

BOUGUER GRAVİTE ANOMALİLERİ SINIR ANALİZLERİNİN ARİTMETİK YÖNTEMLERLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Enhancing Boundary Analysis Results Of Bouguer Anomalies Using Arithmetical Methods

Nedim Gökhan Aydın ^{1,*}, Turgay İşseven ¹

¹ İ.TÜ. Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa – İstanbul

Yayına Geliş (Received): 00.00.00, Yayına Kabul (Accepted): 00.00.00

*Sorumlu yazar/Corresponding author: Nedim Gökhan AYDIN – aydinn@itu.edu.tr

Öz

Gravite verilerinin yatay ve düşey bileşenlerinin kendi içlerindeki değişimleri ya da birbirleriyle olan ilişkilerinin incelenmesi ile anomali veren olası yeraltı yapılarının sınırları kestirilebilir. Anomalilerdeki genlik değişimlerine duyarlı olan bu kestirim yöntemleri sınır analizi adını alır ve Bouguer gravite verilerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılır. Genlik-duyarlı olmasının bir etkisi olarak, verinin farklı dalga boylarında ve farklı genliklere sahip çokça anomali içeriyor olması sınır analizi yöntemlerinin yeterli sonuç vermesine engel olabilir. Sınırları kestirilmek istenen yapının geometrisi ile ilgili bilgi sahibi olunması durumunda, bu geometrinin sınır analizi ile belirlenmesini zorlaştıran anomalilerin veriden çıkarılması için basit aritmetik işlemler uygulanabilir. Benzer şekilde, sınır analizinin uygulanmasının ardından elde edilen sonuçlar da hedeflenen geometrinin belirginleştirilmesi için aritmetik işlemlerle iyileştirilebilir. Bu çalışmada, sınır analizi sonuçlarının analiz öncesinde ve/veya sonrasında uygulanacak bir takım aritmetik işlemler ile iyileştirilmesi üzerinde durulmuştur. Verinin kırılması (daraltılması), aykırı nokta ayıklama, kayan ortalama, interpolasyon, genlik kırma, genlik ölçekleme ve matris aritmetiğinin sınır analizi sonuçlarına etkileri, geometrisi bilinen bir modelden hesaplanan yapay Bouguer anomalilerine uygulanarak sunulmuştur. Daha sonra aynı işlemler Menderes Grabeni (Batı Anadolu) ve civarına ait gerçek Bouguer gravite verileri kullanılarak test edilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Çalışmanın sonunda sınır analizini iyileştirmek adına uygulanan işlemlerin etkileri ve sonuçların netliği ile işlemler sırasında kaybedilen veri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: gravite, sınır analizi, Bouguer anomalisi, potansiyel alan, sonuç iyileştirme.

Abstract

Boundaries of possible underground structures causing anomalies in gravity data can be estimated by examining horizontal and vertical components of gravity data, their internal variations and relationships with each other. These estimations, that are sensitive to amplitude changes within the anomalies, are called boundary analyses and are commonly used in gravity data interpretations. As a negative result of being amplitude-sensitive, datasets containing many anomalies with various wavelengths and amplitudes may cause boundary analysis results to be poor. In case of having the knowledge about the geometry of the structure that is being studied, it is possible to apply simple arithmetical processes in order to exclude the anomalies that are disrupting the boundary analysis results. Similarly, the results of the boundary analyses can be enhanced to increase the prominence of the aimed geometry using arithmetical processes. This study focuses on the enhancement of the boundary analysis results via application of simple arithmetic processes before and/or after boundary analyses. The effects of cropping the data, outlier point removal, moving averages, interpolation, amplitude cropping, amplitude scaling and matrix arithmetics to the results are presented by applying the operations on an artificial Bouguer anomaly, calculated from a model whose geometry is known. Later on, the same processes are tested using actual gravity data from Menderes Graben (Western Anatolia) and surrounding area. Finally, the effects of applied processes to enhance the boundary analysis results and the relation between the result clearness and data loss are evaluated.

Key words: gravity, boundary analysis, edge detection, Bouguer anomaly, potential field, enhancement.

GİRİŞ

Jeofizikte gravite yöntemi, Yer içerisindeki jeolojik oluşumların yoğunluklarına ve geometrilerine duyarlıdır. Bağlı gravite ölçüleri ile toplanan ve birtakım düzeltmeler sonucu elde edilen Bouguer gravite anomalileri Yer'in şekli ve topoğrafyasından kaynaklı etkilerden arındığı için yer içi yoğunluk dağılımları ile ilgili doğrudan bilgi sağlar (Blakely, 1996). Anomalilerde gözlemlenen farklı dalgaboyları ve genlikler farklı derinliklerdeki yapıları işaret etmekle birlikte bu anomaliler araştırılmak istenen derinliğe bağlı olarak filtrelenebilmektedir (Spector ve Grant, 1970). Derinlik, yoğunluk ve geometri parametrelerinden herhangi ikisinin bilinmesi durumunda, üçüncüsü eldeki Bouguer gravite anomalileri kullanılarak modelleme yoluyla hesaplanabilir (Cordell ve Henderson, 1968).

Bouguer anomalilerinin diğer bir kullanım alanı düşey süreksizliklerin (yapı sınırları, faylar gibi) tespit edilmesidir. Zira anomalilerde herhangi bir yönde görülen genlik değişimi o yönde yoğunlukta değişim olduğunu gösterir. Gravite ve manyetik anomaliler gibi potansiyel verilerden yapı sınırlarının kestirilmesi amacıyla yapılan hesaplamalar sınır analizi adını almaktadır. Yön bağımlı değişimin incelenebilmesi için en etkin yöntem anomalinin türevlerinin hesaplanması olduğundan sınır analizi yöntemlerinin büyük çoğunluğu yatay ve düşey türevlere, bunların birbirleriyle oranına ya da aralarındaki açısız bağlantılara dayanmaktadır.

Belirtildiği üzere, yapıların derinlikleri ile anomalilerin genlikleri ve dalgaboyları arasında doğrudan bir ilişki vardır (Spector ve Grant, 1970). Söz konusu ilişki, sınır analizi sonuçlarında da dalgaboyu ve genlik farklılıkları olarak kendisini gösterir; keskin ve sık sınırlar küçük dalgaboyu-büyük genlikle kendilerini gösterirken, daha yumuşak ve derin olan sınırlar ise büyük dalgaboylarında ve küçük genliklerde izlenir. En doğru yaklaşım sınır analizi öncesinde filtreleme yapmak olsa da sınır analizi sonrasında yalnızca hedeflenen derinliğe ait sınırların kestirilebilmesi mümkün olmalıdır.

Bu çalışmada, Bouguer gravite verilerine uygulanan sınır analizi tekniklerinin basit aritmetik işlemlerle amaca yönelik şekilde iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, sınır analizi öncesinde veriye kırpma, yeniden örnekleme ya da aykırı nokta ayıklama işlemleri uygulanabileceği gibi, sınır analizi sonrasında genlik kırpma, dört işlem ya da filtreleme de uygulanabilir. Tüm bu işlemlerin yapılması için MATLAB ortamında bir yazılım hazırlanmış ve bu

yazılım kullanılarak iki yapay ve bir gerçek Bouguer gravite anomalisi üzerinde sınır analizi iyileştirmeleri uygulanmıştır.

TEMEL SINIR ANALİZİ YÖNTEMLERİ VE SONUÇLARIN İYİLEŞTİRİLMESİ

Bouguer gravite anomalilerinden olası yapısal sınırları belirleyebilmek için birtakım yöntemler mevcuttur. Sınır analizlerinin amacı anomalilerdeki genlik değişimlerini yakalamak olduğundan yöntemlerin büyük çoğunluğu anomalilerin türevlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Bir g Bouguer gravite anomalisi üzerinde yatay eksenler (x ve y) doğrultularında alınan birinci türevler bu doğrultulardaki genlik değişimlerini ortaya koyar. x ve y doğrultularındaki türevlerin etkilerinin birleştirilmesiyle elde edilen anomali, Yatay Türevlerin Genliği (YTG) adını alır ve anomalideki genlik değişimlerini yön-bağımsız olarak ifade eder (Denklem 1).

