



**GRAVİTE VERİLERİNİN TEKİL DEĞER AYRIŞTIRMA YÖNTEMİYLE TERS  
ÇÖZÜMÜ VE GEDİZ VE BÜYÜK MENDERES GRABENLERİNİN TORTUL  
KALINLIKLARININ SAPTANMASI**

**(INVERSION OF GRAVITY DATA USING SINGULAR VALUE DECOMPOSITION  
TECHNIQUE AND DETERMINATION OF THE SEDIMENT THICKNESSES OF THE  
GEDİZ AND BUYUK MENDERES GRABENS)**

**Coşkun SARI\***

**ÖZET/ABSTRACT**

Gravite anomalilerinin ters çözümü yeraltındaki jeolojik yapıya en uygun jeofizik modeli üretmek amacıyla verilere uygulanan matematiksel bir işlemde oluşmaktadır. Bir ters çözüm işleminde yapı parametrelerinin başlangıç değerleri yaklaşık olarak kabul edilir. Gözlenen anomali ile model yapının neden olduğu kuramsal anomali arasındaki farklara dayanılarak başlangıç parametre değerleri yinelemeli olarak düzeltilerek yapıyı en iyi simgeleyen parametre değerleri saptanır. Günümüzde, ters çözüm uygulamalarında parametre değerlerinin değiştirilmesi, çakışmanın oluştuğuna karar verilmesi, saptanan parametrelerin gerçek değerlere yakınlığı ve parametre değerleri arasındaki ilişkilerin düzeyinin belirlenmesi işlemler bilgisayar algoritmaları ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, Gediz ve Büyük Menderes grabenlerini kesen iki Bouguer gravite profili iki boyutlu çokgen bir model yardımıyla sönümlü en küçük kareler yöntemine tekil değer ayrıştırma tekniği uygulanarak değerlendirilmiştir. Uygulamalar sonucunda grabenleri dolduran tortulların kalınlığının Büyük Menderes grabeni için 1.5 km civarında, Gediz grabeni için ise 2.0 km civarında olduğu saptanmıştır.

*Inversion of gravity anomalies consists of some mathematical and statistical operations on the data to generate the most suitable geophysical model approximating the subsurface geological structure. The initial values of the model parameters are assumed approximately in the inversion procedure. The initial values of model parameters are improved iteratively based on the differences between the observed anomalies and theoretical anomalies caused by the model structure. Recently, the processes of the changing parameter values, making a decision for the data fitting, closeness between the determined and true parameter values and determination of the relationship level between parameter values are realized by the computer algorithms. In this study, the two Bouguer gravity profiles crossing the Gediz and Büyük Menderes grabens are evaluated by the damped least squares method using singular value decomposition (SVD) technique. As a result of the applications, thickness of the sedimentary fill in both grabens are estimated about 1.5 km for Büyük Menderes graben and about 2.0 km for Gediz graben.*

**ANAHTAR KELİMELELER/KEYWORDS**

Gravite, Ters çözüm, Parametre, Graben  
Gravity, Inversion, Parameter, Graben

## 1. GİRİŞ

Gravite anomalilerinin ters çözümü, yeraltındaki jeolojik yapıya yaklaşan jeofizik bir model üretmek amacıyla verilere uygulanan matematiksel bir işlemde oluşmaktadır. Bir ters çözüm işleminde model parametrelerin başlangıç değerleri yaklaşık olarak kabul edilir. Gözlenen anomali ile modelin neden olduğu anomali arasındaki farklara dayanan başlangıç parametre değerleri yinelemeli olarak düzeltilerek model yapıyı en iyi simgeleyen parametre değerleri saptanır. İdeal bir ters çözüm işlemi ölçülen verilere en uygun yapı parametrelerini etkin bir şekilde saptayabilmelidir.

Hjelt, Thanassoulas vd., ve Murthy değişik yaklaştırma (optimizasyon) yöntemleri kullanarak potansiyel alan verilerinin ters çözümü işlemini gerçekleştirmişlerdir (Hjelt, 1973; Thanassoulas vd., 1987; Murthy, 1992). Ters çözüm işleminin tekil olmama özellikleri ise Jackson, Wiggins, Inman ile Mickus ve Peeples gibi araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Thanassoulas vd., 1987; Jackson, 1972; Wiggins, 1972; Inman, 1975; Mickus ve Peeples, 1992).

Yinelemeli işlemler değeri sıfıra eşit veya sıfıra yakın eigen değerlerinin neden olduğu parametrelerdeki en büyük varyans (değişinti) nedeniyle yakınsama göstermezler. Bu nedenle durağanlaştırma Marquardt'ın doğrusallaştırma işlemi ile sağlanır (Marquardt, 1963). Fakat durağanlaştırma kötü bir başlangıç (kestirim) değeri için sistem matrisinin (Jakobiyen parametre matrisi) köşegen elemanlarına eklenen Marquardt parametresinin büyük değerleri için bile sağlanmayabilir. Buna karşın, küçük eigen değerlerinin ihmal edildiği tekil değer ayrıştırma yönteminde yakınsama sağlanabilmesine karşın böyle durumlarda verilerin içerdiği bilgilerin tümü kullanılmaz (Golub ve Reinsch, 1970; Varah, 1973). Sönümlü en küçük kareler çözüm yöntemi (Marquardt çözüm tekniği) ile tekil değer ayrıştırma yönteminin birleşimi olan sönümlü yaklaşım yöntemi tanımlanan göreceli bir eşik değeri ( $\mu$ ) ile güçlü ve sağlıklı bir çözüm sunar (Vozoff ve Jupp, 1975). Eşik değeri ( $\mu$ ), ya parametrelerdeki varyans (değişinti) kabul edilebilir en büyük varyans değerinden daha küçük olacak şekilde seçilebilir, ya da belirli bir aralığın dışındaki eigen değerinin hızlı azalmasına bakılarak karar verilir (Pedersen, 1977; Jackson, 1972). Mevcut jeolojik veya sondaj bilgileri ışığında ya da diğer jeofizik verilerden model yapı jeolojik yapılara uyacak şekilde model parametreleri kısıtlanabilir (Pedersen, 1979).

Bu çalışmada, iki boyutlu çokgen bir model yardımıyla gravite verilerinin sönümlü yaklaşık ters çözümünü sağlayan bir bilgisayar programı kullanılmıştır (Rao vd., 1995). Programda saptanan parametrelerin tekilliğinin derecesi ayrımlılık matrisine, kovaryans matrisine, eigen değerlerine, sönüm faktörüne ve parametre eigen vektör matrisine (V) bakılarak sağlanır. Parametrelerin birbirleriyle olan uyumluluğunun araştırılması için korelasyon (uyumluluk) matrisine bakılır.

Çalışmanın ilk aşamasında yüzlek veren bir tortul havza modelinin kuramsal gravite anomali verileri farklı başlangıç parametre değerleri ile değerlendirilmiştir. Kuramsal çalışma sonuçlarının uygunluğu sonucu, yöntem Gediz ve B. Menderes grabenini kesen ve daha önce Paton tarafından da modellenen iki profile de uygulanmış ve olası yapıya ilişkin parametre değerleri saptanmaya çalışılmıştır (Paton, 1992).

