

# SAYISAL ARAZİ MODELİNDEN GRAVİMETRİK YEREY DÜZELTMESİ

## Gravimetric Terrain Corrections using Digital Terrain Model

M. Emin AYHAN\*

### ÖZET

Jeofizik ve jeodezide geniş uygulama alanı olan gravimetrik yerey düzeltmesi (terrain correction) değerini hesaplamak için birçok yöntem geliştirilmiş olup, bu yöntemlerde kullanılan temel veri topoğrafik yüksekliklerdir. Bu çalışmada; topoğrafya dikdörtgen prizmalara (bölme) ayrılmakta ve her bölmenin hesap noktasından uzaklığına ve yüksekliğine bağlı olarak tam veya yaklaşık formüller ile gravimetrik yerey düzeltmesine katkısı hesaplanmaktadır. Hesap noktasından 21.9 km uzaklık içinde kalan topoğrafya önce iç, orta ve dış olmak üzere üç bölgeye ayrılmakta ve her bölgede farklı sayısal arazi modelinden (DTM) elde edilen topoğrafik yükseklikler kullanılmaktadır. Bu amaçla iki DTM oluşturulmuştur. DTM'lerden ilki Türkiye'yi kapsayan alanda, insan gücü ile sayısallaştırılan 15"x20" (450 m x 450 m) grid köşesi yüksekliklerinden oluşur. İkinci DTM ise; 39°00'31" - 39°14'31" enlemleri ve 37°22'56" - 37°36'56" boylamları ile sınırlı uygulama bölgesinde, 1/25 000 ölçekli haritaların bilgisayarda sayısallaştırılması ile elde edilen 1"x1" (30 m x 30 m) lik DTM'dir. Gravimetrik yerey düzeltmesi hesaplanırken; 15"x20" lik DTM'den bikübik spline fonksiyonları ile interpolate edilen yükseklikler iç bölgede veri olarak kullanılmıştır. Uygulama bölgesinde merkezi 11.1 km x 8.5 km genişlikli alanda gravimetrik yerey düzeltmesi hesaplanmış ve bir harita biçiminde düzenlenerek topoğrafya ile ilişkisi gösterilmiştir.

### ABSTRACT

Various methods have been developed for the estimation of gravimetric terrain correction applied in geophysics and geodesy. Heights are used as the base data of these methods. In this study, topography is divided into rectangular prisms (blocks) then exact or approximate expressions are applied to estimate the contribution of a block to gravimetric terrain correction depending on, respectively, the height of block and the distance between block and the measurement station.

The area within a radius of 21.9 km divided into three segments referred as innermost, inner and external zones. The proposed method requires two digital terrain models (DTM) one for external zone and one for inner subarea. The available DTM within whole Turkey includes heights interpolated manually over the maps at 15"x20" (450x450 m) nodal points. Heights of the application area bounded by latitudes 39°00'31" - 39°14'31" and longitudes 37°22'56" - 37°36'56" have been scanned over the maps scaled 1/25 000 and then heights at 1"x1" (30 m - 30 m) nodal points have been obtained. The contributions of the inner and external subareas have been computed with 1"x1" DTM and 15"x20" DTM respectively. Furthermore, the heights densified using bicubic spline interpolation have been applied within innermost subarea. Gravimetric terrain corrections have been calculated within a square subarea, dimensioned 11.1 km x 8.5 km, centered inside the application area. In addition, a map of gravimetric terrain corrections within the area has been made ready to illustrate the relationship between topography and gravimetric terrain correction.

### GİRİŞ

P yeryüzü noktasından geçtiği düşünülen düzlem veya küresel Bouguer plakası ile topoğrafya arasında kalan artık ve noksan kitlelerin P noktasında yarattığı toplam çekim kuvvetinin düşey bileşeni gravimetrik yerey düzeltmesi olarak isimlendirilir. Yazı içinde gravimetrik yerey

düzeltilmesinden kısaca yerey düzeltmesi (tc) ismi ile söz edilecektir. Yerey düzeltmesi jeofizikte kitle anomalilerinin tespitinde kullanıldığı gibi, jeodezik amaçla dünyanın gravite alanının belirlemede ve gravite interpolasyonunda kullanılır. Yersel ölçülerden dünyanın gravite alanını belirlemek üzere geliştirilen iki temel kuram bulunmaktadır; Stokes kuramı ve Molodensky kuramı. Stokes kuramına

\* Jeodezi Dairesi, Harita Genel Komutanlığı, Cebeci, 06100, Ankara.

göre jeoidin dışında herhangi bir kitle bulunmaması ve sınır değerlerinin (gravite anomalilerinin) jeoid üzerinde olması istenir. Jeoid dışında yerel kitleleri (topoğrafya) Bouguer plakası ile yok etmek ancak tc'nin gözönünde tutulması ile olanaklıdır. Topoğrafyanın gözardı edilmesi ile ilgili ikinci Helmert yoğunlaştırma yönteminde, Helmert anomalileri serbest hava anomalilerine tc'nin eklenmesi ile elde edilir (Heiskanen ve Moritz 1967, Wichiencharoen 1982). Molodensky kuramında ise fiziksel yeryüzündeki serbest hava anomalilerine getirilecek birinci dereceden düzeltme  $g_1$  yerine belirli bir varsayımla tc kullanılmaktadır.

Yerey düzeltmesi için temel giriş verisi topoğrafya'dır. Daha çok kontur haritaları biçiminde olan topoğrafya; hesaplama yöntemine uygun seçilen dağılım ve düzende nokta yüksekliği veya ortalama yükseklik olarak insan gücü veya bilgisayar ile sayısallaştırılır. Yerey düzeltmesi hesaplama yöntemlerinde topoğrafya silindirik bölme, dikdörtgen bölme, konik kabuk, üçgen bölme gibi geometrik parçalara ayrılır ve her parçanın ölçü noktasındaki etkisi hesaplanarak tc belirlenir. Bu yöntemlerden en eski ve iyi bilineni silindirik bölmelere dayalı olmaktadır. Topoğrafik haritalar üzerinde hesap noktası merkez olmak üzere yerleştirilen saydam altıklardan silindirik bölmelerde ortalama yükseklikler insan gücü ile okunmakta ve çizelgelerden yararlanarak tc hesaplanmaktadır (Hayford ve Bowie 1912, Hammer 1939). Sonraki yıllarda özellikle bilgisayarların kullanıma girmesiyle bilgisayarda hesaplama ve sayısallaştırma yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerle ilgili genel bir değerlendirme Stacey ve Stephens (1970), Ayhan ve Kahveci'de (1991) verilmektedir.