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

YTG yöntemine benzer şekilde, x ve y doğrultularındaki yatay türevlerin yanına z yönündeki düşey türev de dahil edilmesiyle Analitik Sinyal (AS) anomalileri (Miller ve Singh, 1994) elde edilir (Denklem 2).

$$AS = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

Theta Map (TM) Bouguer gravite anomalisinin türevlerine dayanan diğer bir sınır analizi yöntemidir ve YTG anomilerinin AS anomalilerine oranlanmasıyla hesaplanır (Wijns ve diğ., 2005). Tilt açısı (TA) yöntemi de sınır analizlerinde kullanılan türeve dayalı bir yöntemdir ve düşey türev ile YTG arasındaki açının arctanjant yoluyla hesaplanmasına dayanır (Nabighian, 1972).

Yukarıda belirtilen yöntemlerin tamamı anomalilerin birinci türevleriyle kullanılsa da ikinci türevlerin hesaplanmasıyla bu yöntemler geliştirilebilmektedir. Örneğin, aynı anomaliye iki kere YTG uygulanıp ikinci yatay türev haritaları elde edilirse, yerel anomali sınırlarını belirgin hale getiren bir anomali haritası elde edilir. Benzer şekilde, bir anomaliye TA yöntemi uygulandıktan sonra YTG uygulanarak tilt açısındaki değişim izlenebilir.

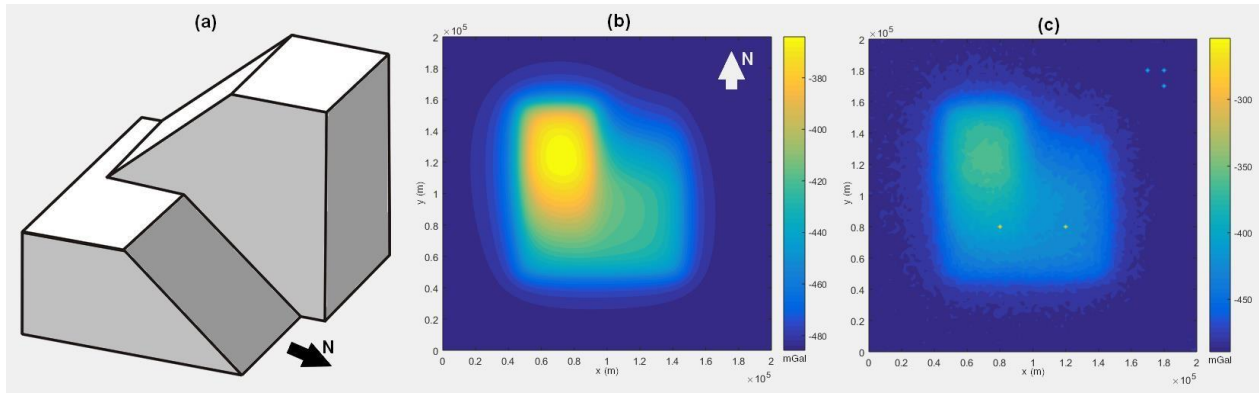
Hangi yöntemin uygulandığı fark etmeksizin anomaliler incelendiğinde fark edilebilen sınırların bir kısmı sınır analizi sonuçlarında belirgin olmayabilir.

Farklı genlikteki anomalilerin maskeleyesi ve küçük yerel anomaliler hedeflenen yapının sınırlarının belirlenmesini zorlaştırır. Sınır analizi yöntemlerinin yetersiz kaldığı bu gibi durumlarda veriye sınır analizi uygulamadan önce veya sonra birtakım basit matematiksel işlemler uygulanarak verinin genlik içeriği düzenlenebilir ve sınır analizine verdiği cevap iyileştirilebilir.

Sınır analizi sonuçlarının iyileştirme aşamasında yapılan işlemler anomali haritalarını değişime uğratacağından işlemler süresince bir takım koşulların sağlanması gerekmektedir. Bilindiği üzere birincil olarak işlem sonucunda, orijinal anomali haritasında izi görünmeyen yeni anomalilerin oluşmaması ve mevcut anomalilerin yerlerinin değişmemesi gerekir. İkincil olarak, hedeflenen yapıya ait sınırların korunması

gerekir. Sonucunu ise veri kaybı-sınır netliği oranının iyi dengelenmesinin gerekliliğidir.

Sınır analizi sonuçlarının iyileştirilme işlemlerini uygulayarak sunabilmek için iki ayrı Bouguer gravite verisi hazırlanmıştır. Verilerin ilki (RM) iki adet rampadan oluşan 2 km yükseklikteki yapay bir modelin 3 km derinliğe yerleştirilmesiyle elde edilmiş Bouguer anomalileridir (Şekil 1.a, b). RM anomalisine rastgele gürültü ve birkaç aykırı nokta eklenerek Şekil 1.c'de gösterilen anomaliler oluşturulmuştur. İkinci veri (MN) ise Batı Anadolu'da Menderes Grabeni ve çevresine ait gerçek Bouguer gravite verilerinden elde edilmiştir. Çalışmanın bu kısmındaki iyileştirmeler RM modeline adım adım uygulanarak açıklanmıştır. MN verisi ise SINIR ANALİZİ İYİLEŞTİRMELERİNİN GERÇEK BOUGUER GRAVİTE VERİSİNE UYGULANMASI başlığı altında işlenerek yorumlanacaktır.

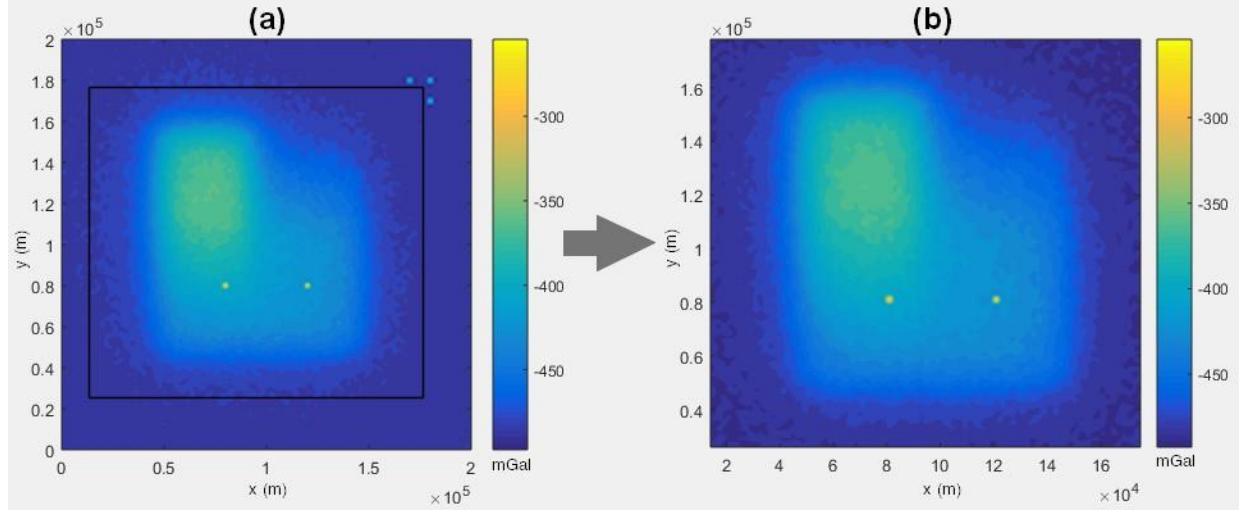


Şekil 1. a) RM modelinin üç boyutlu görüntüsü, b) RM modelinden elde edilen Bouguer anomalileri, c) Gürültü ve aykırı nokta eklendikten sonra elde edilen RM anomalileri.

Figure 1. a) 3D view of RM model b) Bouguer anomalies calculated from RM model, c) RM anomalies after adding random noise and a few outlier points.