## 2. BATI ANADOLU'NUN TEKTONİĞİ VE GRABENLERİN OLUŞUMU

Batı Anadolu, dünyada kıtasal genişlemenin en aktif olduğu bölgelerden biridir. Kıtasal ölçekte yüksek sismik aktiviteye sahiptir. Genişleme sisteminin evrimi konusunda farklı

görüşler ortaya atılmıştır. Mevcut genişlemenin yaşı ve kaynağı konusundaki görüşler üç farklı model altında toplanabilir:

1. Tektonik kaçış (Dewey ve Şengör, 1979; Şengör, 1979; Şengör, 1980; Şengör, 1987; Şengör v.d., 1985),
2. Yay ardı genişleme (LePichon ve Angelier, 1979; Meulenkamp vd., 1988),
3. Orojenik Çökme (Dewey, 1988; Seyitoğlu ve Scott, 1992; Seyitoğlu ve Scott, 1996).

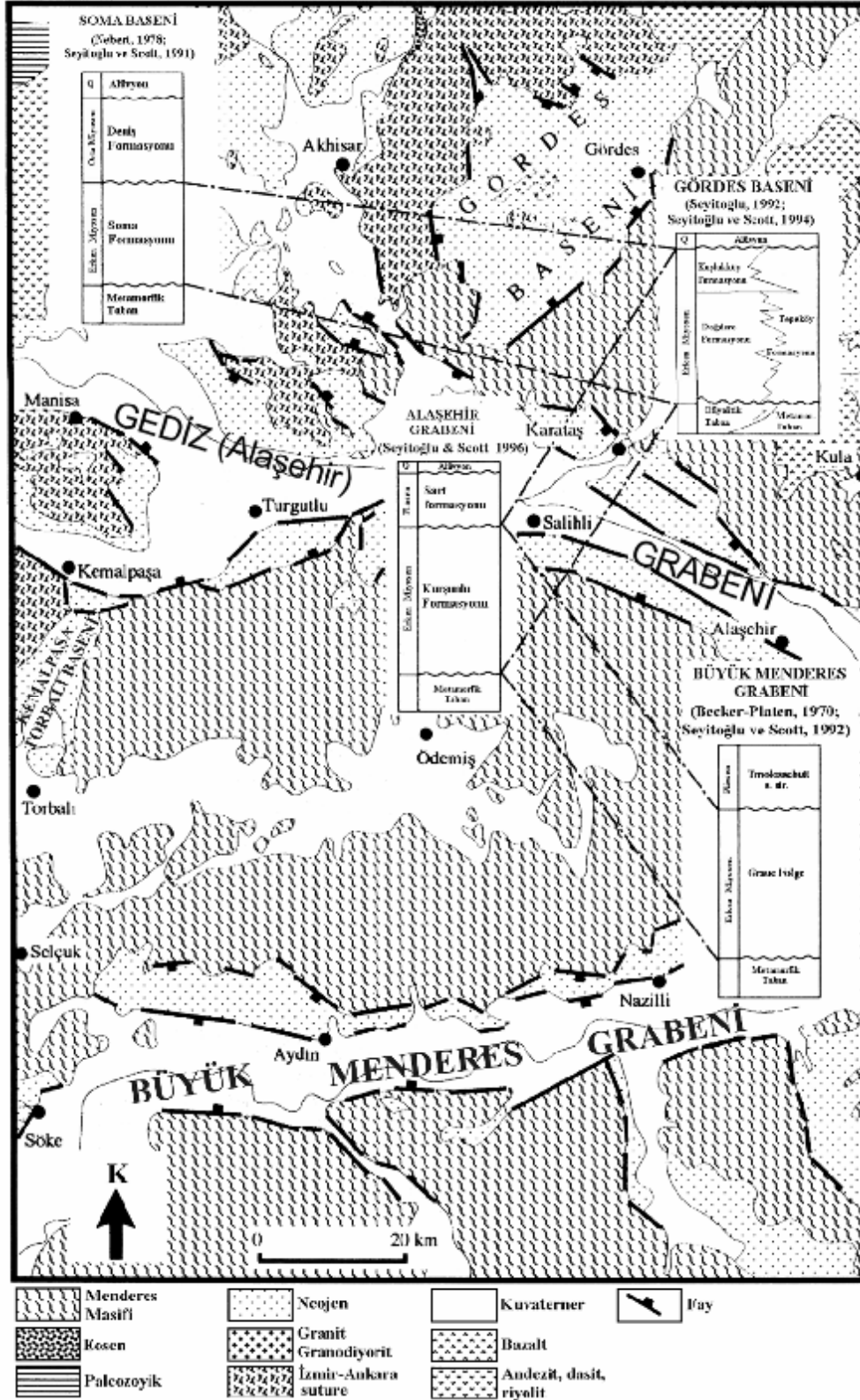
Tektonik kaçış görüşüne göre, Anadolu levhası Geç Serravalian (ca. 12 Ma) zamanı boyunca Arap ve Avrasya levhalarının çarpışmasının bir sonucu olarak gelişen sinistral Doğu Anadolu ve dekstral Kuzey Anadolu fayları boyunca Batı'ya doğru hareket etmiştir. Böylece, Anadolu levhasının B-GB yönlü tektonik kaçışı, Batı Anadolu'da horst-graben sisteminin gelişimine neden olan açılma tektoniği rejimini oluşturmuştur. Yay ardı genişleme modelinde, Hellenik Trenc sisteminin G-GB yönlü göçü, yay ardı genişleme ve horst-graben sisteminin oluşumuna neden olmuştur. Orojenik çökme modeli ise kabuğun incilmesi ve genişlemesi ile ilişkilidir.

Batı Anadolu'da Senozoik tektoniği ile yer kabuğunda genel olarak önce bir sıkışma, sonra bir gerilme meydana gelmiştir. Üst Paleosen'den Alt Eosen'e kadar geçen zamanda Pontid kıtası ile Anatolid-Torid platformu arasındaki K'ye dalımlı zonun kapanmasıyla İzmir-Ankara zonu oluşmuştur (Şengör, 1979; Şengör ve Yılmaz, 1981). Bu çarpışma ile ilgili yer kabuğunda K-G doğrultulu sıkışma rejimi ve bunun sonucunda da kısaltmalar Geç Miyosen'e kadar devam etmiştir. Daha sonra bu rejimi yine K-G doğrultulu genişleme uzamalar takip etmiştir (Şengör vd., 1985; Seyitoğlu ve Scott, 1992). Üst Miyosen'de egemen olan gerilme rejimi ile ilgili olarak meydana gelen Büyük Menderes, Küçük Menderes ve Gediz Grabenleri ile bunların kuzeyindeki keşişme grabenleri (Cross Grabens) Menderes masifinin kalıtsal olarak D-B ve KD-GB genel gidişini izlemektedir (Şengör vd., 1985; Price, 1989). Bu genişleme ile oluşan grabenler arasında ise sıkışmalar görülmektedir. Gediz ve Büyük Menderes grabeni Batı Anadolu'daki en önemli tektonik yapılarıdır. Miyosen ve Miyosen sonrası Batı Anadolu'da egemen olan hızlı gerilmelerin sonucunda büyük aktif faylar oluşmuştur. Aynı zamanda jeomorfolojiyi de kontrol eden bu faylar yarı graben sisteminde Üst Miyosen-Alt Pliosen döneminde oluşmuştur. Topoğrafik özellikler ve eğimli Neojen çökel katmanları bu fayların Neojen'den sonra aktif olduğunu göstermektedir.

Gediz grabeni Alaşehir ve Salihli arasında KB-GD uzanımlı, Salihli ve Turgutlu arasında D-B ve DKD-BGB uzanımlı yay biçimli, yaklaşık 150 km uzunluğunda 3-30 km genişliğinde bir yapıdır. Gediz grabenini dolduran tortul birimler olan, Miosen-Erken Pliosen yaşlı Salihli grubu, Plio-Quarterner yaşlı Karakaş grubunu açısal uyumsuzlukla örtmekte olup, grabenin güney kanadındaki tortul kalınlığının yaklaşık olarak 1500 m olduğu düşünülmektedir (Arpat ve Bingöl, 1969; Yağmurlu, 1987). Grabenin kuzey kanadında güney kanadına göre daha ince klastik bir tortullaşma mevcuttur.