Bu çalışmada, topoğrafyanın yan yana dikdörtgen bölmelerden oluştuğu düşünülerek her dikdörtgen bölme çekim etkisi ayrı ayrı tam veya yaklaşık formüller ile belirlenmiştir (Nagy 1966, 1988, Ayhan 1981, Forsberg 1984). Uygulanan yöntemle bağlı olarak grid köşelerinde sayısallaştırılan topoğrafik yükseklikler veri olarak kullanılmaktadır. Grid köşelerinde sayısallaştırılan yükseklikleri içeren sayısal arazi modelinden (DTM) tc değerini bilgisayarda hesaplamak düşüncesi yeni olmayıp çok sayıda araştırmacı tarafından ele alınmıştır. DTM ile uygulanan bazı tc hesap yöntemlerinde Hammer'de (1939, 1982) verilen çizelgelerden yararlanmak üzere silindirik bölmelerin ortalama yüksekliği belirlenmiştir (Cogbill 1990, Ballina ve Lopez 1990). Bazılarında ise dikdörtgen bölme, silindirik bölmeye benzetilerek ve dikdörtgen bölme etkisinin belirli bir yaklaşıklıkla belirlenmesi yoluna gidilmiştir (Pick 1987, 1988). Özellikle ülke boyutunda tc haritalarını hazırlamak ve yoğun gravite ölçü noktalarında tc hesaplamak için grid verilerden oluşan DTM büyük kolaylık sağlamaktadır. Grid veri ile uygulanan diğer bir yöntem ise FFT (Fast Fourier Transform) yöntemidir (Sideris 1984, Harrison ve Dickinson 1989).

Newton çekim yasasına göre hesap noktasından uzaklaştıkça kitlelerin çekim etkisi azalmaktadır. Bu nedenle tc hesaplanırken, nokta yakınında daha ayrıntılı DTM olmak üzere daha büyük grid aralıklı DTM'in nokta-

dan belirli bir dış sınıra kadar kullanılması uygun olmaktadır. Bu durum göz önünde tutularak, hesap noktası çevresindeki topoğrafya iç, orta ve dış olmak üzere üç bölgeye ayrılır. Bir yazıda dikdörtgen bölmelerin çekim etkisini belirlemeye uygun matematik model ele alındıktan sonra, bu yöntemde kullanılan grid verilerin özellikleri açıklanmaya çalışılacak ve Kangal ve Alacahan yakınında seçilen test bölgesinde yapılan sayısal uygulamanın incelenmesi ile uygulamaya yönelik öneriler ve sonuçlar verilecektir.

### DİKDÖRTGEN BÖLMENİN ÇEKİM ETKİSİ (TAM, YAKLAŞIK)

Merkezi, P hesap noktasında bulunan (X, Y, Z) dik koordinat sisteminin koordinat düzlemlerine paralel düzlemler ile bir dikdörtgen bölme oluşturulsun (Şekil 1).

Sabit yoğunluklu i nci dikdörtgen bölmenin P noktasında yarattığı çekim kuvvetinin düşey bileşeni  $tc_i$ ;

$$tc_i = G\rho \int_{X_1}^{X_2} \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{Z}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2}} dX dY dZ \quad (1)$$

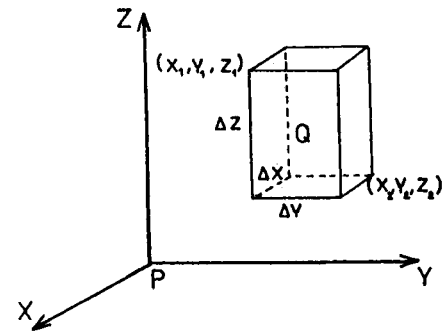
ile yazılır. Bu eşitlikteki üç katlı integralin açılımı ile uygulama formülü;

$$tc_i = G\rho \left[ \left| \ln \frac{Y+\lambda}{Y} \right| \left| \ln \frac{X+\lambda}{X} \right| \left| \frac{Z^2 + Y^2 + Z\lambda}{(Y+\lambda)(Y+Z)^{1/2}} \right| \left| \frac{Z_2}{Z_1} \right| \left| \frac{Y_2}{Y_1} \right| \left| \frac{X_2}{X_1} \right| \right] \quad (2)$$

olarak bulunur (Nagy 1966, 1988). Burada

$$\lambda = (X+Y+Z)^{1/2} \quad (3)$$

ile tanımlıdır. (2) bağıntısının değişik bir şekli Banerjee ve Gupta (1977), Ayhan (1981)'de verilmektedir. (2) eşitliği çıkarılırken, Şekil 1'deki dikdörtgen bölmenin üst yüzeyi (X, Y) düzlemine paralel ve ayrıca bölme içinde yoğunluk sabit olduğu öngörülmüştür. Dikdörtgen bölme üst yüzeyinin eğik düzlem olması durumunda çözüm eşitlikleri Blais-Ferland (1984)'de bulunabilir. Ayrıca bölme içinde yoğunluğun düşey doğrultuda karelik değiştiği varsayılarak çekim etkisi düşey bileşeninin belirlenmesi Bhaskara,



Şekil 1. Dikdörtgen bölme.  
Fig. 1. Rectangular block.

Rao-Ramesh ve Babu (1991), Garcia ve Abdeslem (1992)'de ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

Hesap noktasından uzakta bulunan dikdörtgen bölmelerin çekim etkisi olduğundan, (2) yerine yaklaşık formüllerin kullanılması yoluna gidilir. Yaklaşık formüllerde ilki dikdörtgen bölme çekim potansiyeli (V) küresel harmonik serilere açılarak;

$$V = G\rho\Delta X \Delta Y \Delta Z \left\{ \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{24\lambda^5} [(2\Delta X^2 - \Delta Y^2 - \Delta Z^2)\bar{X}^2 + (-\Delta X^2 + 2\Delta Y^2 - \Delta Z^2)\bar{Y}^2 + (-\Delta X^2 - \Delta Y^2 + 2\Delta Z^2)\bar{Z}^2] \right. \\ \left. + \frac{1}{288\lambda^7} [\dots\dots\dots] + \dots\dots\dots \right\} \quad (4)$$

$$tc = - \frac{\partial V}{\partial Z} \quad (5)$$

ile bulunur (MacMillan 1958, Forsberg 1984). Burada  $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ ; Q dikdörtgen bölme ağırlık merkezinin koordinatlarıdır (Şekil 1). Dikdörtgen bölme kitlelerinin Q noktasında yoğunlaştırılması durumunda nokta kitle yaklaşımıyla dikdörtgen bölme etkisi;

$$tc = G\rho\Delta X \Delta Y \Delta Z \frac{\bar{Z}}{(\bar{X}^2 + \bar{Y}^2 + \bar{Z}^2)^{3/2}} \quad (6)$$

bağıntısı ile de belirlenebilir. Yukarıda açıklanan yöntem ile tc hesabına uygun, TC isimli FORTRAN programlama dilinde bir yazılım Forsberg (1984)'de verilmekte olup, bu çalışmada da kullanılmıştır.