Kırpma: Hedef yapı sınırlarının civardaki daha keskin sınırlar dolayısıyla maskelenmesi durumunda uygulanabilecek en basit işlem veriyi yalnızca ilgililen alanı kapsayacak şekilde kırpmaktır. Kırpılmış olan anomalilere sınır analizi uygulandıktan sonra elde edilen sonuçlar, kırılmadan önce elde edilen sonuçlarla birleştirilerek net sonuç alınamayan bölgelerde yapılacak sınır işaretlemeleri kolaylaştırılabilir. Şekil 2'de RM

anomalilerinin ortasındaki genlikleri korumak suretiyle kırılması ve anomalinin kuzeydoğu kısmındaki aykırı noktaların dışarıda bırakılması gösterilmiştir. Şekil 2.a'da anomalinin kuzeydoğu kısmında görülen üç aykırı nokta, anomalinin şekilde gösterilen siyah kutu ile sınırlanan bölgeden kırılması ile anomalinin dışında bırakılmış ve Şekil 2.b'de verilen yeni anomali elde edilmiştir.

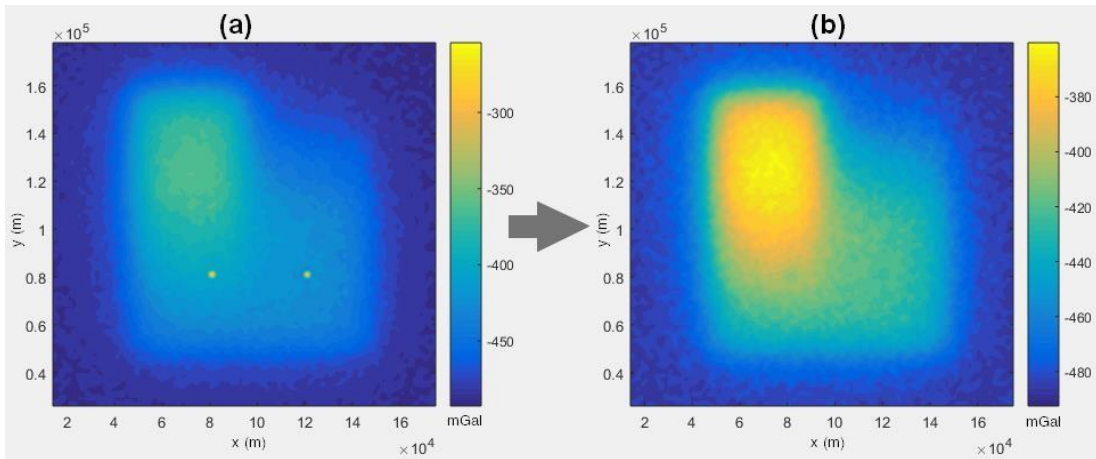


Şekil 2. a) RM anomalisi ve kırılacak alan (siyah kutu), b) Kırılmış RM anomalisi.
Figure 2. a) RM anomalies and cropping area (black box), b) Cropped RM anomalies.

Şekil 2’de görüldüğü üzere anomalinin belirtilen sınırlardan kırılmış olması genlikler üzerinde bir etki yaratmamıştır. Verinin kuzeydoğu köşesinde yer alan ve sınır analizlerinde mutlak suretle maskeleyici etki yapacak olan kısa dalgaboylu anomaliler verinin dışında bırakılmıştır. Verinin orta kısımlarında bulunan ve ~70 mGal’lik genlik farkı yarattığı görülebilen iki aykırı nokta kırma ile giderilemeyecek pozisyonlarda olup, aykırı nokta ayıklama yöntemi ile giderilmeye çalışılacaktır.

Aykırı Nokta Ayıklama: Anomaliyi oluşturan veriler içerisindeki aykırı (çevresine göre çok yüksek ya da çok düşük değerli) noktalar sınır analizlerinde baskın genliklere yol açacağından yorumlamayı zorlaştıracaktır. Aykırı noktalar temizlenirken veriler atılabilir ya da

etkilerini azaltacak şekilde yumuşatılabilir. Her iki durumda da, verinin toplandığı haliyle özgün olan dağılımı bozulacak ve dolayısıyla veri kaybı yaşanacaktır. Aykırı noktaların çok fazla olması gürültülü veriyi işaret edecek ve etkileri kayan ortalama filtreleriyle minimize edilebilecektir. Ancak bu durumda aykırı nokta bulunmayan bölgelerde de veri kaybı yaşanacağı çok açıktır. Bu tür bir durumla karşılaşıldığında daha önce bahsedildiği gibi verinin aykırı nokta içeren kısımları kırılarak veri yumuşatılmalı ve daha sonra yeniden özgün veriye dahil edilmelidir. Yumuşatma işlemi aykırı noktanın çevresindeki genliklere duyarlı bir şekilde yapırsa sınır analizindeki etkisi daha da azalacaktır. Şekil 3’de aykırı nokta ayıklamanın RM verisindeki etkisi görülmektedir.

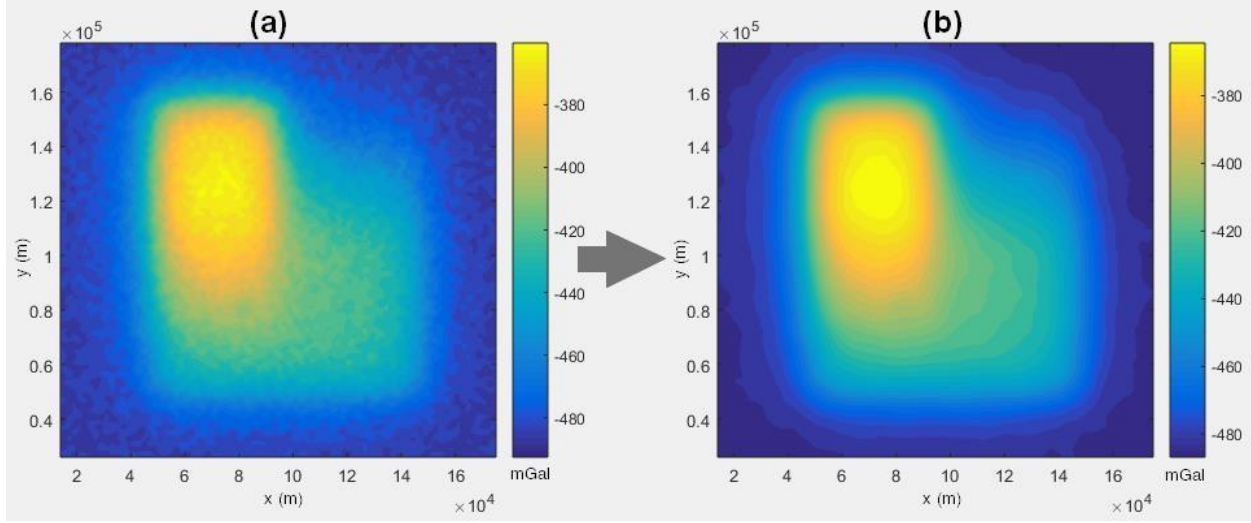


Şekil 3. a) Aykırı nokta içeren RM anomalisi, b) Aykırı noktalar ayıklandıktan sonra RM anomalisi.
Figure 3. a) RM anomalies with outlier points, b) RM anomalies after outlier points removed.

Şekil 3.a'da da görülen yüksek genlikli iki aykırı noktanın yumuşatılması ile Şekil 3.b'de verilen anomali haritası elde edilmiştir. Dikkatle incelendiğinde ayıklanmış aykırı noktaların izleri hala görülebilmektedir, ancak söz konusu noktaların anomali üzerindeki maskeleyici etkileri tamamen giderilmiş ve model ile tanımlanan yapı (Şekil 1.a) seçilebilir hale gelmiştir.