Büyük Menderes grabeni Gediz grabeni gibi Batı Anadolu'daki D-B uzanımlı ana tektonik yapılardan biridir (Şekil 1). Büyük Menderes grabeninin yapısı Gediz grabenine çok benzer olup yaklaşık 150 km uzunluğunda ve yaklaşık 10-20 km genişliğinde normal faylarla sınırlanmıştır. Gediz grabeninde gözlenen yapıların çoğu Büyük Menderes grabeninde de bulunmaktadır. İki graben arasındaki başlıca fark Büyük Menderes grabenini sınırlayan ana fayın vadinin kuzeyinde yer almasına karşın Gediz grabenini sınırlayan ana fayın grabenin güneyinde yer almasıdır (Paton, 1992). Büyük Menderes grabeni ana vadiyi kesen keşişme grabeni olarak adlandırılan ikincil grabenlere sahiptir (Şengör, 1987). Büyük Menderes grabeninin güney kanadına üç ana vadi birleşmektedir. Bu vadilerden ikisi olan Karacasu ve Bozdoğan vadileri normal faylarla sınırlanmış olarak gözlenir. Neojen tortularında gözlenen eğimlerin yönü, alüvyal yelpazelerin gelişimi, dağ sırasının ön cephelerinin morfolojisi ve tarihsel depremsellik çalışmaları bu vadilerin batı kanadının geniş ve doğuya eğimli normal

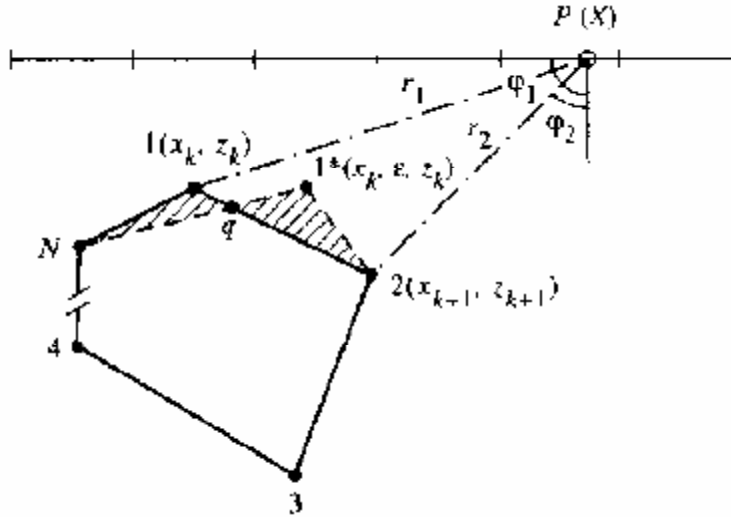
faullarla sınırlandığını vurgulamaktadır (Ambraseys, 1971; Paton, 1992). Yılmaz vd., ve Sözbilir ise jeolojik verilere göre Batı Anadolu'daki grabenlerin simetrik olmayan bir yapıda olduklarını belirtmişlerdir (Yılmaz vd., 2000; Sözbilir, 2001).



Şekil 1. Gediz ve Büyük Menderes grabenlerinin jeolojisi ve tektoniği [Seyitoğlu ve Scott'dan düzenlenmiştir (Seyitoğlu ve Scott, 1996)]

### 3. YÖNTEM

İki boyutlu N kenarlı kesiti çokgen olan bir yapının herhangi bir  $P(X_i)$ ; ( $i=1,2,\dots,N_{göz}$ ) noktasındaki Bouguer gravite anomalisi Eşitlik 1 ile tanımlanır (Şekil 2) (Won ve Bevis, 1987).



Şekil 2. İki boyutlu N kenarlı çokgen bir yapının kesiti

$$\Delta G(X) = \frac{c\Delta\sigma}{C} (x_{k+1} - x_k)(x_k z_{k+1} - x_{k+1} z_k) \left( (\phi_k - \phi_{k+1}) + \frac{1}{2} \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k} \ln \frac{r_{k+1}^2}{r_k^2} \right) \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $c=13.3464$  (uzunluk birimi km),  $\Delta\sigma$ ; çokgen yapının yoğunluğu ( $\text{gr/cm}^3$ ) ve  $C=(x_{k+1}-x_k)^2+(z_{k+1}-z_k)^2$  olarak tanımlanır.

1. köşeden 2. köşeye, 2. köşeden 3. köşeye,.....,(N-1). köşeden (N). köşeye olmak üzere sıralanan köşelerle belirlenmiş kenarlar boyunca X veya Z integrallerinin kısmi türevleri ( $\partial / \partial z_k, \partial / \partial x_k$ ) izleyen bağıntılardan hesaplanır.

$$\frac{\partial Z}{\partial z_k} = -P + (x_{k+1} - x_k)^2 L$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x_k} = Q - (x_{k+1} - x_k)(z_{k+1} - z_k) L$$

$$\frac{\partial X}{\partial z_k} = Q - (x_{k+1} - x_k)^2 M$$

$$\frac{\partial X}{\partial x_k} = P + (x_{k+1} - x_k)(z_{k+1} - z_k) M$$

Bu eşitlikte  $L, M, P$  ve  $Q$  ise

$$L = \left( (\phi_k - \phi_{k+1}) + \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k} \frac{1}{2} \ln \frac{r_{k+1}^2}{r_k^2} \right) / C$$

$$M = \left( (\phi_k - \phi_{k+1}) \frac{z_{k+1} - z_k}{x_{k+1} - x_k} - \frac{1}{2} \ln \frac{r_{k+1}^2}{r_k^2} \right) / C$$

$$P = \frac{x_k z_{k+1} - x_{k+1} z_k}{C} \left( \frac{x_k (x_{k+1} - x_k) - z_k (z_{k+1} - z_k)}{r_k^2} - \frac{x_{k+1} (x_{k+1} - x_k) - z_{k+1} (z_{k+1} - z_k)}{r_{k+1}^2} \right)$$

$$Q = \frac{x_k z_{k+1} - x_{k+1} z_k}{C} \left( \frac{x_k (z_{k+1} - z_k) + z_k (x_{k+1} - x_k)}{r_k^2} - \frac{x_{k+1} (z_{k+1} - z_k) + z_{k+1} (x_{k+1} - x_k)}{r_{k+1}^2} \right)$$

eşitlikleriyle tanımlanır. Gravite anomalileri gözlemsel verilerin oluşturduğu

$$d = [d_1, d_2, \dots, d_{Ngöz}]$$

kümesi ile tanımlanırlar. İlk yinelemede kuramsal toplam manyetik anomali  $\Delta G^0$

$$p^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0; z_1^0, z_2^0, \dots, z_N^0]$$

ile tanımlanan başlangıç model parametrelerinden hesaplanır. Ters çözüm işleminin amacı; gözlemsel anomali değerlerine en iyi uyan, kuramsal anomali değerlerini sağlayan  $d$  veri kümesinin saptanmasıdır. Jeofizik problemlerde gravite işlevi Eşitlik 1 ile model (yapı) parametreleri  $(x_k, z_k)$  arasındaki ilişki doğrusal değildir. Doğrusallaştırmak için  $\Delta G(X)$ , başlangıç model parametre vektörü  $p^0$  civarında Taylor serisine açılır ve yüksek mertebeden terimler ihmal edilir. Bu durumda işlev

$$\Delta G(X) = \Delta G^0(X) + A \cdot \delta p$$

veya

$$g = A \cdot \delta p \quad (2)$$

olarak yazılabilir. Eşitlik 2'te  $g$ ; gözlenen ve kuramsal anomali arasındaki farkı,  $A$ ; yapı parametrelerine  $(x_k, z_k)$  göre kısmi türevlerden oluşan sistem (Jakobiyen) matrisini simgeler ve izleyen bağıntılarla ifade edilirler.

$$g = \Delta G(X) - \Delta G^0(X)$$

$$A = \sum_{k=1}^{2N} \frac{\partial \Delta G^0(X)}{\partial p_k}$$

$dp$  ise yapı parametreleri artım vektörünü simgeler.