## TOPOGRAFİK YÜKSEKLİK VERİLERİ

Bir önceki bölümde açıklanan dikdörtgen bölme çekim etkisini hesaplamaya uygun tam ve yaklaşık bağıntıların tc belirlemedeki etkinliğini sergileyebilmek amacıyla, Kangal/Sivas yakınında seçilen bir deneme bölgesinde uygulama yapılmıştır. Deneme bölgesinde yapılan sayısal uygulamada, giriş verisi olarak üç ayrı DTM kullanılmış olup, herbirinin nitelikleri aşağıda kısaca ayrı ayrı açıklanmaktadır.

### 1"x1" DTM

Deneme bölgesini kapsayan I38-c2, I39-d1, J38-c3 ve J39-d4 1/25 000 ölçekli topoğrafik haritalar bilgisayar olanakları kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Her bir paftanın eşyüksekti kalıbı raster tarayıcı ile tarandıktan sonra vektöre dönüştürme işlemi yapılmış ve daha sonra dört paftayı kapsayan 1"x1" grid aralıklı 841x841 boyutlu yükseklik matrisi elde edilmiştir. Elde edilen yükseklik matrisinin doğruluğunu denetlemek amacıyla bölge topoğrafyasının üç boyutlu perspektif görüntüsü çizdirilmiş olup, Şekil 2'de verilmektedir. Bilgisayar olanakları ile yapılan bu sayısallaştırmada, eşyüksekti eğrilerinin özellikle ara eşyüksekti eğrilerinin uygun etiketlenmesi ve bölge içinde yüksekliği bilinen nokta değerlerinin doğru girilmesi oldukça önemlidir. Raster tarama ve vektöre dönüştürme ile ilgili ayrıntılı

Çizelge 1. DTM Doğruluküğü  
Table 1. The DTM Accuracy

Grid Aralığı	Nokta Sayısı	Mın (m)	Max (m)	Ortalama (m)	RMS (m)
1"x1"	88	-5	4	0.06	± 1.60
15"x20"	88	-47	30	-1.90	± 14.14

açıklama Sarbanoğlu (1991)'de verilmekte olup, burada değinilmeyecektir. Sözkonusu dört 1/25 000 ölçekli paftanın sayısallaştırılıp-etiketlenmesi ve kontrolü yaklaşık bir aylık titiz bir çalışma sonunda gerçekleştirilebilmiştir. Elde edilen 1"x1" lik yükseklik matrisinin doğruluğunu denetlemek amacıyla; test bölgesi içindeki UTM grid çizgilerinin kesişim noktalarında yükseklik değerleri paftalar üzerinden interpolate edilmiştir. 1 km x 1 km grid aralıklı bu 88 test noktasının yüksekliği bir de 1"x1" 'lik yükseklik matrisinden biküçük spline fonksiyonları ile hesaplanmıştır. Test noktalarının iki yolla bulunan yükseklikleri arasındaki farklara ilişkin istatistikler Çizelge 1 de gösterilmektedir.

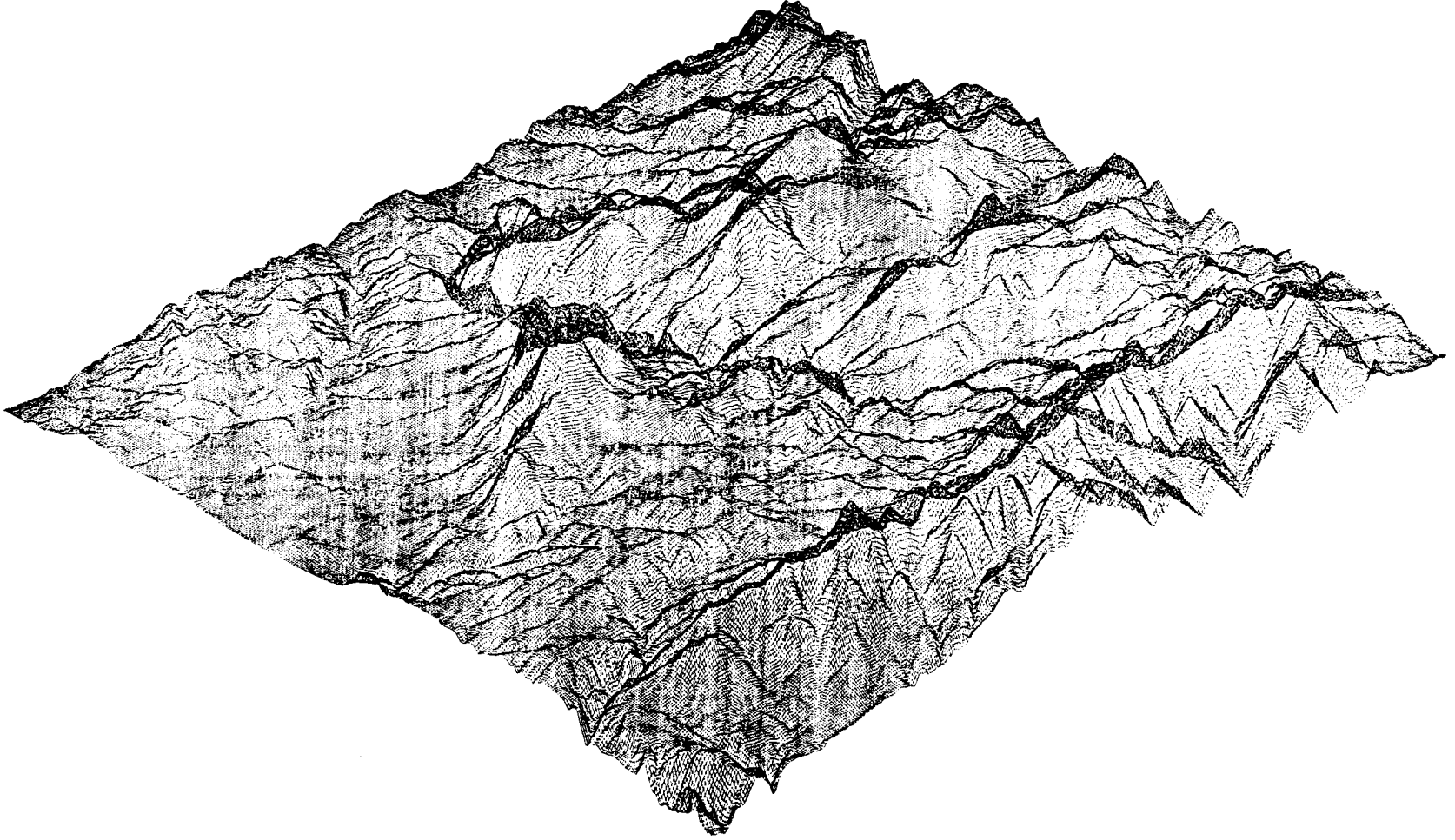
Çizelgeden görüldüğü gibi 1"x1" 'lik DTM'in doğruluğu 1.60 m olarak bulunmuş olup, bu yüksek bir doğruluk olarak değerlendirilebilir.