Kayan Ortalama: Kayan ortalama işlemi tüm veriye uygulandığı taktirde aykırı noktaları yumuşatacağı

gibi (genellikle yerel anomalilerden kaynaklanan) keskin anomali sınırlarını da yumuşatacağıdır. Küçük dalgaboylu anomalilerde veri kaybına neden olsa dahi, daha büyük dalgaboylu anomalilerin tespitini kolaylaştıracaktır. Dolayısıyla, yüzeysel anomalilerin sınırlarını bulmak hedefleniyorsa sınır analizinden önce uygulanacak olan iyileştirmelerde kayan ortalama işleminden kaçınılması gerekir. Şekil 4.a'da ayıklanmış RM verisi, Şekil 4.b'de ise bu anomalinin kayan ortalama ile filtrelenmiş hali verilmektedir.



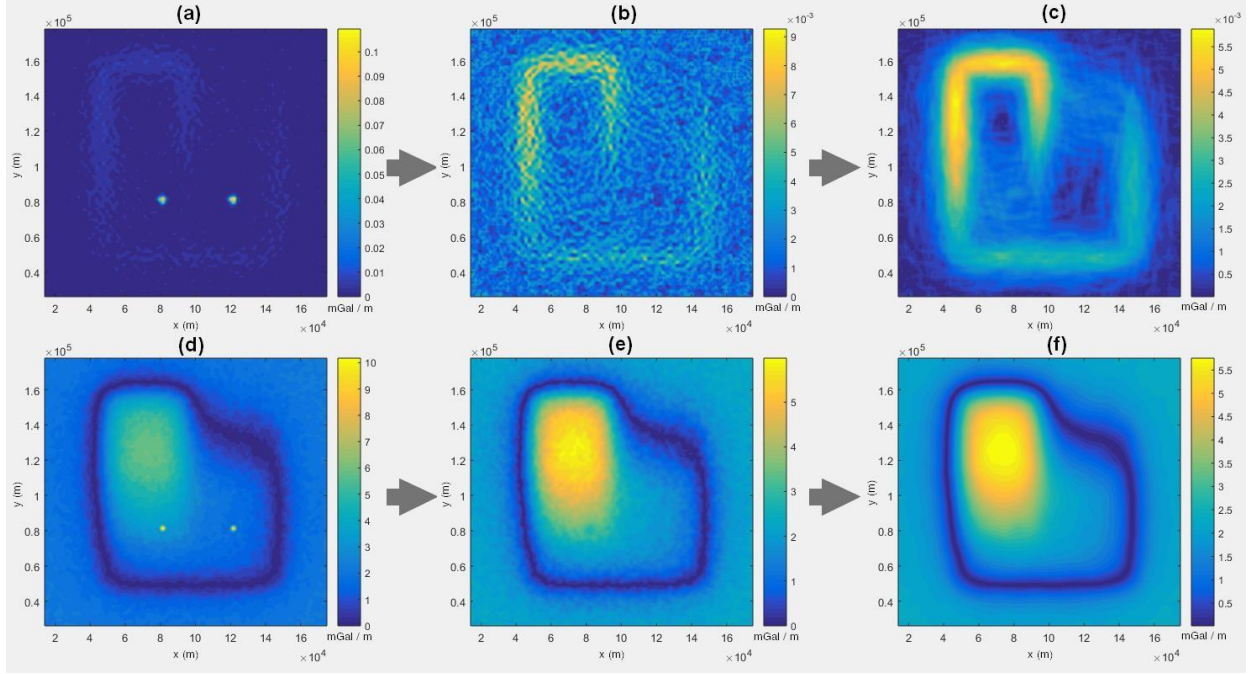
Şekil 4. a) Aykırı noktaları ayıklanmış RM anomali, b) Kayan ortalama ile filtrelenmiş RM anomali.
Figure 4. a) RM anomalies after outlier points removed, b) RM anomalies smoothed with moving average.

Modelden elde edilen aykırı noktaları ayıklanmış anomaliye sonradan eklenen gürültünün etkileri kayan ortalama uygulanması ile minimize edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen ve Şekil 4.b'de verilen anomali, modelde tanımlanan yapıdan elde edilen ve Şekil 1.b'de verilen anomaliye benzemiştir.

İnterpolasyon: Sınır analizi uygulanmadan önce verinin değişimlere duyarlılığını artırmak ya da azaltmak adına interpolasyon yapılarak verinin matris boyutları değiştirilebilir. Bu işlem matris boyutu küçültüldüğünde yüksek miktarda veri kaybına, büyütüldüğünde ise küçük dalgaboylu yapay anomalilere neden olabileceğinden hangi gridleme yönteminin kullanıldığına dikkat edilmesi gerekir.

Sınır analizi öncesinde iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmaların analiz sonrasında yeterli sonuç vermemesi ya da sonuçların yalnızca belirli bir kısma ihtiyaç duyulması durumunda sınır analizi sonrasında da bir takım iyileştirmeler yapılması mümkündür. Daha önce bahsedilen aykırı nokta ayıklama, kayan ortalama ve interpolasyon işlemleri sınır analizi sonrasında da gerekli olan durumlarda kullanılabilir.

Sınır analizi öncesinde yapılan iyileştirmelerin analize etkisini test etmek için RM verisine yapılan her bir iyileştirme adımı sonrasında YTG ve AS yöntemleri ile sınır analizi uygulanmıştır. RM verisine aykırı nokta ayıklanması öncesinde, aykırı nokta ayıklanma sonrasında ve ardından kayan ortalama uygulandıktan sonra sınır analizi yapılarak sonuçlar Şekil 5'te topluca verilmiştir.



Şekil 5. a) Aykırı noktalar ayıklanmadan önce YTG sonuçları, b) Aykırı noktalar ayıklandıktan sonra YTG sonuçları, c) Aykırı noktalar ayıklandıktan ve kayan ortalama uygulandıktan sonraki YTG sonuçları, d) Aykırı noktalar ayıklanmadan önce AS sonuçları, e) Aykırı noktalar ayıklandıktan sonra AS sonuçları, f) Aykırı noktalar ayıklandıktan ve kayan ortalama uygulandıktan sonraki AS sonuçları.