#### 4. SİSTEM (JAKOBIYEN) MATRİSİNİN HESAPLANMASI

Jakobiyen matrisini oluşturan kısmi türevler gravite anomali bağıntısının ( $\Delta G(X)$ ) yapı parametrelerine göre türevlerinin alınmasıyla hesaplanabilir. Analitik olarak parametrelere göre kısmi türevlerin alınması işlemi uzun matematiksel bağıntılar gerektirir ve yüzlek veren yapılar için ( $x_k=z_k=0$ ) tekil olma koşullarına neden olur. Bu nedenle, kısmi türevlerin hesaplanması sayısal türev alma işlemi ile gerçekleştirilir (Murthy, 1992). Bu işlemde köşeleri sırasıyla 1,q,2,...,N,1 ve kesiti kapalı bir çokgen olan yapının gravite anomalisi (Şekil 2)

$$\Delta G_1 = \Delta G_{1,q,2,\dots,N,1} = \Delta G_{q,2,3,\dots,N,q} + \Delta G_{1,q,N,q} \quad (3)$$

olarak yazılabilir. Benzer olarak, 1\* : kesiti çokgen olan yapının 1 no'lu köşesinin  $x_k$  mesafesine  $\varepsilon$  artımı verildiğindeki yeni konumu olmak üzere 1\*,2,3,...,N,q,1\* köşelerinden oluşan kapalı bir çokgenin anomalisi de

$$\Delta G_2 = \Delta G_{1^*,2,3,\dots,N,q,1^*} = \Delta G_{q,2,3,\dots,N,q} + \Delta G_{1^*,2,q,1^*} \quad (4)$$

olarak yazılabilir.  $\Delta G(X)$ 'in  $x_k$  parametresine göre kısmi türevleri

$$\frac{\Delta G_1 - \Delta G_2}{\varepsilon} = \frac{\Delta G_{1,q,N,1} - \Delta G_{1^*,2,q,1^*}}{\varepsilon} \quad (5)$$

bağıntısına indirgenir. Bu işlem, 1\*,2,3,...,N,q,1\* köşelerinden oluşan kapalı çokgenin anomalisinin hesaplanması ve sonucun  $x_k$ 'nin artım miktarı olan  $\varepsilon$  değerine bölünmesi nedeniyle tüm hesaplamaları kolaylaştırır.

#### 5. TEKİL DEĞER AYRIŞTIRMA İŞLEMİ

Eşitlik 2'den parametre artım vektör  $[dp]$ 'nin hesaplanması  $A$  sistem matrisinin tersinin bulunmasını gerektirir. Jeofizik verilerin ters çözümünde genellikle gözlemsel verilerin sayısının yapıyı oluşturan parametrelerin sayısından fazla veya eşit sayıda ( $N_{göz} \geq N$ ) olması nedeniyle sistem matrisinin tersinin doğrudan hesaplanması olası değildir. Bu nedenle sistem matrisinin tersi Lanczos ile Golub ve Reinsch tarafından önerilen tekil değer ayrıştırma yöntemi kullanılarak hesaplanabilir (Lanczos, 1961; Golub ve Reinsch, 1970). Tekil değer ayrıştırma yönteminde sistem matrisi  $[A]$ , verilerin eigen vektörlerinin oluşturduğu  $[U]$ , parametre artımlarının eigen vektörlerinin oluşturduğu  $[V]$  ve  $[\Lambda]$  eigen değerler matrislerine ayrıştırılır. Bu durumda Jakobiyen matrisi  $[A]$

$$J = U\Lambda V^T \quad (6)$$

olarak yazılabilir. Eşitlik 2'de tanımlanan parametre artım vektörü veya çözüm vektörü  $[dp]$ 'de

$$\delta p = V\Lambda^{-1}U^T g \quad (7)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Eğer  $[\Lambda]$  eigen değerler matrisinin elemanlarından biri sıfır veya sıfıra yakın bir değer almışsa tersinin  $[\Lambda]^{-1}$  hesaplanması tekillik veya kötü koşulluluk sorunu yaratır. Karşılaşılabilecek bu tür sorunların önlenmesi için Jupp ve Vozoff çözüm vektörünün (Jupp ve Vozoff, 1975)

$$\delta p = VT\Lambda^{-1}U^T g \quad (8)$$

yazılabileceğini önermişlerdir. Eşitlik 8'de yer alan  $[T]$  matrisi elemanları sönüm faktörlerinden ( $t_i$ ) oluşan köşegen bir matristir. Sönüm faktörlerinin ( $t_i$ ) değerleri ise

$$t_i = \frac{K_i^{2\eta}}{K_i^{2\eta} + \mu^{2\eta}} \quad (9)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu bağıntıda  $\lambda_i$ 'ler eigen vektörleri matrisinin  $[\Lambda]$  elemanları olmak üzere  $\mu$ ; göreceli bir eşik değerini,  $\eta$  de tam sayı bir değeri simgeler.  $K_i$  ise  $K_i = I_i/I_1$  olarak tanımlanır. Eşitlik 9  $\eta=1$  için geleneksel Marquardt çözüm yöntemini,  $\eta$ ' nün daha büyük değerleri için de göreceli eşik değeri  $\mu$  ile tekil değer kısaltma yönteminin tanımlar.

## 6. m VE h DEĞERLERİNİN SEÇİMİ

Göreceli eşik değeri  $\mu$ , genellikle parametrelerdeki değişinti kabul edilebilir en büyük değişintiden daha küçük olacak şekilde seçilir (Jackson, 1972). Belirli eigen değeri üzerindeki hızlı azalma eşik değerini belirler (Pedersen, 1977). Fakat bu kriterler  $\mu$  eşik değerinin seçiminde kısıtlamalar getirdiğinden ayrımlılık matrisinin bozulması sonucunu yaratır. Başlangıçta  $I^*$  eigen değerleri vektörünün sıfıra eşit olmayan en küçük elemanı olmak üzere toplam varyans her yinelemede

$$\mu = \lambda^* / \lambda_{\max} \quad (10)$$

bağıntısından hesaplanır ve böylece göreceli eşik değeri  $\mu$  belirlenir. Sönüm faktörlerinden oluşan  $[T]$  köşegen matrisi Eşitlik 9'dan  $\eta=1$  değeri için saptanır ve eşik değeri  $\mu$ 'nün değeri için  $[dp]$  çözüm vektörü hesaplanır.