### 15"x20" DTM

Türkiye Geoidi-1991 (TG-91)'i belirlemek amacıyla  $34^{\circ}30'15'' < \phi < 42^{\circ}30'00''$  ve  $25^{\circ}30' < \lambda < 44^{\circ}59'40''$  ile sınırlı bölgedeki topoğrafya 1/25 000 ölçekli paftalar üzerinden 15"x20" grid köşelerinde yükseklik değerleri insangücü ile okunmuştur. Büyük bir insan grubu (60-100) ile bir yıllık bir zaman aralığında sayısallaştırma ve kontrol işlemleri tamamlanan 15"x20" lik yükseklikler daha sonra Forsberg (1984)'de verilen TC yazılımının giriş kütüğünü oluşturacak biçimde düzenlenmiştir. Proje alanını kuzeyden sınırlayan paralel daire boyunca 20" aralıklı 3510 nokta yüksekliği; hazırlanan kütüğün ilk kaydını oluşturmaktadır. Kuzeyden güneye doğru her 15" aralıklı paralel daire üzerindeki yükseklikler bir kayıta bulunacak biçimde düzenlenen kütükte toplam 1920 kayıt bulunmakta ve disk üzerinde yaklaşık 27 Mbyte yer kaplamaktadır. 15"x20" lik DTM'in doğruluğunu test etmek amacıyla 1"x1" lik DTM'i denetlemek için seçilen 88 noktanın yüksekliği bu kez 15"x20" lik DTM'den interpolate edilmiştir. Test noktalarında bulunan yükseklik farkları ile ilgili istatistik bilgileri Çizelge 1 de verilmektedir. Çizelgeden 15"x20" lik DTM'in yaklaşık ± 15 m doğrulukta olduğu anlaşılmaktadır.

### 5'x5' DTM

15"x20" lik DTM ile aynı bölgede oluşturulan 5'x5' bölmelerin ortalama yükseklikleri, o bölme içine giren 15"x20" grid yüksekliklerinin aritmetik ortalamasıyla hesaplanmıştır. 5'x5' ortalama yükseklikler bölgenin kuzeyinden itibaren batı-doğu yönündeki 234 adet 5'x5' lik ortalama yükseklik birinci kayıta olmak üzere kuzey-güney



Şekil 2. 1"x1" lik DTM'in üç boyutlu görüntüsü.

Fig. 2. Three-dimensional view of a terrain model digitized by 1"x1" grid.

**Çizelge 2. Test bölgesinde topoğrafyanın istatistikleri (metre).**

**Table 2. The statistics of elevation in the test area.**

Bölge Boyutu	En Küçük Yük.	En Büyük Yük.	Ortalama Yük.	RMS
25x20 km	1510	1996	1713	±89

yönünde numaralanan toplam 97 kayıttan oluşan bir kütük biçiminde düzenlenmiş bulunmaktadır.

### SAYISAL UYGULAMA

Dikdörtgen bölme yöntemi ve bir önceki bölümde özellikleri belirtilen DTM'ler ile tc hesabının anlamlılığını ortaya çıkarmak için  $33^{\circ}27' < \phi < 32^{\circ}33'$  ve  $39^{\circ}05' < \lambda < 39^{\circ}11'$  ile sınırlı deneme bölgesinde sayısal uygulama yapılmıştır. Test bölgesi Sivas'ın Kangal ve Alacahan ilçeleri arasında, orman bitki örtüsü olmayan, Sivas J28-c2, Sivas J28-c3, Divriği J39-d1 ve Divriği J39-d4 isimli dört 1/25 000 ölçekli paftanın ortasında 6'x6' (11.1 km x 8.5 km) genişliğindedir. Söz konusu dört paftada topoğrafyanın değişimini göstermek için 1"x1" lik DTM'den belirlenen istatistikler Çizelge 2 de verilmektedir.

Hesap noktasından uzaklaştıkça dikdörtgen bölge-lerin çekim etkisi azaldığından bölmelerin uzaklığına bağlı olarak uygun formül ve yükseklik bilgilerinin kullanılması, böylece beklenen doğruluğu sağlayan tc'nin daha kısa bilgisayar kullanım zamanında hesaplanmasını olanaklı kılmaktadır. Bu amaçla hesap noktası çevresindeki topoğrafya iç, orta ve dış olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır. Söz konusu üç bölgeden özellikle iç bölge, hesaplama yönüyle büyük öneme sahip olup, bu bölgedeki bölmelerin çekim etkisi (2) ile verilen bağıntı belirlenmektedir. Orta ve dış bölgelerde bulunan bölmelerin çekim etkileri ise (2), (5) ve (6) ile verilen tam veya yaklaşık bağıntılardan biri kullanılarak hesaplanır. Bu üç bağıntıdan hangisinin kullanılacağını belirlemek için bölme ağırlık merkezinin hesap noktasından uzaklığı  $\lambda$  ve bölmenin alt, üst yüzeyleri arasındaki diyagonal uzaklık ( $\lambda'$ )'den yararlanarak,

$$\bar{O} = \lambda / \lambda' \quad (7)$$

ile bir ölçüt tanımlanmıştır (Forsberg 1984). Test bölgesindeki uygulamada  $\bar{O}$  için 4 ve 9 sınır değerleri seçilmiş ve bu sınır değerlerine göre bölme çekim etkisinin hangi formülle belirlendiği Çizelge 3'dedir.