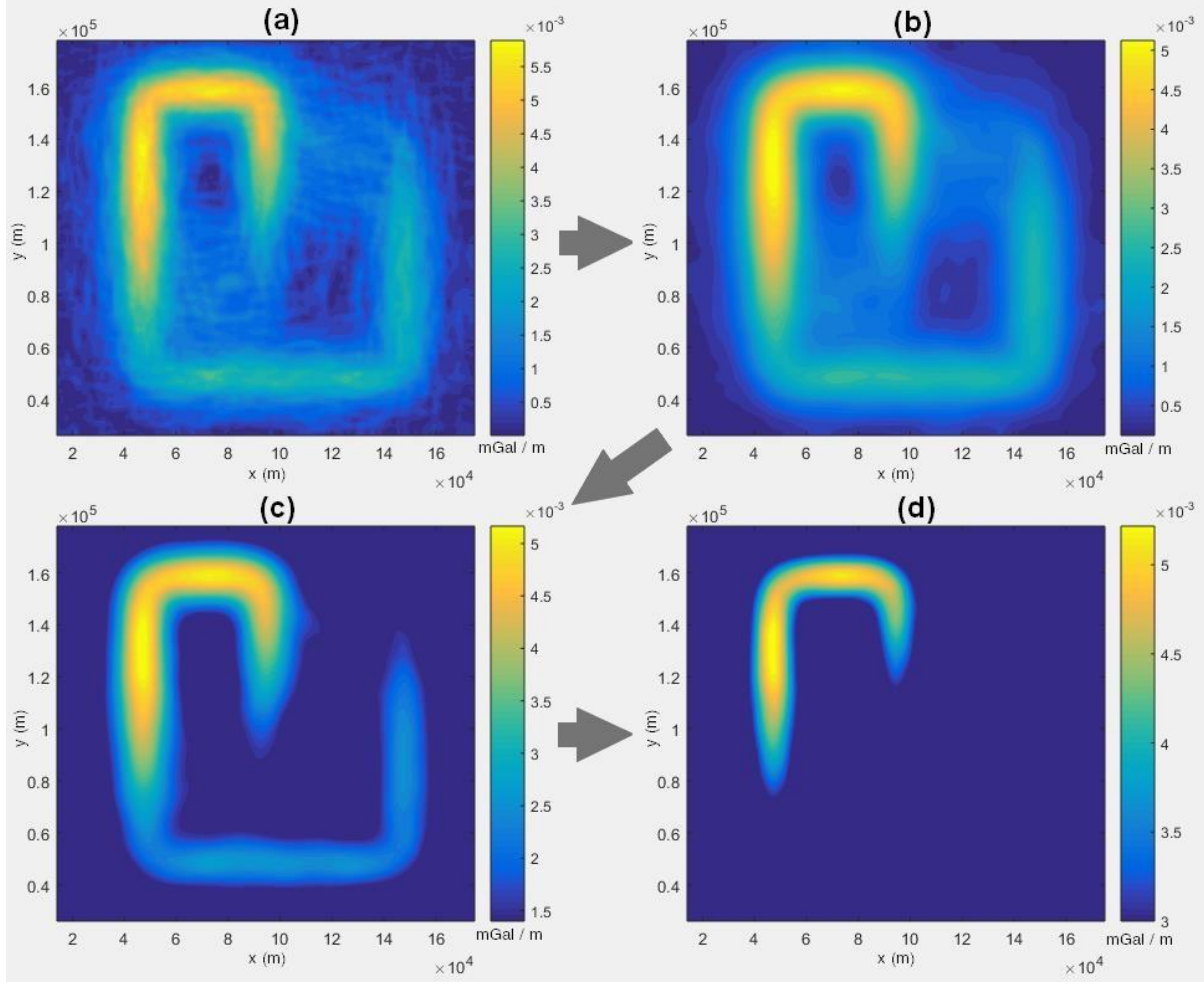
Figure 5. a) Horizontal gradient amplitude (HGA) before outlier points removed, b) HGA after outlier points removed, c) HGA after outlier points removed and moving averages applied, d) Analytical signal (AS) before outlier points removed, e) AS after outlier points removed, f) AS after outlier points removed and moving averages applied.

Şekil 5 incelendiğinde, şu ana kadar yapılan iyileştirmelerin hem YTG hem de AS yöntemi için benzer etkileri olduğu görülmektedir. Aykırı noktaların iki yöntemin sonuçlarında da yüksek genliklere neden olduğu ve asıl yapının sınırlarının maskelendiği görülmektedir (Şekil 5.a ve 5.d). Aykırı noktaların temizlenmesiyle maskelenen genlikler görünür hale gelmiştir (Şekil 5.b ve 5.e). Kayan ortalama filtresi sınır analizindeki belirsizliği azaltmış ve sınırların daha net görülebilmesini sağlamıştır (Şekil 5.c ve 5.f).

Genlik Kırpma: Sınır analizi sonrasında yapılabilecek işlemlerden biri genlik kırpmadır. Elde edilen sınır analizi sonuçlarında bir takım yapı sınırları yüksek genlik sonuçları veriyorsa daha küçük genlikli sınırların görülmesini güçleştirebilir. Bu durumda analiz sonuçlarında belirli genliklerin üzerindeki ve altındaki genlikleri kırparak veriden atmak ya da kırpma sınırlarına çekmek silik görünen sınırları belirginleştirecektir. Veriden atılması durumunda ise

yeniden interpolasyona başvurarak boşlukların uygun bir yöntemle doldurulması sağlanabilir.

RM anomalisinin kayan ortalama ile yumuşatılmasının ardından hesaplanan YTG sınır analizi sonuçları (Şekil 5.c) kullanılarak Şekil 1.a'da verilen modele ait sınırlar kestirilmeye çalışılmıştır (Şekil 6). YTG sonuçları çok fazla saçılma içerdiğinden (Şekil 6.a) öncelikle bir kez daha kayan ortalama uygulanarak yumuşatılmıştır (Şekil 6.b). Daha sonra genlik kırpması uygulanarak 0.0015 mGal/m'den daha küçük genliğe sahip tüm noktaların bu genliğe eşitlenmesi sağlanmış ve Şekil 6.c'de verilen anomali elde edilmiştir. Elde edilen anomali ve model incelendiğinde, model yüksekliği azaldıkça sınır analizi sonuçlarının genliğinin düştüğü de görülmekte olup yapılan iyileştirmelerin tutarlılığını göstermektedir. Genlik kırpmasının eşik değeri 0.0030 mGal/m'ye çekildiğinde ise yalnızca modelin en üstünde kalan kısmının sınırları elde edilmiştir (Şekil 6.d).



Şekil 6. a) İyileştirilmiş RM anomalilerinin YTG sonuçları, b) Yeni bir kayan ortalama işlemi sonrasında elde edilen YTG sonuçları, c) Yalnızca yapı sınırlarını içerecek şekilde genliği kırılmış YTG sonuçları, d) Yalnızca en üstteki sınırları içerecek şekilde genliği kırılmış YTG sonuçları.

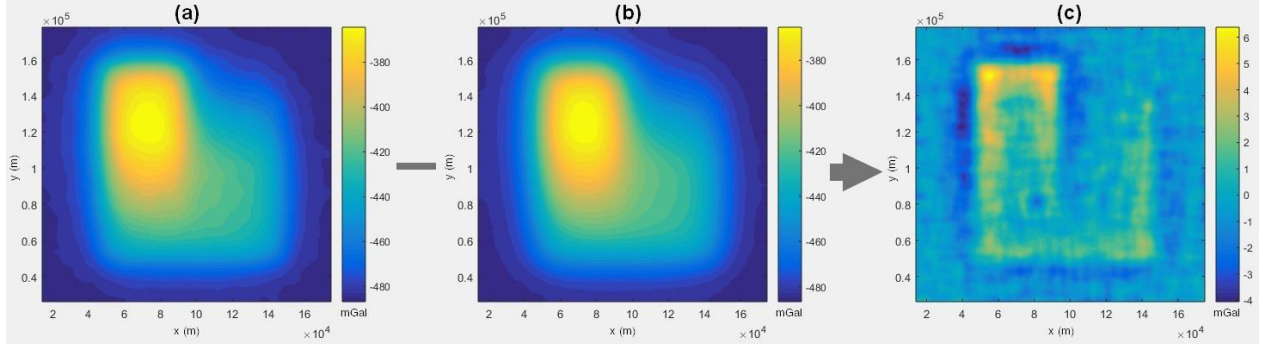
Figure 6. a) HGA results of refined RM anomalies, b) HGA results after another moving average filter, c) HGA results with amplitudes cropped to remain structure boundaries, d) HGA results with amplitudes cropped to remain boundaries of the topmost part of the model.

Genlik Ölçekleme: Genlik kırmasına benzer şekilde uygulanabilecek olan diğer bir işlem genlik ölçeklendirmesidir. Sınır analizi sonuçlarında belirli genlik aralıklarının içerisinde kalan noktalar için genlikler ölçeklenerek daha sönük ya da daha baskın hale gelmeleri sağlanabilir. Böylelikle veri atılmasına ya da sabitlenmesine gerek kalmadan tüm sınırlar benzer genliklerle görülebilir hale getirilebilir.

Aritmetik İşlemler: Basit aritmetik işlemler kullanılarak sınır analizlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmak ya da farklı analiz yöntemlerinin sonuçlarını birleştirmek mümkündür. Örneğin bir veriye ve aynı verinin kayan ortalama ile yumuşatılmış haline aynı sınır analizi uygulanırsa elde edilecek iki sonuçtan ilki yöntemin yakalayabildiği tüm sınırları gösterirken,

ikinci sonuç küçük dalgaboylu değişimler sönümlenmiş olduğundan yalnızca derin yapılara ait sınırları içerecektir. Bu iki sınır analizi sonucu birbirinden çıkarıldığında yalnızca sığ kütlelerin sınırlarını elde etmek mümkündür. Dolayısıyla verilere basit aritmetik işlemler uygulamak da sınır analizini iyileştirmeye yönelik işlemler arasında gösterilebilir.