$\Delta G(X)$  gözlenen verileri ve  $\Delta G^0(X)$  de hesaplanan anomali değerlerini göstermek üzere gözlenen veriler ile hesaplanan anomali değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamı olarak tanımlanan ve en küçük olması amaçlanan işlev de

$$\sum_{i=1}^{N_{g\check{s}z}} [\Delta G(X) - \Delta G^0(X)]^2 \quad (11)$$

bağıntısıyla verilir. Eşitlik 11 ile tanımlanan işlevin değeri belirlenen değerden küçükse yineleme işlevi devam eder. Aksi halde, Eşitlik 9 ile verilen sönüm faktöründeki  $\eta$  değeri bir ile artırılır ve işlemin yakınsaması sınanır.  $\eta=4$  değeri için bile yakınsama sağlanmıyorsa eşitlik 10'daki  $\mu$  değerinin yeniden saptanması için izleyen daha büyük eigen değeri ( $I$ ) seçilir. Herhangi bir adımda yakınsama sağlandığında Eşitlik 10 ile tanımlanan  $\mu$  ve yeniden



bire eşitlenen  $\eta$  değerleri ile bir sonraki yineleme tüm eigen değerleriyle sırasıyla devam eder. Bu yineleme işlemi belirli sayıda yineleme tamamlanıncaya veya Eşitlik 11'deki işlev değeri ulaşılması istenen en küçük hata değerine ulaşıncaya dek devam eder.

## 7. TEKİLLİLİĞİN ARAŞTIRILMASI VE AYRIMLILIK MATRİSİ

Eigen değerlerinin tümünü veya kısaltılmış birkaç eigen değerini içeren çözüm vektörü  $[d\phi]$  ters çözüm işleminin tekilliğinin derecesini belirler. Bu durum ayrımlılık matrisine bakılarak saptanır (Wiggins, 1972; Jackson, 1972; Pedersen, 1977). Ayrımlılık matrisi  $[R]$

$$R = A^{-1}A \quad (12)$$

olarak tanımlanır. Eşitlik 6'daki tanımlar eşitlik 12'de yerine konulacak olursa ayrımlılık matrisi  $[R]$

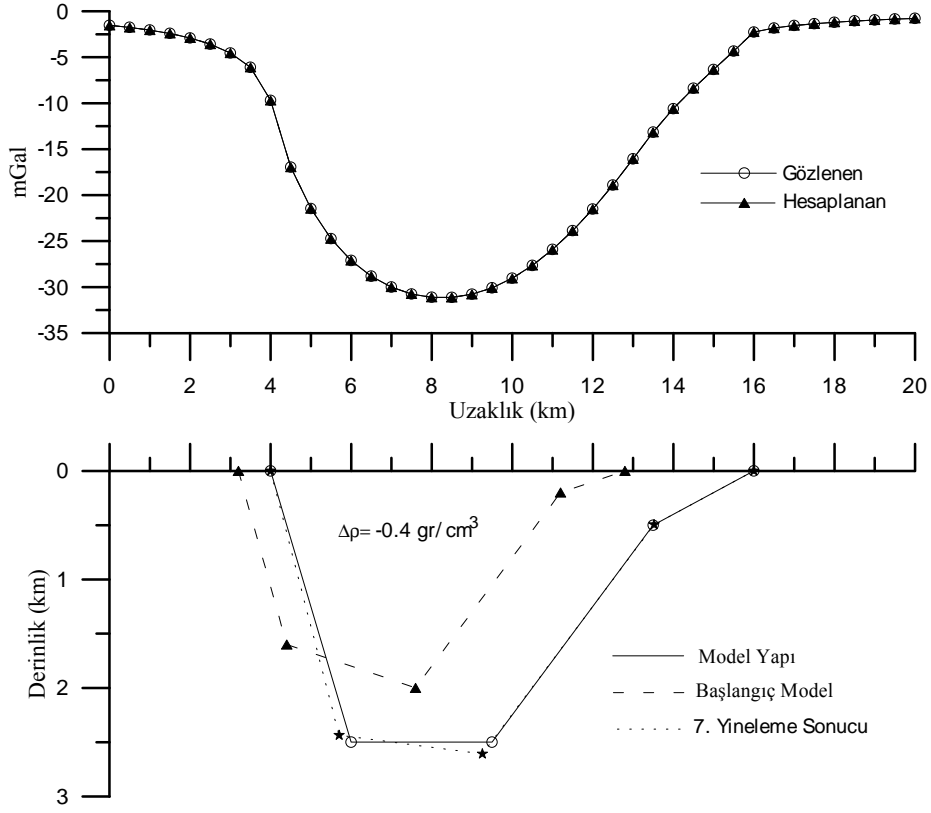
$$R = V_p V_p^T \quad (13)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlikte  $p$  ayrımlılık matrisinin rankıdır. Eğer  $p=2N$  ise ayrımlılık matrisinin köşegen elemanlarının değeri bire, köşegen olmayan elemanlarının değeri ise sıfıra eşittir. Bu koşul kabul edilen başlangıç parametreleri için çözümün tekilliğinin derecesini belirler. Benzer yaklaşımlar varyans-kovaryans matrisinden (Wiggins, 1972; Pedersen ve Rasmussen, 1989) veya  $[V]$  matrisi (parametre artım değerleri matrisi) ya da sönüm faktörlerinin araştırılmasından sağlanabilir (Vozoff ve Jupp, 1975; Raiche vd. 1985). Genellikle, model parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkisi ters çözüm işlemindeki parametre hata miktarını etkiler. Kovaryans ve korelasyon matrislerinin araştırılmasıyla şüpheli görülen parametreler saptanabilir. Belirlenen şüpheli parametre veya parametreler olabildiğince çok sayıda sabit tutulur veya kısıtlanarak uygun çözüme yaklaşım sağlanmaya çalışılır (Hjelt, 1992).

