'de görüldüğünün aksine, D - D' (Şekil 7d) ve E - E' (Şekil 7e)'de açıkça görülememektedir. Bu sebeple, çalışma alanının bazı kesimleri izostatik olarak dengelenmemiş bir mekanizmaya sahiptir.

Çalışmanın bir diğer aşamasında, gravitasyonel yüklerden kaynaklanan yatay stres dağılımlarının araştırılmasında kullanılan ortalama yoğunluk ve Bouguer gravite anomali değerlerinden faydalanarak, deviatorik stres değerleri (Şekil 8) hesaplanmıştır. Bu çalışma alanında deviatorik stres değerleri $-0,2$ MPa ile $0,1$ MPa arasında değişkenlik göstermektedir (Şekil 8). Ek olarak, Coulomb stres değişimleri, normal ve makaslama stres değişimleri de hesaplanmış ve değişimlerin daha net bir şekilde ele alınabilmesi için deviatorik stres değerleri ile birlikte değerlendirilmiştir (Şekil 9, 10 ve 11). Şekil 9'da, GFZ ve çevresinde Coulomb ve deviatorik stres değerleri negatiftir (Şekil 1). GFZ'nin doğu kesiminde (Urla ve çevresinde, Şekil 1) ve çalışma alanının güneybatısında,

deviatorik stres değerleri pozitif yönde yüksektir fakat bu bölgeler ortalama (yaklaşık olarak sıfır) Coulomb stres değerlerini temsil etmektedir (Şekil 9). Bunun tersine, çalışma alanının kuzeybatısı pozitif (ortalaması yüksek) Coulomb stres değerlerini temsil ederken, ortalama (yaklaşık olarak sıfır) deviatorik stres değerleri göstermektedir. Çalışma alanının güneydoğusu Coulomb ve deviatorik stres haritaları için benzer özellikler temsil eder. Normal ve deviatorik stres (Şekil 10) haritalarında, GFZ'nin her iki haritada da sadece merkezde benzer özellikler taşıdığı (negatif değerler) görülmektedir. GFZ'nin güney ve kuzey kesimler, ortalama normal stres değerleri taşımakta ve deviatorik stres ile uyumluluk göstermemektedir. Bunun yanı sıra, çalışma alanının kuzeydoğu kesimi deviatorik stres değerleri oldukça pozitif olmasına rağmen negatif normal stres değerlerine sahiptir. Bunun yanı sıra, çalışma alanının GD, GB ve KB kesimlerine ait normal ve deviatorik stres değerleri birbirleri ile uyumludur (Şekil 10). Şekil 11'de GFZ'nin merkez ve çalışma alanının GD kesimindeki makaslama stres değerlerinin deviatorik stres değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca, Urla ve çevresinin makaslama stres değerleri Coulomb (Şekil 9) ve normal stres (Şekil 10) değerleri ile deviatorik stres değerleri açısından daha uyumludur. Genel bir sonuç olarak, $26,6^\circ$ boylamı ve $38,3^\circ - 38,4^\circ$ enlemleri arasındaki bölge (GFZ ve çevresi), negatif Coulomb, normal, makaslama ve deviatorik stres değerlerine sahiptir.

Şekil 8'de görülen $26,6^\circ - 26,7^\circ$ boylamları arasındaki bölge en yüksek negatif deviatorik stres değerlerini temsil etmektedir. Şekil 11'de görüldüğü üzere bu bölge aynı zamanda negatif makaslama stresi (GNSS bazlı yatay hareketlerden elde edilen) ve deviatorik stresine sahip olduğu için GFZ'nin tamamen doğrultu atımlı bir fayı temsil ettiği söylenebilir. İzostatik denge mekanizmasına göre, topografik değerler azalıp/artarken, gravite değerleri de artıp/azalmalıdır. B - B' (Şekil 7b) ve C - C' (Şekil 7c) profillerinde, en yüksek negatif deviatorik stres değeri olan kısımlarda (Şekil 8), izostatik denge mekanizması görülmemektedir. Bu nedenle, bu alanlardaki yoğunluğun fiziksel bir faktör tarafından etkilendiği söylenebilir.