**Çizelge 3. Ö ölçütü sınır değerleri**

**Table 3. The limiting values of Ö criterion**

$\bar{O} \leq 16$	$16 < \bar{O} \leq 81$	$81 \leq \bar{O}$
(2)	(5)	(6)

Yükseklik bilgilerinin grid aralığına bağlı olarak iç, orta ve dış bölge dış sınırlarının (sırasıyla R1, R2 ve R3)

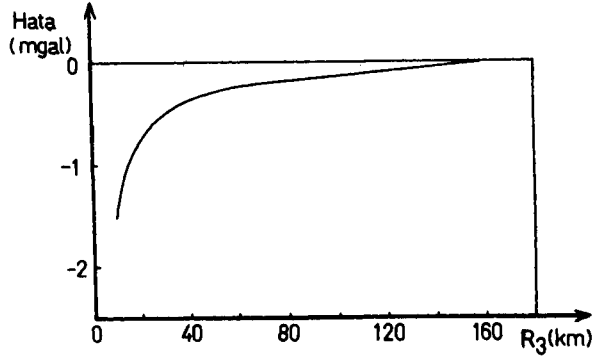
belirlenmesi uygulama açısından önemlidir. İç bölge sınırı R1, orta bölgede kullanılacak DTM grid aralığına bağlı olarak doğrudan belirlenmektedir. Orta bölgedeki grid kü-tüğün (DTM) hesap noktasını içeren en içteki 3x3 toplam dokuz bölmesi iç bölgeyi oluşturur. Orta bölge için 1"x1" yüksekliklerin kullanılması durumunda R1 = 45 m, 15"x20" lik DTM kullanıldığında ise R1 = 675 m dir. Ayrıca iç bölgede hesap noktasından uzaklaştıkça grid aralığı büyümek üzere eş aralıklı olmayan yeni bir grid oluşturulur. Yeni oluşturulan grid köşe noktalarının yükseklikleri, iç bölgeyi oluşturan 3x3 bölmenin 4x4 köşe nokta yüksekliklerinden bikübik spline fonksiyonlar ile interpolate edilir. Ayrıca hesap noktasının interpolasyonla bulunan yüksekliği ile bilinen yüksekliği arasındaki fark ile orantılı olarak iç bölge grid köşe yüksekliklerine düzeltme getirilir ve modellendirilen topoğrafyanın hesap noktasından geçmesi sağlanır. Böylece yakın çevredeki kitlelerden kaynaklanabilecek hatanın en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

Mevcut yükseklik kütüklerinde orta ve dış bölgelerde kullanılabilecek uygun değişik seçenekler belirlenebilir. Uygulamada benimsenen seçeneğe bağlı olarak orta ve dış bölgelerin dış sınırları farklılık gösterdiğinden belirlenmesi ayrıntılı inceleme ve hesaplanmaları gerektirir. Aşağıda önce uygun R3 değerinin belirlenmesi ele alınacak ve daha sonra buna bağlı olarak uygun R2 değerinin ne olduğu aranacaktır.

Dış bölge sınırı R3 değeri için Jeodezi ve Jeofizik'te uygulanan iki temel öneri bilinmektedir. Bunlardan ilki Hayford ve Bowie (1912)'de silindirik bölme ve çizelgeler aracılığı ile tc belirleme yöntemine ait olan 166.7 km'dir. Dolayısıyla tek bir noktada tc hesabı için 330x330 km boyutlu bir bölgede harita üzerinden ortalama yükseklik okuması ve çizelgeler aracılığı ile hesap yapılması gerekmektedir. Bu da yorucu ve zaman alıcı bir çalışma anlamına gelir. İkinci öneri ise yine silindirik bölme ve çizelgeler ile tc hesaplama yönelik olarak Hammer (1939) tarafından önerilen 21.9 km dir. Hammer (1939, 1982)'de verilen silindirik bölme boyutları Hayford-Bowie (1912)'dekilere göre daha küçüktür ve 21.9 km dışında kalan kitle etkilerinin ölçü doğruluğunun altında olduğu varsayılmaktadır. Hammer (1939; 1982)'de önerilen yöntemle bir noktada hesaplama için 40 km x 40 km genişlikli bir bölgede çalışma yeterli olduğundan uygulayıcılar tarafından daha çok benimsenmiştir. Ancak bilgisayarın yer bilimlerinde yaygın kullanılmaya başlanması ve çözünürlüğü yüksek DTM'lerin bilgisayar olanakları ile kısa sürede temin edilmesi sonucu, günümüzde dış bölge sınırının 166.7 km seçilmesi eğilimi artmıştır (Pick 1967, Spenkle 1989, Lafehr 1991). Ölçü ve hesap duyarlılığına uygun dış bölge sınırı R3'ü belirlemek için üç yöntem uygulanabilir.

### Analitik yöntem

Hesap noktasından R3 uzaklığı içinde kalan kitlelerin çekim etkisi bilinen tc hesap yöntemlerinden biri ile he-



Şekil 3. Kesme Hatası.

Fig. 3. Truncation error.

saplanır (Örn. Hammer 1939, 1982) silindirik bölme yöntemi). R3 uzaklığının dışındaki topoğrafyanın etkisi ise o bölgenin en küçük ve en büyük yükseklik değerlerinin fonksiyonu olarak analitik hesaplanır (Danes 1982). Bu yöntem ile 0.1 mgal doğrulukta yerel düzeltmesi belirlemek için R3'ün 19 km alınmasının yeterli olduğu belirtilmektedir (Sprenke 1989).

### Dolaylı yöntem

Hesap bölgesi içinde topoğrafyayı temsil eden bir profil boyunca topoğrafya simülasyonu oluşturulur. R3 166.7 km alınıp deneme noktalarında tc hesaplanır. Daha sonra R3 değeri küçültülerek hesaplama tekrarlanır. Ölçü yöntemi ve amaca uygun R3 değeri dış sınır olarak seçilir (Sprenke 1989). Bu yöntemle A.B.D.'de Cascade dağlarında yapılan bir uygulamada, R3 için 166.7 km yerine daha küçük bir değer almanın yarattığı hatalar (kesme hatası) Şekil 3'deki grafikte gösterilmektedir.

Dolaylı yöntemle 0.1 mgal yerel düzeltmesi belirlemeye uygun dış sınır 130 km olarak verilmektedir (Sprenke 1989).

### Doğrudan (Kesme) Yöntem

Bu yöntemde, dolaylı yöntemden farklı olarak hesap bölgesine ait gerçek DTM kullanılır. Günümüzde bilgisayar olanaklarındaki sıçramalı gelişmeler DTM hazırlanmasını kolaylaştırıp hızlandırmış ve doğrudan yöntemin uygulamada kullanılmasını sağlamıştır.