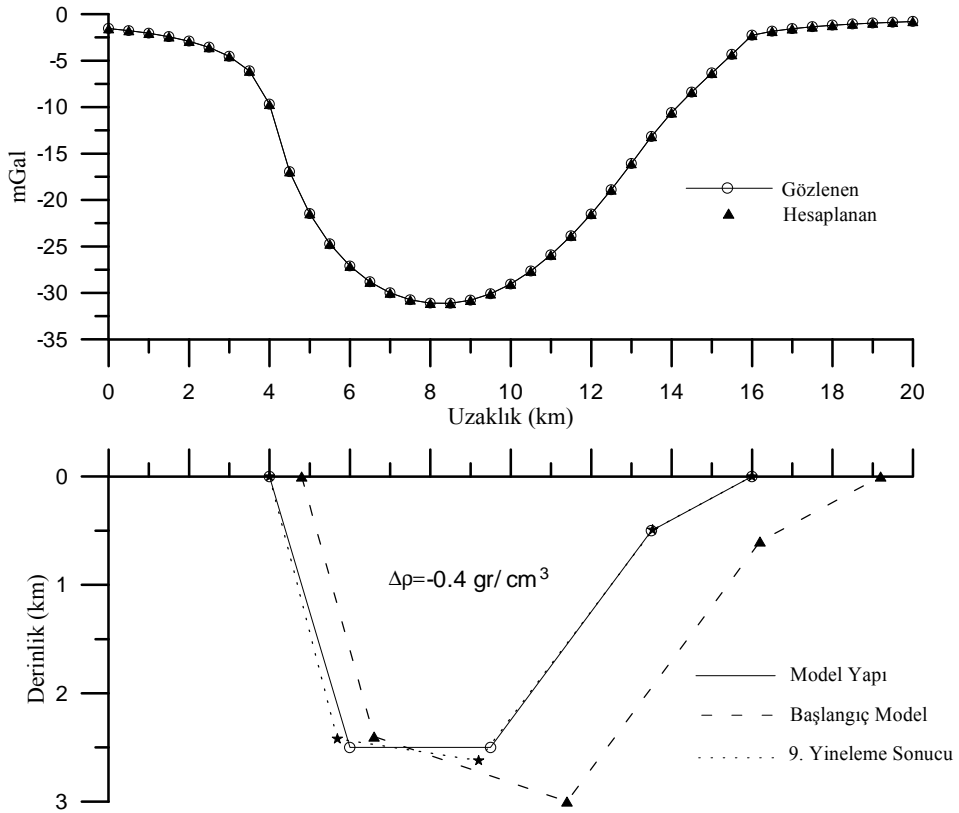
## 8. UYGULAMALAR

### 8.1 Kuramsal Uygulamalar

Yöntemin kuramsal uygulaması amacıyla yüzlek veren tortul bir havzayı simgeleyen çokgen bir model yapı oluşturulmuş ve Eşitlik 1 kullanılarak kuramsal gravite anomalisi hesaplanmıştır. Ters çözüm işlemi de model yapı geometrisinden -%20 ve +%20 farklı olarak tanımlanan iki ayrı başlangıç model parametre değerleri için gerçekleştirilmiştir. İlk uygulamada model yapı geometrisinden -%20 farklı seçilen parametre değerleri için sonuca 7.yinelemede ulaşılmıştır. İkinci uygulamada ise yapı parametre değerleri model yapı geometrisinden +%20 farklı seçilmiş ve sonuca 9.yinelemede ulaşılmıştır. Her iki uygulama sonucunda saptanan parametrelerin model yapıyı çok iyi tanımladığı gözlenmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4). Ayrımlılık dizeyinin köşegen elemanlarının değerleri hem yineleme adımının seçiminde hem de hangi yapı parametresinin tam olarak kestirilebildiğini belirlemekte kullanılmıştır.



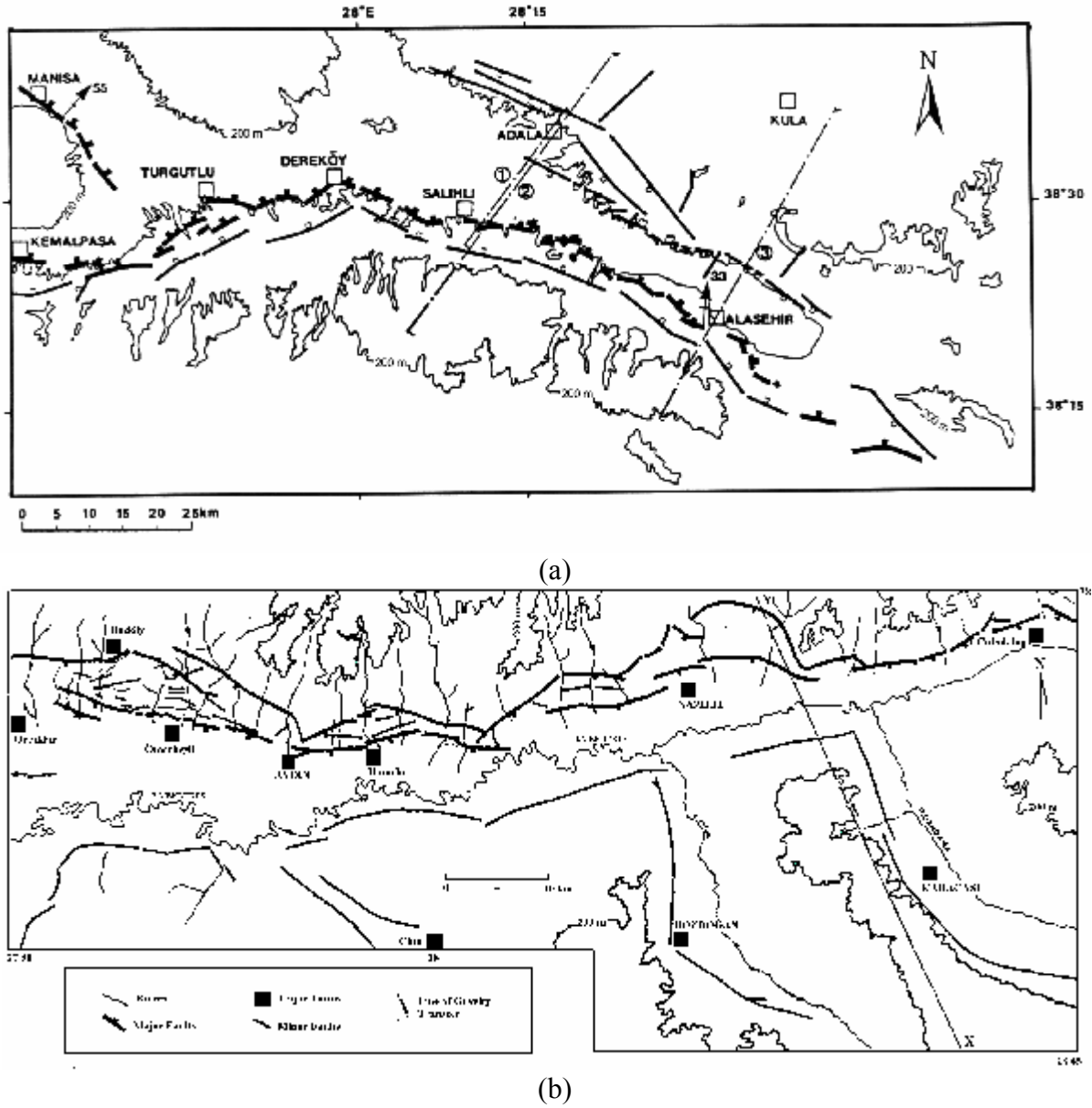
Şekil 3. Parametre başlangıç değerlerinin -%20 eksik alındığı model yapı ve çözümü



Şekil 4. Parametre başlangıç değerlerinin +%20 fazla alındığı model yapı ve çözümü

## 8.2. Batı Anadolu Gravite Verilerinin Değerlendirilmesi

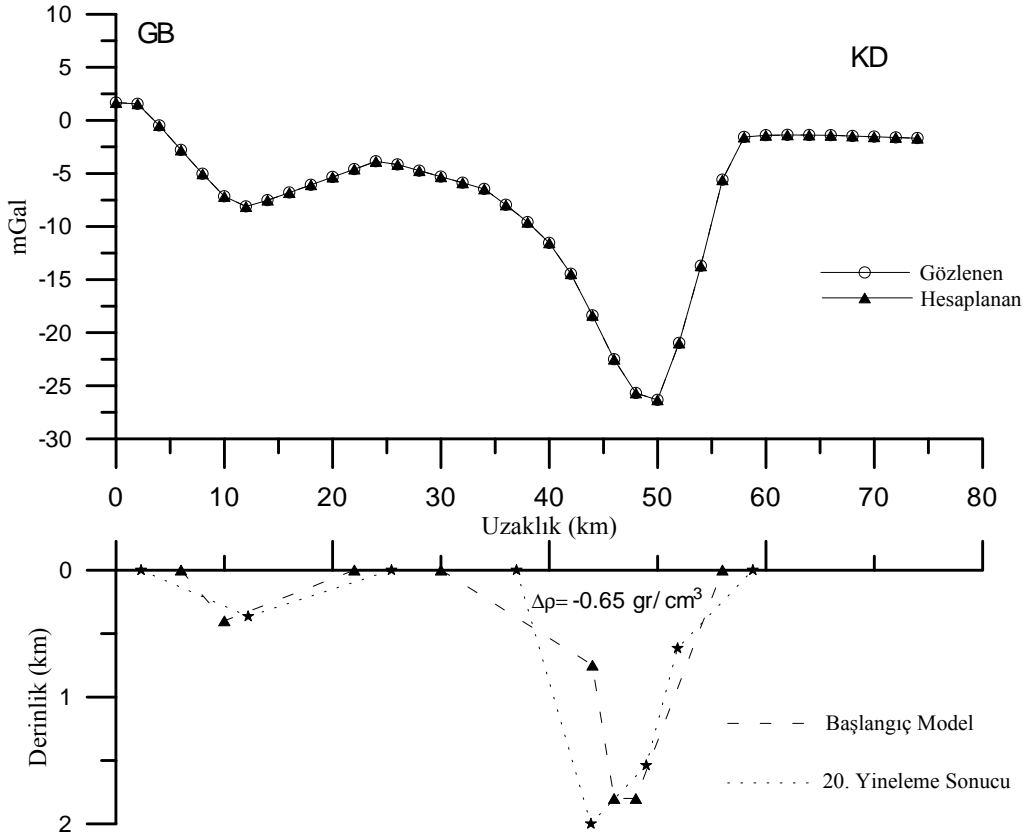
Kuramsal model yapılar üzerinde sınaması yapılan yöntem arazi verileri üzerine uygulanarak geçerliliği ve uygulanabilirliği gözlenmiştir. Bu amaçla yöntem, MTA tarafından hazırlanan Bouguer gravite anomali haritası üzerinde Paton tarafından alınan ve modellenen biri Gediz grabenini diğeri Büyük Menderes grabenini kesen iki profil verisine uygulanmıştır (MTA; 1979; Paton, 1992) (Şekil 5).