Aritmetik işlem kullanımının basit bir örneği olarak; Şekil 4.a'daki RM anomalilerine kayan ortalama uygulanmasıyla elde edilmiş anomaliler (Şekil 7.a) ile aynı RM anomalilerine daha geniş bir pencere ile kayan ortalama uygulanmasıyla elde edilmiş anomaliler (Şekil 7.b) arasında birtakım farklılıklar olacaktır. Bu farkların görülebilmesi için bu iki veri birbirinden çıkarıldığında Şekil 7.c'de verilen anomaliler elde edilir.



Şekil 7. a) Kayan ortalama ile iyileştirilmiş RM anomalileri, b) Daha geniş pencere ile kayan ortalama ile iyileştirilmiş RM anomalileri. c) a ve b’de verilen kayan ortalama sonuçlarının farkı.

Figure 7. a) RM anomalies refined using moving averages, b) RM anomalies refined using moving averages with a larger window, c) Differences between moving average results in a and b.

Yapay bir modelden üretilen Bouguer anomalilerine bozucu bir takım etkilerin eklenmesiyle oluşturulmuş olan RM anomalileri üzerine uygulanan iyileştirmeden alınan sonuçlar, sınır analizi öncesinde ve sonrasında uygulanabilecek basit aritmetik işlemlerle sınır analizlerinin iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Anomaliyi oluşturan yapı bilindiğinden, iyileştirmeler sırasında yaşanan veri kaybına göz yumulmuştur. Gerçek veri kullanılması ve yeraltındaki yapının tam olarak bilinmemesi durumunda, iyileştirme amacıyla yapılan işlemlerin neden olduğu veri kaybı yanlış yorumlamalara neden olabileceğinden iyileştirmelerin dikkatli uygulanması gerekir.

SINIR ANALİZİ İYİLEŞTİRMELERİNİN GERÇEK BOUGUER GRAVİTE VERİSİNE UYGULANMASI

Menderes Grabeni ve çevresine ait gravite verileri kullanılarak sınır analizi ve modelleme üzerine daha önce yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur (Albora ve diğ., 2007; Özyalın ve diğ., 2012; Akay ve diğ., 2013; Oruç, 2014; Akyol, 2016; Altınoğlu ve diğ., 2018; Üge ve Albora, 2018; Doğru ve Pamukçu, 2019). Bölge normal fay ağırlıklı bir tektonizmaya sahip olup, yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu yüzeylenmiş faylarla birlikte gömülü fayların sınır analizleriyle tespit edilmesi üzerinedir.

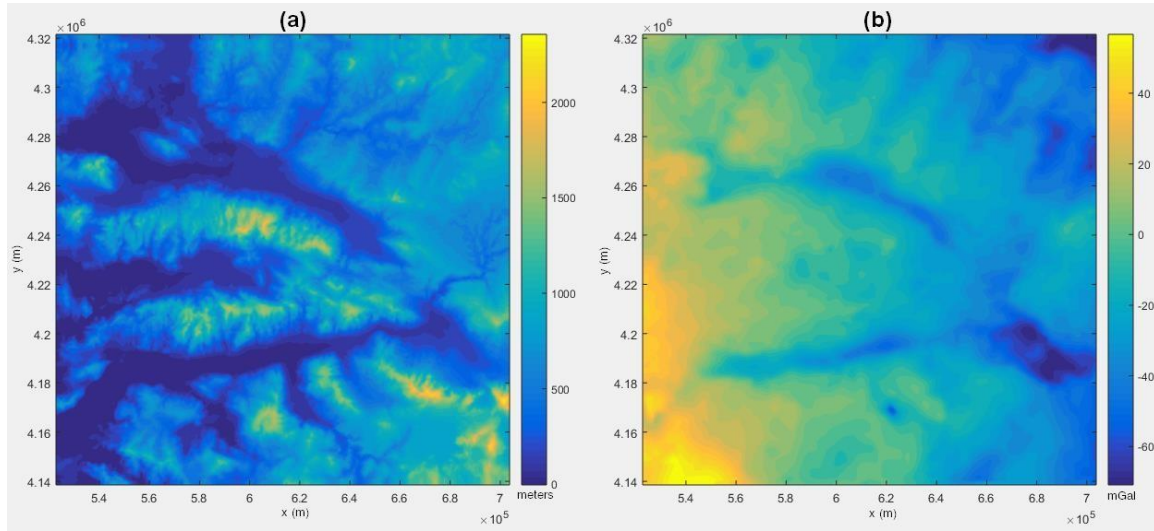
Çalışmanın bu kısmında, MN Bouguer gravite verilerine sınır analizi yöntemleri uygulanarak sonuçlar iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bölgeye ait Bouguer gravite anomalilerinin topoğrafya ile uyumlu izler taşıyor olması, farklı yönelimlere sahip çizgiselliklerin gözlemlenmesi ve dalgaboyu çeşitliliğinin fazla olması sınır analizi iyileştirmelerini test etmek için uygun veri sağlamaktadır (Şekil 8).

MN verilerinin sınır analizi iyileştirmeleri YTG ve AS yöntemleri için ayrı ayrı uygulanmıştır. Herhangi bir iyileştirme yapılmaksızın bu yöntemlerle elde edilen sonuçlar Şekil 9’da iyileştirme öncesi Bouguer anomalileri (Şekil 9.a), YTG yöntemi sonuçları (Şekil 9.b) ve AS yöntemi sonuçları (Şekil 9.c) olmak üzere sırasıyla verilmiştir.

İyileştirme uygulanmadan elde edilen sınır analizi sonuçları incelendiğinde, YTG yönteminde genliklerin büyük kısmının ölçeğin %30’unun altında kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni Bouguer gravite verilerinde [100, 35] grid noktası (point) civarında görülen ve yaklaşık 50 mGal genlikte bir düşüşe neden olan negatif yönlü gravite anomalisidir. Yalnızca birkaç grid noktası içerisinde gravite değerlerinde çok ani değişim yaşandığı için türeve dayalı sınır analizi tekniklerinde bu noktalar civarında yüksek genlikler yakalanması normaldir. Söz konusu düşük anomali bölgesi (MTA, 2006) ve (MTA, 2011) haritalarında da görülebildiğinden hatalı bir ölçüm olması söz konusu değildir, dolayısıyla YTG yönteminin zayıf sonuçlar vermesinin nedeni verideki genlik çeşitliliğidir. AS sonuçlarında yine aynı bölgede görece yüksek genlik değerleri elde edilmiş olsa da sınırların kestirilmesi hususunda bozucu bir etki yaratmamış olup analiz sonuçları kabul edilebilir düzeydedir.

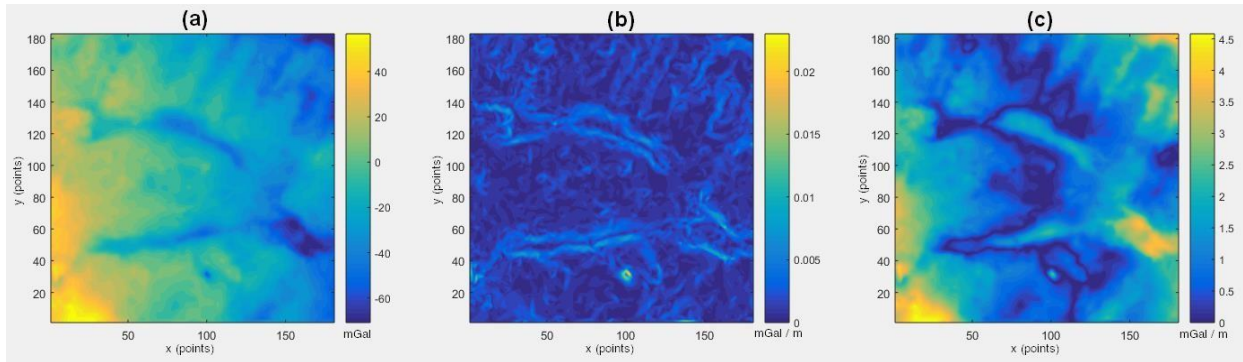
YTG yöntemini iyileştirebilmek için yapılabilecek ilk işlem sınır analizi öncesinde aykırı nokta ayıklamasıyla [100, 35] grid noktası civarındaki düşük anomali bölgesini, söz konusu bölgedeki veri bozuk olmasa dahi sönmülmektir (Şekil 10.a). Bu işlem iyileştirmeler süresince bilinçli olarak yapılan ve göz ardı edilen veri kaybına bir örnektir. Aykırı nokta ayıklamasının ardından pencere boyutu 3 olan bir kayan

ortalama filtresi ile anomaliler yumuŖatılarak benzeri ani değişimler yumuŖatılmıştır.