Dış bölge sınırı için 21.9 km yerine 166.7 km kullanıldığında sağlanacak doğruluğu belirlemek amacıyla doğrudan yöntemle deneme bölgesinde sayısal uygulama yapılmıştır. Bu amaçla Çizelge 4'te verilen uygun DTM ve R1, R2, R3 değerleri ile 1"x1" ve 15"x20" 'lik DTM'lerin doğruluğunu araştırmak üzere deneme bölgesinde seçilen 1 km x 1 km aralıklı toplam 88 noktada yerel düzeltmesi hesaplanmıştır. Çizelgede verilen 3 nolu seçenek doğrudan yöntemdeki hatasız çözüm olarak düşünülüp 1 ve 2 nolu

Çizelge 4. 1 km x 1 km grid köşelerinde yerel düzeltmesi hesabına uygun dış sınır ve DTM.  
Table 4. The appropriate external bound and DTM for the estimation of the terrain correction at the nodes of 1 km x 1 km grid.

No.	R1	R2	R3	DTM	
	(km)	(km)	(km)	Orta Bölge	Dış Bölge
1	0.045	4.0	21.9	1"x1"	15"x15"
2	0.675	-	21.9	-	15"x20"
3	0.675	21.9	166.7	15"x20"	5'x5'

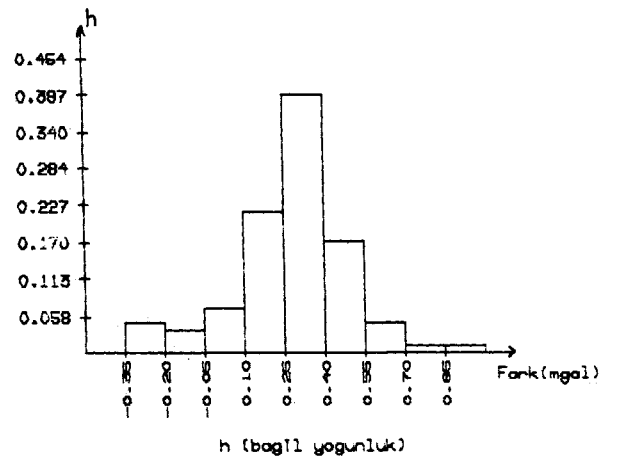
Çizelge 5. Dış bölge etkisi (Kesme hatası) (mgal).

Table 5. The effect of external region (truncation error).

Çözüm	En Küçük	En Büyük	Ortalama	RMS
3-1	-0.3328	0.9459	0.2785	±0.3529
3-2	0.1941	0.7219	0.3493	±0.3622

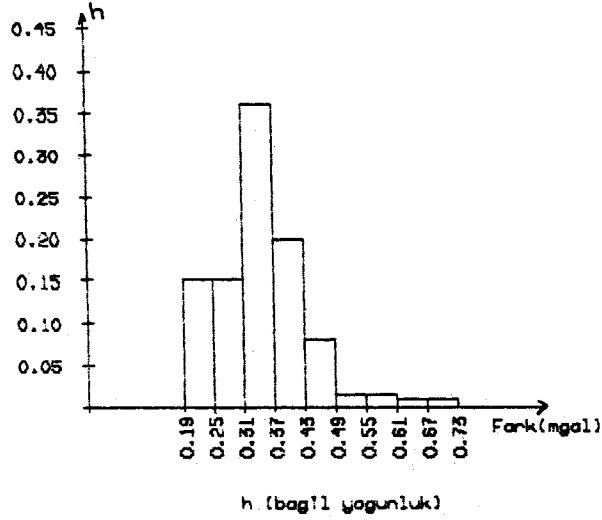
seçeneklerin kesme hataları aranmıştır. Bu amaçla 88 deneme noktasında 3 nolu seçenekle belirlenen tc'nin diğer seçeneklerle bulunan tc'lerden farkları belirlenerek dış bölge etkisini tanımlayan istatistikler Çizelge 5 te gösterilmiştir.

Çizelgeden 21.9 km - 166.7 km arasında kalan bölgeden kaynaklanan kesme hatasının ortalama 0.3 mgal olduğu anlaşılmaktadır. Ayhan ve Kahveci (1991)'de Ankara ve Afyon çevresindeki daha engebeli bölgede yapılan incelemede kesme hatasının 0.19 mgal ile 0.49 mgal olduğu gösterilmiştir. Şekil 4'te verilen grafikten ise 22 km uzun-



Şekil 4. Kesme Hatası (3-1).

Fig. 4. Truncation error (3-1).



Şekil 5. Kesme Hatası (3-2).

Fig. 5. Truncation error (3-2).

luk için kesme hatası 1 mgal bulunmaktadır. Deneme bölgesinde belirlenen kesme hatasının grafikten bulunana göre % 70 küçük olması, bölgelerin topoğrafik yapısından kaynaklanabileceği gibi dolaylı yöntemdeki yaklaşımlardan kaynaklandığı da düşünülmektedir.

Görelî gravite ölçülerinde kullanılan modern gravimetreler ile  $\pm 0.01$  mgal duyarlılıkta ölçü yapılabileceği göz önünde tutulursa, dış bölge sınırının seçiminden kaynaklanan kesme hatasının ölçü duyarlılığının çok üzerinde olduğu ve R3'ün 166.7 km alınması gerektiği sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 5'te istatistik bilgileri verilen farklara ilişkin histogramlar Şekil 4 ve 5'de verilmektedir. Bu histogramların kabaca incelenmesinden farkların genel olarak normal dağılımda olduğu, ancak kesme hatasının 11.1 km x 8.5 km boyutlu bir bölgede bile sabit olmayıp, noktaların ko-

#### Çizelge 7. Orta bölge etkisi.

Table 7. The effect of inner zone.

I nci Çözüm		II nci Çözüm		Farklar	
R2,0(km)	R2,1(km)	R2,0(km)	R2,1(km)	Ortalama (mgal)	RMS (mgal)
3.0	21.9	3.0	0.0	0.4461	$\pm 0.6858$
4.0	21.9	4.0	0.0	0.3495	0.5155
5.5	21.9	4.0	0.0	0.3491	0.5153
5.5	21.9	5.0	0.0	0.2902	0.4131
5.5	21.9	5.5	0.0	0.2739	0.3805

Çizelge 6. 88 Noktada kesme hatası (İç ve Orta Bölgede).