Ek olarak, çalışma alanının yer altı ortalama yoğunluk tahmini, Parasnis metodu ile Bouguer

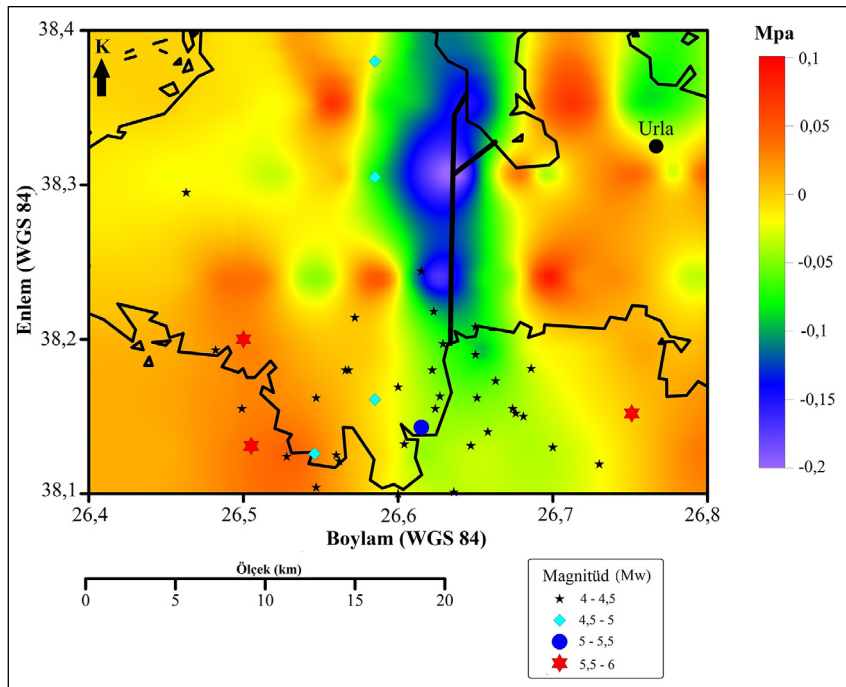
anomali ve 5 profile ait topoğrafi değerleri (Şekil 5, Çizelge 1) kullanılarak yapılmıştır. Çalışma alanının kuzeyinde $2,59 \text{ gr/cm}^3$ olarak ölçülen yoğunluk güneye doğru $2,06$, $1,8$ ve $1,49 \text{ gr/cm}^3$ olarak azalmıştır. Çalışma alanının detaylı jeolojik haritası baz alındığında, bu ekstrem yoğunluk azalmasının sedimanlar, volkanik tüf ve piroklastik birimler kaynaklı olduğu düşünülebilir (Sözbilir vd., 2009; Uzel vd., 2012). Baba vd. (2019), çalışma alanında jeotermal kaynakların muhtemel varlığına değinmiştir. Söz konusu kaynakların muhtemel konumu, düşük yoğunluk, negatif manyetizasyon ve dengesiz bölümlerle ilişkili olabilir.

B - B' profili Bölge no: 2'ye (Şekil 4b) daha yakın olan $\sim 26,6^\circ - 26,63^\circ$ boylamları ile $38,3^\circ$ enlemleri (Şekil 8) arasını kapsayan alanda gravite ve manyetik değerler düşüş göstermektedir. Bu nedenle söz konusu alan ve çevresinde manyetik özelliklerin azalmasını tetikleyen bir faktörün varlığından söz edilebilir. Ek olarak, bu bölge negatif genlik deviatorik, Coulomb, makaslama ve normal stres değerlerini (Şekil 8 - 11) ve yüksek negatif Bouguer anomali değerlerini (Şekil 5) temsil etmektedir. Manyetik haritada (Şekil 3) ve profillere ait korelasyon analizinde (Şekil 4),

manyetik anomalilerin hızla azaldığı ve çalışma bölgesinin güneyinde negatif genlikleri temsil ettiği görülmektedir. Bu durum, kabuğun ortalama yoğunluk değerlerine ait (kuzeyden güneye azalan) dağılımlar ile uyumludur (Çizelge 1). Manyetik anomalideki (Şekil 4b) en yüksek azalma (yaklaşık -500 nT) $\sim 26,62^\circ$ boylamına denk gelmektedir (Şekil 8). Negatif yüksek stres değerlerine sahip olan bu bölgede, daha sığ derinliklere doğru yüksek sıcaklı kabuksal malzemelerin ve alt kabukta yüksek deformasyonun varlığı düşünülebilir.

Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS)'den alınan 1970 ve 2020 yılları arasında meydana gelmiş $M > 4$ olan depremler Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu depremler deviatorik stres ile incelendiğinde (Şekil 12), negatif deviatorik stres değerine sahip bölgelerde herhangi bir depremin yaşanmadığı görülmektedir.

Sismik açıdan aktif olmayan bölge (Şekil 12) aynı zamanda yüksek negatif Coulomb (Şekil 9), normal (Şekil 10) ve makaslama (Şekil 11) stres anomalilerine sahiptir. Bouguer gravite anomalileri (Şekil 5) bu bölgede yüksek negatif değerler sunmaktadır. Böylelikle, bu bölgenin kabuksal



Şekil 12- 1970-2020 yılları arasında meydana gelen ($M > 4$) depremler ile deviatorik stres değerleri. Veriler Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar'ndan alınmıştır (USGS, 2021; <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>).

yapısının akışkan (ductile) olduğu söylenebilir. Çünkü, eğer kabuğun yoğunluğu beklenen değerlerden daha düşük olduğu durumda, kabuğun yapısı akışkandır ve böylece bölgede sismisite beklenmez. Ayrıca, bu fikir jeotermal yapıların varlığı (Baba vd., 2019), kabuk incelmeye yönelik bulgular (Şekil 4) ve çalışma alanındaki izostatik olmayan denge şartları (Şekil 7) ile de desteklenmektedir.

Katkı Belirtme

Bu çalışmada Dokuz Eylül Üniversitesi Araştırma Projesi (Proje No: DEU - BAP 2018.KB.FEN.010) ve TÜBİTAK (Proje No: 108Y285) tarafından desteklenen projeye ait gravite ve manyetik verileri kullanılmıştır.

Değınilen Kaynaklar

- Aadnoy, B., Looyeh, R. 2019. Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design. Gulf Professional Publishing. 460.
- Akıncı, A., Eyidoğan, H., Göktürkler, G., Akyol, N., Ankaya, O. 2000. İzmir ili çevresinin depremselliği ve deprem tehlikesinin incelenmesi. Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu (BADSEM 2000) İzmir, Bildiri Kitabı, 231-238 (in Turkish).
- Aktuğ, B., Kılıçoğlu, A. 2006. Recent crustal deformation of İzmir, Western Anatolia and surrounding regions as deduced from repeated GPS measurements and strain field. *Journal of Geodynamics* 41, 471-484.
- Ambraseys, N. N. 1988. Engineering seismology. *Earthquake Engineering Structural Dynamical* 17, 1-105.
- Arslan, S., Akın, U., Alaca, A. 2010. Gravite verileri ile Türkiye'nin kabuk yapısının incelenmesi. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 140, 57-73.
- Baba, A., Şaroğlu, F., Akkuş, I., Özel, N., Yeşilnacar, M. İ., Nalbantçılar, M. T., Demir, M. M., Gökçen, G., Arslan, Ş., Dursun, N., Uzelli, T., Yazdani, H. 2019. Geological and hydrogeochemical properties of geothermal systems in the southeastern region of Turkey. *Geothermics* 78, 255-271.
- Barka, A. A., Kadinsky Cade, K. 1988. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics* 7, 663-684.
- Bozkurt, E. 2001. Neotectonics of Turkey- a synthesis. *Geodinamica Acta* 14, 3-30.