Ŗekil 8. a) Menderes Grabeni ve çevresinin topoğrafya haritası, b) Menderes Grabeni ve çevresinin Bouguer gravite anomalileri (MN).

Figure 8. a) Topography map of Menderes Graben and surrounding area, b) Bouguer anomaly map of Menderes Graben and surrounding area



Ŗekil 9. a) MN anomalileri, b) MN anomalilerinin YTG sonuçları, c) MN anomalilerinin AS sonuçları.

Figure 9. a) MN anomalies, b) HGA results of MN anomalies, c) AS results of MN anomalies.

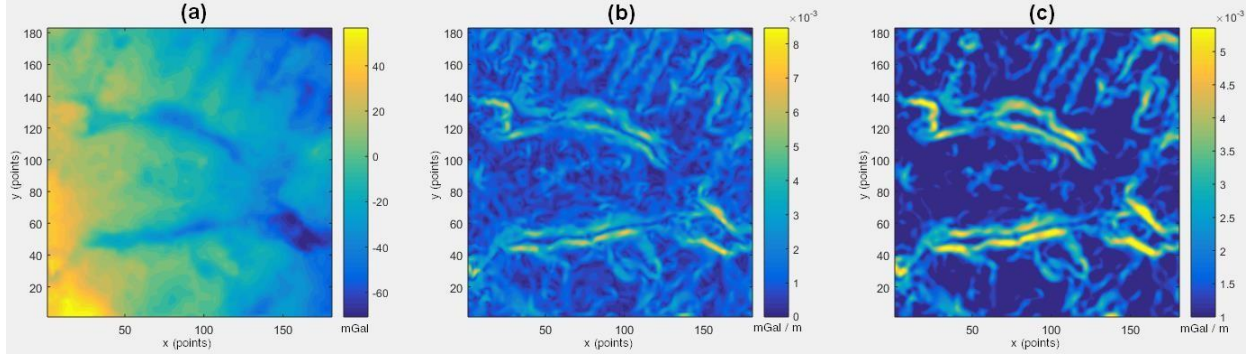
Aykırı nokta ayıklama ve kayan ortalama işlemlerinin ardından elde edilen veriye (Ŗekil 10.a) YTG yöntemi uygulandığında Ŗekil 10.b'deki sonuçlar elde edilmiştir. Görüldüğü üzere sonuçların büyük kısmını maskeleyen yüksek genlikli noktanın temizlenmesi, daha düşük genlikli diğer sınırların görülebilmesini sağlamıştır. Daha net sonuçlar elde edilebilmesi adına genlik kırpması ile çok büyük ve çok küçük genlikler sonuçlardan çıkarılabilir. 0.0055 mGal/m'den büyük ve 0.0010 mGal/m'den küçük genliklerin veriden atılmasıyla Ŗekil 10.c'de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

MN verisine uygulanan YTG sınır analizi yöntemi sonuçları kıyaslandığında analiz öncesinde ve sonrasında yapılan işlemlerin hedeflenen genlikleri bulabilmek adına analiz sonuçlarını iyileştirdiği çok net görülmektedir.

MN verisine uygulanan AS yöntemi sonuçlarını iyileştirmek için ilk aşamada YTG yöntemi için yapıldığı gibi aykırı nokta temizlemesi yapılmıştır (Ŗekil 11.a). Ardından uygulanan AS yöntemi, aykırı nokta temizlenmeden elde edilmiş sonuçlarla neredeyse hiçbir farklılık göstermemekte olup, yalnızca temizlenen nokta civarındaki genlikleri zayıflatmıştır (Ŗekil 11.b).

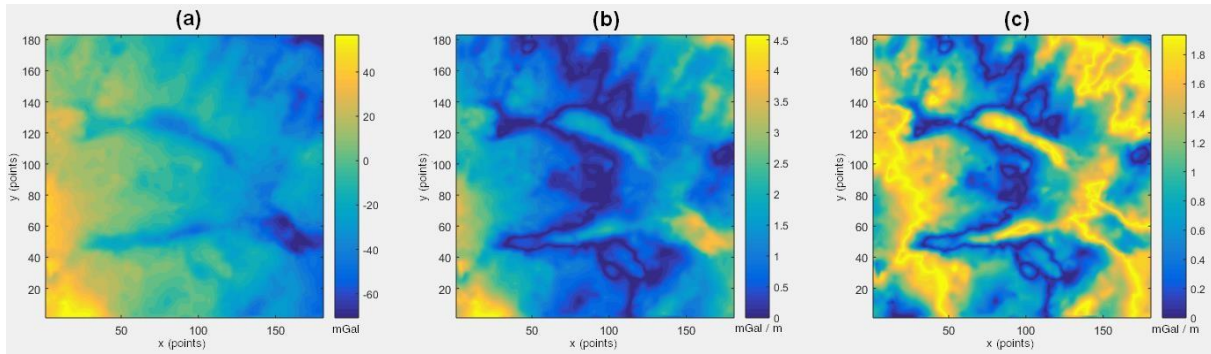
AS sonuçlarındaki sıfır genliklerini belirginleştirmek adına genlik değerleri üst sınırdan kırılarak ölçek daraltılmıştır. Kırılan alanın dışındaki değerler daha sonra kırılmış değerlerden çıkarılarak 2 genliği

geçişleri işaretlenmiş, böylelikle kırılma sonucunda hangi bölgelerde ne kadar genlik kaybı olduğu görüntülenmiştir (Şekil 11.c).



Şekil 10. a) Kayan ortalama ve aykırı nokta ayıklamadan sonra MN anomalileri, b) İyileştirilmiş MN'den elde edilen YTG sonuçları, c) Genlik kırmasıyla iyileştirilmiş YTG sonuçları.

Figure 10. a) MN anomalies after moving average and outlier point removal, b) HGA results of refined MN anomalies, c) Refined HGA results after amplitude crop.



Şekil 11. a) Kayan ortalama ve aykırı nokta ayıklamadan sonra MN anomalileri, b) İyileştirilmiş MN'den elde edilen AS sonuçları, c) Genlik kırmasıyla ve aritmetik işlemle iyileştirilmiş AS sonuçları.

Figure 11. a) MN anomalies after moving average and outlier point removal, b) AS results of refined MN anomalies, c) Refined AS results after amplitude crop and arithmetic operations.

İyileştirilmiş AS sonuçları incelendiğinde sıfır geçişlerinin çok daha ince ve kesin hatlar şeklinde görüldüğü ancak bunu sağlayabilmek adına yüksek genliklerden çokça veri kaybedildiği ortadadır.