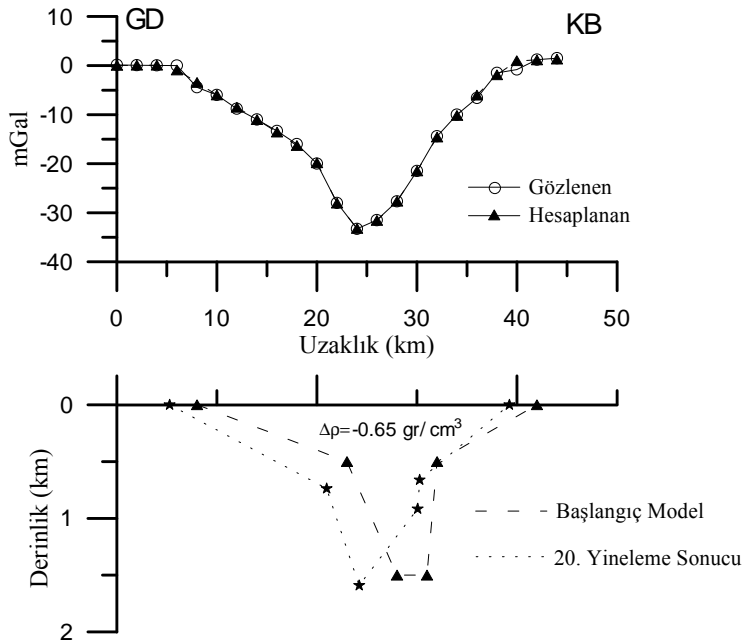
Şekil 5. (a) Gediz grabeni , (b) Büyük Menderes grabeni üzerinde alınan gravite profilleri

Gediz grabenini kesen profil için anomaliye iki ayrı yapının neden olduğu düşünülmüştür. Bu düşünce ile oluşturulan başlangıç model yapı ile ters çözüm işlemi sonucu 20.yineleme sonunda saptanan model yapı Şekil 6'da görülmektedir. İkinci uygulamada ise Büyük Menderes grabenini kesen anomalinin tek bir yapı tarafından oluşturulduğu varsayılmıştır. Oluşturulan bu modele ilişkin ters çözüm işlemi sonucunda 20.yineleme sonunda saptanan yapı modeli de Şekil 8 'de görülmektedir. Her iki işlemde graben alanını dolduran tortulların

temel kayalardan olan yoğunluk ayrılığı Paton'de olduğu gibi  $-0.65 \text{ gr/cm}^3$  olarak alınmıştır (Paton, 1992).



Şekil 6. Gediz grabeni üzerinde alınan gravite profilinin (3) ters çözüm sonucu



Şekil 7. Büyük Menderes grabeni üzerinde alınan gravite profilinin (X-Y) ters çözüm sonucu

## 9. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Gediz ve Büyük Menderes grabeni Batı Anadolu'daki en önemli tektonik yapılardır. Her iki graben Miyosen ve Miyosen sonrası Batı Anadolu'da egemen olan hızlı gerilmelerin sonucunda meydana gelen açılma tektoniği sonucunda gelişen büyük aktif faylarla oluşmuştur. Bu faylar aynı zamanda jeomorfolojiyi de kontrol etmektedir. İki boyutlu gravite modelleme işleminin sonuçlarına göre grabenler Paton'da da belirtildiği gibi simetrik olmayan fayların denetiminde gelişmiş olup asimetrik bir yapı özelliği göstermektedirler (Paton, 1992). Her iki graben alanı ile ilgili olarak daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda Sarı ve Şalk grabenleri dolduran tortulların kalınlığını Gediz için 2 km civarında, B.Menderes için ise 2-2.5 km olarak saptamışlardır (Sarı ve Şalk, 1995; Sarı ve Şalk, 2002). Yer elektrik çalışmaları sonuçlarına göre de Büyük Menderes grabeninin taban derinliği maksimum 2 km olarak saptanmıştır (Turgay vd., 1980). Gürer vd., manyetotellürik verilere dayanarak yapmış oldukları çalışmada Gediz grabenindeki tortul kalınlığının 1-3.8 km arasında değiştiğini saptamışlardır (Gürer vd., 2002). Sevinç ve Ateş ise Büyük Menderes grabeninin tortul kalınlığının yaklaşık 4.5 km olduğunu belirtmişlerdir (Sevinç ve Ateş, 1996). Gerçekleştirilen bu çalışmada da grabenleri dolduran tortul kalınlığının Gediz grabeni için 2.0 km, Büyük Menderes grabeni için 1.5 km civarında olduğu saptanmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, tortul kalınlığına ilişkin saptanan farklı değerler işlemlerde kullanılan farklı yoğunluk farkı değerlerinden kaynaklanmaktadır. Çalışma alanında yapılacak derin sondajlar ve bu sondaj noktalarından geçecek bir gravite profili ile gerçekleştirilecek bir çalışma grabenleri dolduran tortul örtünün kalınlığı hakkında bizlere daha doğru bilgiler sunacaktır.

## KAYNAKÇA

- Arpat E., Bingöl E. (1969): "The Rift System of Western Turkey: thoughts on its Developments", Bull. of Mineral Research and Exploration Institute of Turkey, 73, 1-9.
- Ambrassey N.N. (1971): "Value of Historical Records of Earthquakes", Nature, 232, 375-379.
- Dewey J.F. (1988): "Extensional Collapse of Oregans", Tectonics, 7, 1123-1139.
- Dewey J.F., Şengör A.M.C. (1979): "Aegean Surrounding Regions: Complex Multiplate and Continuum Tectonics in a Convergent Zone", Geol. Soc. America Bull., Pt I, 90, 84-92.
- Golub G.H., Reinsch C. (1970): "Singular Value Decomposition and Least Squares Solution", Num. Math., v.14, no.3, p.403-420.
- Gürer A., Pinçe A., Gürer Ö.F., İlkışık O.M. (2002): "Resistivity Distribution in the Gediz Graben and its Implications for Crustal Structure", Turkish J. of Earth Sci., 11, 15-25.
- Hjelt S.E. (1973): "Experiences with Automatic Magnetic Interpretation Using the Thick late Model", Geophys. Pros., v.21, no.2, p.243-265.
- Hjelt S.E. (1992): "Pragmatic Inversion of Geophysical Data", Springer Verlag, Berlin, 262 p.
- Inman J.R. (1975): "Resistivity Inversion with Ridge Regression", Geophysics, v.40, no.5, p. 798-817.
- Jackson D.D. (1972): "Interpretation of Inaccurate, Insufficient and Inconsistent Data", Geophys. Jour. Royal Astr. Soc., v.28, no.1, p.97-109.
- Jupp D.B.L., Vozoff K. (1975): "Stable Iterative Methods for the Inversion of Geophysical Data", Geophys. Jour. Royal Astro. Soc., v.42, no.3, p.957-976
- Lanczos C. (1961): "Linear Differential Operators", D. Van Nostrand, London, p. 564.
- Le Pichon X., Angelier J. (1979): "The Hellenic Arc and Trench Sytem: a Key Neotectonic Evolution of the Eastern Mediterranean Area", Tectonophysics, 60, 1-42.