- Çetiner, M. 2012. İzmir ve çevresindeki mikrogravite verilerinin değerlendirilmesi. MSc Thesis, Dokuz Eylül University, The Graduate School of Nature and Applied Sciences, 78, İzmir.
- Çırmık, A., Pamukçu, O. 2017. Clarifying the interplate main tectonic elements of Western Anatolia, Turkey by using GNSS velocities and Bouguer gravity anomalies. *Journal of Asian Earth Science* 148, 294-304.
- Çırmık, A., Özdağ, O. C., Doğru, F., Pamuk, E., Gönenç, T., Pamukçu, O., Akgün, M., Arslan, A. T. 2016. The soil behaviours of the GNSS station. *Earth Sciences* 5(5), 70-81.
- Çırmık, A., Doğru, F., Gönenç, T., Pamukçu, O. 2017a. The stress / strain analysis of kinematic structure at Gülbahçe Fault and Uzunkuyu Intrusive (İzmir, Turkey). *Pure and Applied Geophysics* 174(3), 1425-1440.
- Çırmık, A., Pamukçu, O., Gönenç, T., Kahveci, M., Şalk, M., Herring, T. 2017b. Examination of the kinematic structures in İzmir (Western Anatolia) with repeated GPS observations (2009, 2010 and 2011). *Journal of African Earth Sciences* 126, 1-12.
- De Ritis, R., Ventura, G., Chiappini, M., Carluccio, R., Von Frese, R. 2010. Regional magnetic and gravity anomaly correlations of the Southern Tyrrhenian Sea. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 181(1-2), 27-41.
- Dewey, J. F., Şengör, A. M. C. 1979. Aegean and surrounding regions: complex multi plate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin Part 1* 90, 84-92.
- Doğru, F., Pamukçu, O. 2019. Analysis of gravity disturbance for boundary structures in the Aegean Sea and Western Anatolia. *Geofizika* 36(1), 53-76.
- Doğru, F., Pamukçu, O., Gönenç, T., Yıldız, H. 2018. Lithospheric structure of western Anatolia and the Aegean Sea using GOCE-based gravity field models. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 59(2), 135-160.
- Doğru, F., Pamukçu, O., Özsoz, I. 2017. Application of tilt angle method to the Bouguer gravity data of Western Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 155(155), 213-222.
- Emre, O., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım, C., Gökaş, F. 2005. İzmir yakın çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Rapor No: 10754, Ankara (yayımlanmamış).

- Erbek, E., Dolmaz, M. N. 2014. Geophysical researches (gravity and magnetic) of the Eratosthenes Seamount in the eastern Mediterranean Sea. *Acta Geophysica* 62(4), 762-784.
- Heiskanen, W. A., Moritz, H. 1967. Physical geodesy. *Bulletin Geodesique* 86, 491-492.
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R. B., Saad, A. H. 2013. Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices and Applications. Cambridge University Press, 502.
- Göktaş, F. 2016. Ildır Körfezi güneyindeki bölgenin Neojen stratigrafisi Çeşme Yarımadası, Batı Anadolu. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 59(3), 299-321 (in Turkish).
- Ketin, İ. 1948. Über die tektonisch - mechanischen Folgerungen aus den grossen Anotolischen Erdbeben des letzten Dezenniums. *Geologische Rundschau* 36, 77-83.
- Malaliçi, B. C. 2019. Gülbahçe fayı ve çevresinin jeodinamik yapısının irdelenmesi. MSc Thesis, Dokuz Eylül University, The Graduate School of Nature and Applied Sciences, 77, İzmir.
- McKenzie, D. 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 30, 109-185.
- Mount, V. S., Suppe, J. 1987. State of stress near the San Andreas fault: implications for wrench tectonics. *Geology* 15(12), 1143-1146.
- Ocakoğlu, N., Demirbağ, E., Kuşçu, İ. 2005. Neotectonic structures in İzmir Gulf and surrounding regions (western Turkey): evidences of strike-slip faulting with compression in the Aegean extensional regime. *Marine Geology* 219(2-3), 155-171.
- Pamuk, E. 2019. Investigating edge detection, Curie point depth, and heat flow using EMAG2 magnetic and EGM08 gravity data in the northern part of Eastern Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 28(6), 805-821.
- Pamukçu, O. 2017. Stress analysing with gravity data. 3. International Conference on Engineering and Natural Science, 3 - 7 May 2017, Budapest, 600-602.
- Pamukçu, O. A., Akçığ, Z. 2011. Isostasy of the Eastern Anatolia (Turkey) and discontinuities of its crust. *Pure and Applied Geophysics* 168(5), 901-917.
- Pamukçu, O., Yurdakul, A. 2008. Isostatic compensation in Western Anatolia with estimate of the effective elastic thickness. *Turkish Journal of Earth Sciences* 17, 545-557.
- Pamukçu, O., Akçığ, Z., Demirbağ, Ş., Zor, E. 2007. Investigation of crustal thickness in eastern Anatolia using gravity, magnetic and topographic data. *Pure Applied Geophysics* 164, 2345-2358.
- Pamukçu, O., Gönenç, T., Çırmık, A., Pamukçu, Ç., Ertürk, N. 2019. The geothermal potential of Büyük Menderes Graben obtained by combined 2.5 - D normalized full gradient results. *Pure and Applied Geophysics* 176(11), 5003-5026.
- Pamukçu, O., Gönenç, T., Çırmık, A., Sındırgı, P., Kaftan, I., Akdemir, Ö. 2015. Investigation of vertical mass changes in the south of İzmir (Turkey) by monitoring microgravity and GPS/GNSS methods. *Journal of Earth System Science* 124(1), 137-148.
- Pamukçu, O., Gönenç, T., Yurdakul, A., Kahveci, M. 2013. Sismik riski yüksek olan İzmir - Karaburun'un güneyinde yapılmış mikrogravite ve GPS çalışmaları. *Jeofizik* 18, 59-66.
- Pamukçu, O., Gönenç, T., Yurdakul, A., Özyalın, Ş., Sözbilir, H. 2012. Application of boundary analysis and modelling methods on Bouguer gravity data of the Gediz Graben and surrounding area in Western Anatolia and its tectonic implications. *Journal of the Balkan Geophysical Society* 15, 19-30.
- Parasnis, D. S. 1952. A study of rock densities in English Midlands. *Geophysical Journal International* 6, 252-271.
- Saleh, S., Jahr, T., Jentzsch, G., Saleh, A., Abou Ashour, N. M. 2006. Crustal evaluation of the northern Red Sea rift and Gulf of Suez, Egypt from geophysical data: 3-dimensional modeling. *Journal of African Earth Sciences* 45(3), 257-278.
- Sözbilir, H., Softa, M., Eski, S., Tepe, Ç., Akgün, M., Pamukçu, O., Çırmık, A., Utku, M., Özdağ, C. Ö., Özden, G., Özçelik, Ö., Evlek, D. A., Çakır, R., Baba, A., Uzelli, T., Tatar, O. 2020. 30 October 2020 Sisam (Samos) Earthquake (Mw: 6.9) Evaluation Report, Dokuz Eylül University Earthquake Research and Application Center (in Turkish).
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Uzel, B., Ersoy, Y., Erkül, F., İnci, U., Helvacı, C. Özkaymak, Ç. 2009. 17 - 20 Ekim 2005 - Sığacık Körfezi (İzmir) depremlerinin sismik jeomorfolojisi ve bölgedeki gerilme alanları ile ilişkisi, Batı Anadolu. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 52 (2), 217-238 (in Turkish).
- Şengör, A. M. C., Yılmaz, Y. 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics* 75, 181-241.