SONUÇ VE YORUMLAR

Bu çalışmada gravite verilerine uygulanan sınır analizi sonuçlarının, sınır analizi öncesinde ve/veya sonrasında uygulanacak basit aritmetik işlemlerle iyileştirilebileceği üzerinde durulmuştur. Neden iyileştirmeye ihtiyaç duyulduğu ve hangi aritmetik işlemler kullanılarak nasıl iyileştirmeler yapılabileceği basamaklı bir yapay modelden hesaplanmış Bouguer anomalileri üzerinden sunulmuştur. Daha sonra Batı Anadolu-Menderes Grabeni ve çevresine ait gerçek Bouguer gravite anomalileri kullanılarak, YTG ve AS sınır analizi yöntemlerinin sonuçlarını iyileştirmek adına işlemler yapılmış ve sonuçlar gösterilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, hedeflenen sınırları temsil eden genlikleri belirginleştirerek sınır analizi sonuçlarının iyileştirilmesi hususunda gelişme sağlandığı görülmüştür. Bu çalışmada örneklendirmek amacıyla yalnızca YTG ve AS yöntemlerine iyileştirme uygulanmış olsa dahi, diğer sınır analizi yöntemlerini de desteklemek için kullanılabilirliği açıktır. Sonuçları iyileştirebilmek adına yapılacak olan işlemlerin yapay anomali üretmeme, incelenecek anomalilerin konumlarını mutlak suretle koruma ve anomalilerin genliklerini ihtiyaç doğrultusunda koruma koşullarına uymasına dikkat edilmelidir. Örneğin MN anomalisinin incelenmesi sırasında düşük genlikli ve küçük dalga boylu bir anomalinin sonuçları etkilediği farkedilmiş, ancak bu anomali incelenmek istenen yapılardan birini işaret etmediği için aykırı nokta olarak kabul edilmiş ve ayıklama işlemi ile konumu korunarak genliği sönümlendirilmiştir. Bu çalışmada verilen işlemlerin farklı veriler kullanılarak ve farklı amaçlar doğrultusunda sınır analizi sonuçlarını iyileştirmek adına kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

SUMMARY

Bouguer gravity anomalies are sensitive to the densities and the geometries of the underground geological structures, providing information about subsurface density variations independent of the topographical effects (Blakely, 1996). The anomalies can be filtered depending on research depths (Spector and Grant, 1970), can be used in geometry or density modelling studies (Cordell and Henderson, 1968) or in

boundary analysis studies to estimate possible source bodies' boundaries.

Most of the boundary analysis methods involve isotropic derivatives of the anomalies and their relations with each other. Horizontal gradient amplitude (HGA, Equation 1) and analytical signal (AS, Equation 2), (Miller and Singh, 1994) are examples of commonly used boundary analysis methods. The amplitudes of these analyses are related with the boundary sharpness' and depths of the source bodies; therefore, it should be possible to estimate boundaries of an aimed structure at a certain depth.

In this study, first of all, an artificial model consisting of two ramps is created, its Bouguer anomalies are calculated and disrupted with noise and outlier data points to simulate more realistic anomalies (Figure 1). The resulting data (which is referred as RM data) is then **cropped** to exclude some of the outlier points, focusing on the main anomaly in the center of the data (Figure 2). Next, the remaining two outlier points are smoothed with **outlier point removal** process, which rendered the main anomalies more clear (Figure 3). Then, the anomalies filtered using **moving averages** to minimize the effects of smaller wavelengths (or shallower sources' effects), resulting in a smoother anomaly (Figure 4), similar to the anomaly given in Figure 1.b. The effects of these processes applied "before" HGA and AS boundary analyses are given in Figure 5, separately. The processes appear to enhance the amplitudes and reduce the variations in the anomalies, resulting in smoother and sharper boundary analysis results.

It is possible to further enhance the results by applying similar arithmetic operations "after" boundary analyses, which are also presented on RM data. One of the most useful operations is **amplitude cropping**, which simply is the removal of the amplitudes from the analysis results, which lie outside of a certain amplitude band. Furthermore, the boundaries resulting only from a certain depth can be extracted using proper amplitude bands (Figure 6).

Another operation is **matrix arithmetic**; summing, subtracting, multiplying, etc. results with each other to enhance or combine the results. As an example, in Figure 7, moving average results of RM anomaly for two different window length are subtracted from each other to estimate the boundaries.

In order to test the effects of these enhancements on actual gravity data, another data set is prepared using actual Bouguer gravity data from Mendere Graben (Western Anatolia), where is a normal fault dominated area. The anomalies (referred as MN anomalies) have amplitude variations and are coherent with the topography, which provide a fine testing area (Figure 8).

HGA and AS analyses applied to MN data as it is resulted in poor boundary estimations, mainly due to the sharp dropping point at Bouguer values at the southern part of the anomaly (Figure 9). Smoothing the drop with outlier point removal and the whole anomaly with moving average filter with a small window size enhanced the HGA results drastically (Figure 10). The results are further improved by applying amplitude crop to keep only the strong boundaries. Outlier point removal did not affect AS results as strongly as HGA results, decreasing the amplitude on the spot only. The AS results are enhanced by amplitude cropping and matrix arithmetic (Figure 11).

The results achieved in this study indicate that it is possible to enhance the boundary analyses results applied on Bouguer gravity anomalies. Despite the examples involve only HGA and AS boundary analysis methods, it is clear that these enhancements can be useful for other analysis methods too. Since the processes cause a certain amount of data loss, it is important to keep its balance between boundary enhancements. For example, the amplitude drop at MN data caused poor boundary analysis results, which is later fixed with the cost of data loss at that point. The processes should not change the locations of the anomalies and/or create any artificial anomaly whose effects are not visible on the original anomaly.

KAYNAKLAR

- Akay, T., Bilim, F., Koşaroğlu, S., 2013. Mendere Masifi tektonik yapılarının (Batı Anadolu, Türkiye) Bouguer Gravite analizi kullanılarak incelenmesi. Cumhuriyet Yerbilimleri Dergisi, 30 (2), 71-86.
- Akyol, N., 2016. Gömülü Jeolojik Yöntemlerin Görüntülenmesinde Farklı Sınır Belirleme Yöntemleri. Yerbilimleri, 37 (3), 253-270.
- Albora, A.M., Uçan, O.N., Aydoğan, D., 2007. Tectonic modeling of Konya-Beyşehir Region (Turkey) using cellular neural networks. Annals of Geophysics, 50 (5), 603-614.
- Altınoğlu, F. F., Sarı, M., Aydın, A., 2018. Shallow crust structure of the Büyük Mendere graben through an analysis of gravity data. Turkish Journal of Earth Sciences, 27, 421-431. doi:10.3906/yer-1712-6.
- Blakely, R. J., 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications: Cambridge University Press.
- Cordell, L., Henderson, R. G., 1968. Iterative three dimensional solution of gravity anomaly data using a digital computer. Geophysics, 33, 596-601.
- Doğru, F., Pamukçu, O. A., 2019. Analysis of gravity disturbance for boundary structures in the Aegean Sea and Western Anatolia. Geofizika, 36 (1), 53-76.
- Miller, H. G., Singh, V., 1994. Potential-field tilt - a new concept for location of potential-field sources. Journal of Applied Geophysics, 32, 213-217.
- MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü), 2006. Türkiye Bouguer Anomali Haritası (ölçek:1/2.000.000). Ankara, Turkey: MTA Yayınları.
- MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü), 2011. Türkiye Bouguer Anomali Haritası (ölçek:1/2.000.000). Ankara, Turkey: MTA Yayınları.
- Nabighian, M. N., 1972. The analytical signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal crosssection: its properties and use for automated interpretation. Geophysics, 37, 507-517.
- Oruç, B., 2014. Structural interpretation of southern part of western Anatolian using analytic signal of the second order gravity gradients and discrete wavelet transform analysis. Journal of Applied Geophysics, 103, 82-98.
- Özyahn, Ş., Pamukçu, O., Gönenç, T., Yurdakul, A., Sözbilir, H., 2012. Application of boundary analysis and modeling 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 (2), 19-30.
- Spector, A., Grant, F., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. Geophysics 35, 293-302.

Üge, M.A., Albora, A.M., 2018. Determination of the Tectonic Lines of the Map of Gravity Anomaly of the Western Anatolian Region by the Cellular Neural Network (CNN) Method. Conference: New Trends in Geophysics and Engineering (International Semposium)

Wijns, C., Perez, C., Kowalczyk, P., 2005. Theta map: Edge detection in magnetic data. *Geophysics* 70, 39-43.