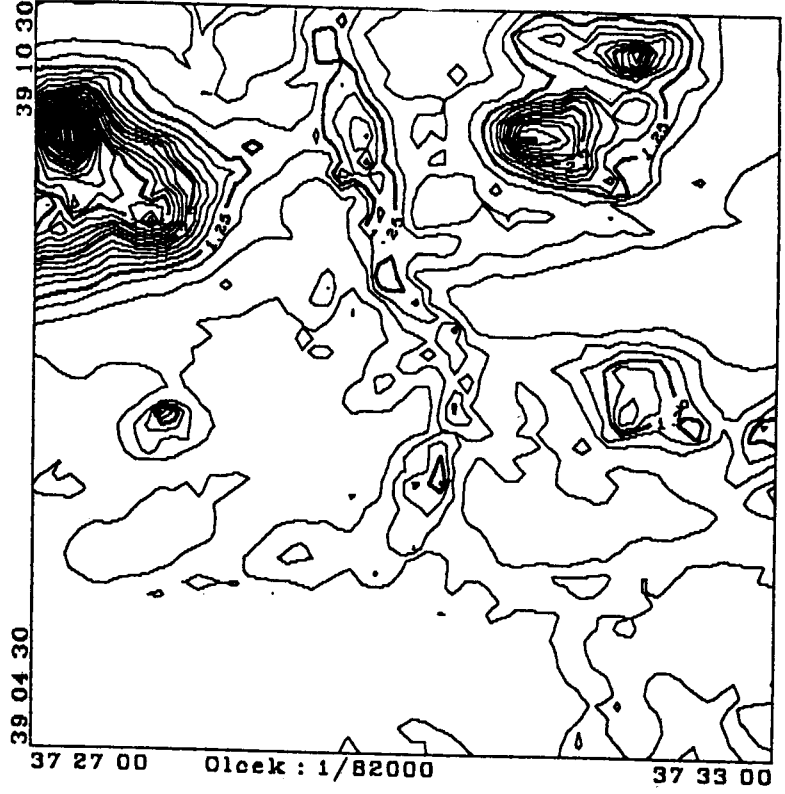
Table 6. Truncation error calculated using 88 stations within innermost and inner zones.

R2,0 (km)	R2,1 (km)	Ortalama (mgal)	RMS (mgal)
0.0	21.9	0.2288	$\pm 0.3812$
0.8	21.9	-0.0110	0.0157
1.5	21.9	-0.0039	0.0058
3.0	21.9	-0.0007	0.0013
4.0	21.9	-0.0003	0.0006
5.0	21.9	-0.0001	0.0002
5.5	21.9	0.0000	0.0000

numuna bağlı olarak değiştiği de görülmektedir. Kesme hatasının yatay konuma bağlı değişim gösterdiğinin belirlenmesi dış bölge sınırının 166.7 alınmasını gerektiren diğer önemli bir neden olarak değerlendirilmektedir.

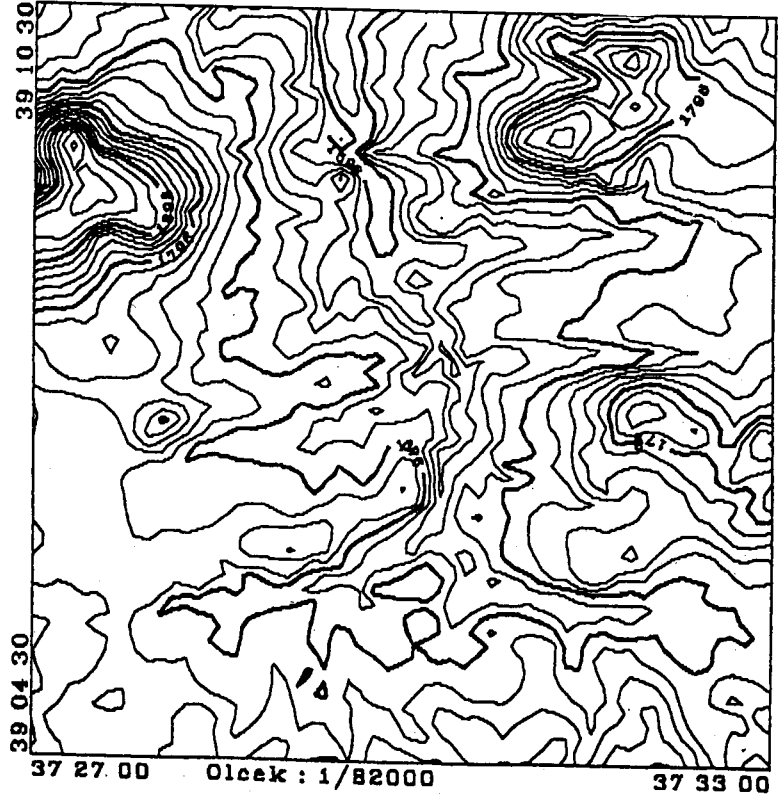
5'x5' ortalama yüksekliklerin kullanıldığı dış bölgenin, iç ve dış sınırları sırasıyla 21.9 km ve 166.7 km seçildiğinde, mevcut 15"x20 ve 1"x1" lik DTM'ler gözönünde bulundurularak hesap noktasından 21.9 km uzaklığa kadar olan topoğrafyanın en iç, iç ve orta olmak üzere üç bölgeye ayrılması uygun olmaktadır. Buradaki en iç bölge daha önce belirtilen iç bölgeye karşılık gelmektedir. Ayrıca daha önce belirtilen orta bölge yerine iç ve orta olmak üzere iki yeni bölge oluşturulmaktadır. Bu durumda en iç bölge genişliği iç bölgede kullanılan DTM grid aralığına bağlı olarak yine aynı değerleri alacak iç ve orta bölgelerin sınırları sırasıyla R2,0 ve R2,1 ile gösterilecektir. İç bölgede 1"x1"

## Ayhan



Şekil 6. Yerey düzeltmesi haritası (mgal).

Fig. 6. The map of terrain correction (mgal).



Şekil 7. Yükseklik (metre).

Fig. 7. Elevations (meter).



ve orta bölgede 15"x20" lik DTM'in kullanılacağı öngörü- lerek uygun R2,0 değeri doğrudan yöntem ile belirlenecek- tir. Bu amaçla R2,0 ve R2,1 için sırasıyla 5.5 km ve 21.9 km değerleri ile hesaplanan tc değerleri hatasız varsayıp R2,0 için değişik değerler seçilerek kesme hatalarının bu- lunması düşünülmüştür. Deneme bölgesindeki 1 km x 1 km aralıklı 88 test noktasından yararlanarak bulunan kesme hataları, Çizelge 6'da sergilenmektedir. Çizelgeden görüldüğü gibi R2,0, 5.5 km alınarak, iç bölgede 1"x1" lik DTM'in kullanılması, belirlenen tc değerinde ortalama +0.23 mgal değişime neden olmaktadır. Mevcut gravite öl- çerlerin ölçü duyarlılığı göz önünde bulundurulduğunda uygun R2,0 değerinin 3.0 km seçilmesinin yeterli olduğu düşünülmektedir.