- Marquardt D.W. (1963): "An Algorithm for Least Squares Estimation of the Nonlinear Parameters", Jour. Soc. Indus. Appl. Math., v.11, no.2, p.431-441.
- Meulenkamp J.E., Wortel W.J.R., Van Wamel W.A., Spakman W., Hoogerduyn Strating E. (1988): "On the Hellenic Subduction Zone and Geodynamic Evolution of Crete Since the Late Middle Miocene", Tectonophysics, 146, 203-215
- Mickus K.L., Peeples W.J. (1992): "Inversion of Gravity and Magnetic Data for the Lower Surface of 2.5 Dimensional Sedimentary Basin", Geophys. Prosp., v.40, no.2, p.171-193.
- MTA (1979): "Türkiye Bouguer Gravite Anomali Haritası (1/500 000 ölçekli İzmir ve Denizli paftaları)".
- Murthy J.V.R. (1992): "Magnetic Interpretation of Two Dimensional Bodies", Second SERC school on Geomagnetism and Earth's Interior, Geopotentials-I, Sponsored by DST, at Dept. of Geophysics, Andhra Univ., Visakhapatnam, India, unpaginated.
- Paton S. (1992): "Active Normal Faulting Drainage Patterns and Sedimentation in Southwestern Turkey", J. Geol. Soc., London, 149, 1031-1044.
- Pedersen L.B. (1977): "Interpretation of the Potential Field Data: A Generalized Inverse Approach", Geophys. Prosp., v.25, no.2, p.199-230.
- Pedersen L.B. (1979): "Constrained Inversion of Potential Field Data", Geophys. Pros., v.27, no.4, p.726-748.
- Pedersen L.B., Rasmussen T.M. (1989): "Inversion of Magnetotelluric Data : A Nonlinear Approach", Geophys. Prospect., 37, 669-695.
- Price S. (1989): "Sedimentation and Neotectonics of the Burdur Region, SW Turkey", Ph.D. Thesis, University of Leicester, UK.
- Raiche A.P., Jupp D.L.B., Rutter H., Vozoff K. (1985): "The Joint Use of Coincident Loop Transient Electromagnetic and Schlumberger Sounding to Resolve Layered Structures", Geophysics, v.50, no.10, p.1618-1627.
- Rao B.N., Ramakrishna P., Markandeyulu A. (1995): "GMINV: A Computer Program for Gravity or Magnetic Data Inversion", Computers and Geosciences, V.21, No.2, 301-319.
- Sarı C., Şalk M. (1995): "Estimation of the Thickness of the Sediments in the Aegean Grabens by 2-D and 3-D Analysis of the Gravity Anomalies", International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region IESCA. Proceedings Volume-I, p.255-271.
- Sarı C., Şalk M. (2002): "Analysis of Gravity Anomalies with Hyperbolic Density Contrast: An Application to the Gravity Data of Western Anatolia", Journal of Balkan Geophysical Society (in press).
- Sevinç A., Ateş A. (1996): "Aydın-Germencik Civarı Gravite Anomalilerinin İki Boyutlu Ters Çözümleri", Jeofizik, cilt.10, sayı: 1-2, s. 29-39.
- Seyitoğlu G., Scott B.C. (1992): "The Age of the Büyük Menderes Graben (West Turkey) and its Tectonic Implication", Geological Magazine, 129, 239-242.
- Seyitoğlu G., Scott B.C. (1996): "The Age of the Alaşehir Graben (West Turkey) and its Tectonic Implications", Geological Journal, 31, 1-11.
- Sözbilir H. (2001): "Extensional Tectonics and the Geometry of Related Macroscopic Structures: Field Evidence from the Gediz Detachment, Western Turkey", Turkish Journal of Earth Sciences, 10, 51-67.
- Şahin H., Ünay T. (1981): "Aydın-Germencik-Bozköy Jeotermal Enerji Aramaları Rezistivite Etüdü Ön Raporu", M.T.A Derleme Rapor No: 8279.
- Şengör A.M.C. (1979): "The North Anatolian Transform Fault: its Age, Offset and Tectonic Significance", Journal of the Geological Society, London, 13, 268-282.
- Şengör A.M.C. (1980): "Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution of Anatolia and Surrounding Regions", Bureau de Recherches Geologique et Minieres Bulletin (France), 115-117.

- Şengör A.M.C., Yılmaz Y. (1981): "Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach", *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Şengör A.M.C. (1987): "Cross-Faults and Differential Stretching of Hanging Walls in Regions of Low-Angle Normal Faulting: Examples from Western Turkey", In: Coward, M.P., Dewey, J.F. & Hancock, P.L (eds) *Continental Extensional Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 28, 575-589.
- Şengör A.M.C., Yılmaz Y., Subgurlu O. (1985): "Tectonics of the Mediterranean Cimmerides: Nature and Evolution of the Western Termination of Paleo-Tethys", In: obertson, A.H.F. & Dixon, J.E. (eds) *the Geological Evolution of the Eastern Mediteranean*, Geological Society, London, Special Publications, 17, 77-112.
- Thanassoulas C., Tselentis G.A., Dimitriadis K. (1987): "Gravity Inversion of a Fault by Marquadt's Method", *Computers & Geosciences*, v. 13, no. 4, p.399-404.
- Turgay I., Özgüler M.E., Şahin H. (1980): "Denizli-Buldan-Pamukkale Jeotermik Enerji Aramaları Rezistivite Etüdü", M.T.A Rapor No: 6958, Ankara.
- Varah J.H. (1973): "On the Numerical Solution of Ill-conditioned Linear System with Application to Ill-posed Problems", *SIAM Jour. Num. Anal.*, v. 10, no. 2, p.257-267.
- Vozoff K., Jupp D.L.B. (1975): "Joint Inversion of Geophysical Data", *Geophy: Jour. Royal Astr. Soc.*, v. 42, no. 3, p.977-991.
- Yağmurlu F. (1987): "Salihli Güneyinde Üste Doğru Kabalaşan Neojen Yaşlı Alüvyonel yelpaze Çökelleri ve Gediz Grabeninin Tektono-sedimanter Gelişimi", *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 30, 33-40.
- Yılmaz Y., Genç Ş.C., Gürer F., Bozcu M., Yılmaz K., Karacık Z., Altunkaynak Ş., Elmas A. (2000): "When did the Western Anatolian Grabens Begin to Develop?", in Bozkurt, E., Winchester, J.A., and Piper J.A.D., Eds., *Tectonics and magmatism in Turkey and the surrounding area*: Geological Society, London, Special Publications 173, 131-162.
- Wiggins R.A. (1972): "The General Linear Inverse Problem: Implications of Surface Wave and Free Scillations for Earth Structure", *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v.10, p. 51-285.
- Won I.J., Bevis M. (1987): "Computing the Gravitational and Magnetic Anomalies due to a Polygon: Algorithms and Fortran Subroutines", *Geophysics*, v.52, no.2, p.232-238.