- Şengör, A. M. C., Görür, N., Şaroğlu, F. 1985. Strike - slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. *Special Publications of the Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists* 37, 227–264.
- Taymaz, T., Jackson, J., McKenzie, D. P. 1991. Active tectonics of the North and Central Aegean Sea. *Geophysical Journal International* 106, 433–490.
- Turcotte, D. L., Schubert, G. 2002. *Geodynamics*. Cambridge University Press, 456.
- USGS (United States Geological Survey earthquake catalog). <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. 1 June 2021.
- Uzel, B., Sözbilir, H. 2008. A first record of strike - slip basin in western Anatolia and its tectonic implication: The Cumaovası basin as an example. *Turkish Journal of Earth Sciences* 17, 559–591.
- Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç. 2012. Neotectonic evolution of an actively growing superimposed basin in western Anatolia: the inner bay of İzmir, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences* 21(4), 439-471.
- Von Frese, R. R. B., Hinze, W. J., Braile, L. W. 1982. Regional North American gravity and magnetic anomaly correlations. *Geophysical Journal International* 69, 145-761.
- Von Frese, R. R., Jones, M. B., Kim, J. W., Kim, J. H. 1997*a*. Analysis of anomaly correlations. *Geophysics* 62(1), 342-351.
- Von Frese, R. R., Jones, M. B., Kim, J. W., Li, W. S. 1997*b*. Spectral correlation of magnetic and gravity anomalies of Ohio. *Geophysics* 62(1), 365-380.
- Watts, A. B. 2001. *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*. Cambridge University Press, 458.
- Xu, C., Wang, H. H., Luo, Z. C., Ning, J. S., Liu, H. L. 2015. Multilayer stress from gravity and its tectonic implications in urban active fault zone: a case study in Shenzhen, South China. *Journal of Applied Geophysics* 114, 174-182.