Orta bölgenin tc hesabındaki çizelge katkısını belir- lemek amacıyla test bölgesinde yine aynı 88 noktada yapı- lan sayısal uygulama sonuçları ise Çizelge 7'de verilmekte- dir. Çizelgeden orta bölge etkisinin iç bölge sınırına bağlı olarak değiştiği ve ortalama etkisinin 0.45 mgal ve daha büyük değerlere ulaşabildiği anlaşılmaktadır.

Bilgisayar olanakları ve insangücü ile sayısallaştırıla- rak hazırlanan DTM'lerin giriş verisi olarak kullanıldığı, ikinci bölümde verilen dikdörtgen bölme tam ve yaklaşık formüllerinin, tc hesabındaki etkinliğini görmek için bir başka yöntemle bulunan değerlerle karşılaştırılması düşü- nülmüştür. Bu amaçla test bölgesi içinde değişik özellikler- deki 19 nokta seçilerek, bu noktalarda tc değerleri Hammer (1939, 1982) çizelge ve silindirik bölmeleri ve hesap nok- tasından 6.7 km uzaklığa kadar insan gücü ile sayısallaştırı- lan yükseklikler ile belirlenmiştir. Aynı noktalarda tc de- ğerleri; iç bölgede 1"x1" orta bölgede 15"x20 lik DTM (dış bölge etkisi gözardı edilmiştir) ve farklı R2,0, R2,1 değere- ri ile dikdörtgen bölme yöntemiyle de hesaplanmıştır. İki farklı yöntem ve değişik seçeneklerle belirlenen tc değere- ri arasındaki farkların ortalama ve RMS değerleri Çizelge 8'de verilmiştir. Çizelgeden R2,0 ve R2,1 için sırasıyla 5.5 km ve 0.0 km alınması durumunda belirlenen tc değere- rinin 6.7 km'ye kadar Hammer (1939, 1982) çizelge ve silin- dirik bölmeleri ile hesaplananlar ile uyumlu bulunduğu gö- rülmektedir. Bu da bu çalışmada uygulanan yöntemin anlamlılığını kanıtlamaktadır.

Deneme bölgesinin topoğrafik yapısı Şekil 7 de gös- terilmektedir. Bölge içinde tc dağılımının topoğrafik yapı ile ilişkisini gösterebilmek amacıyla iç bölgede 1"x1", orta bölgede 15"x20" (dış bölge etkisi gözardı edilmiştir) ve R2,0, R2,1 sırasıyla 4.0 km ve 21.9 km alınarak 6"x6" grid köşelerinde tc hesaplanmış ve bölgenin tc haritası hazırlan- mıştır (Şekil 6). Şekil 6 ve 7 kabaca karşılaştırıldığında aralarında genel yapıları ile bir uyum olduğu açıkça görül- mektedir.

**Çizelge 8. Dikdörtgen Bölme ve Hammer (1939, 1982) Silindirik Bölme Yöntemlerinin Karşılaştırılması.**

**Table 8. A comparison of rectangular block method and cylindrical block method of Hammer (1939, 1982).**

Çözüm No	Dikdörtgen bölme		Fark	
	R2,0(km)	R2,1(km)	Ortalama (mgal)	RMS (mgal)
1	0.8	21.9	0.2918	± 0.3169
2	1.5	21.9	0.2847	0.3091
3	21.9	166.7	0.5093	0.5941
4	0.0	21.9	0.0520	0.2840
5	3.0	21.9	0.2815	0.3015
6	3.0	0.0	-0.1647	0.4728
7	4.0	21.9	0.2811	0.3047
8	4.0	0.0	-0.0683	0.3113
9	5.0	21.9	0.2809	0.3045
10	5.0	0.0	-0.0094	0.2215
11	5.5	21.9	0.2808	0.3044
12	5.5	0.0	0.0069	0.1911

**Çizelge 9. Eniç, iç, orta ve dış bölgeler.**

**Table 9. Central, innermost, inner and external zones.**

Bölge	Dış sınır km	DTM
Eniç	0.045	Değişen grid aralıkta
İç	3.0	1"x1"
Orta	21.9	15"x20"
Dış	166.7	5'x5'

## SONUÇLAR

tc değerlerini tam ve yaklaşık formüller ile dikdört- gen bölme çekim etkisini belirlemeye dayalı olarak hesap- lamak amacıyla, Forsberg (1983)'de verilen TC yazılımı ile Kangal ve Alacahan arasında seçilen deneme bölgesinde sayısal uygulama yapılmıştır. TC yazılımında kullanılmak üzere, Türkiye için daha önce hazırlanan 15"x20" ve 5'x5' lik DTM'lere ek olarak deneme bölgesinin 1"x1" lik DTM'i bilgisayar olanakları ile oluşturulmuştur. 1"x1" ve 15"x20 lik DTM'lerin doğruluklarını belirlemek amacıyla yapılan incelemede 1"x1" lik DTM'in 1.5 - 2 m, 15"x20" lik

DTM'in ise 15-20 m doğrulukta olduğu görülmüştür.

TC yazılımı ile uygulanan dikdörtgen bölme yönteminin etkinliğini belirlemek üzere deneme bölgesi içinde farklı topoğrafik yapıdaki bölgelerde 19 deneme noktası seçilmiştir. Test noktalarında TC yazılımı ile bulunan tc, Hammer (1939, 1982) silindirik bölme yöntemi ve insangücü ile hesaplanan tc değerleri ile karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemle bulunan tc'ler arasındaki farkların ortalama ve RMS değerleri sırasıyla 0.0069 mgal ve  $\pm 0.1914$  mgal bulunmuştur. Bu da farklı DTM'ler ile uygulanan dikdörtgen bölme yönteminin güvenilirliğinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

İç ve dış sınırları 31.9 km ile 166.7 km olan dış bölge ile iç ve dış sınırları 3.0 km, 21.9 km olan orta bölgenin tc hesabına olan katkısı, deneme bölgesinde, ortalama değer olarak sırasıyla 0.3 mgal ve 0.45 mgal bulunmuştur. Diğer bir deyişle orta ve dış bölgelerin tc değerine olan toplam katkısı ortalama 0.75 mgal'dır. Uygulamada kullanılan gravite ölçerlerin duyarlılığı düşünülürse (0.01 mgal), dış bölgeden kaynaklanan etkinin oldukça büyük ve göz önünde bulundurulması gerektiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, deneme bölgesindeki uygulamada, dış bölge etkisinin her noktada sabit olmadığı ve nokta konumuna bağlı olarak değiştiği de belirlenmiştir. Bu incelemeler sonunda tc hesaplamalarının, noktadan 166.7 km uzaklığa kadar topoğrafik kitlelerle yapılmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Test bölgesindeki hesaplarda; hesap noktası çevresi eniç, iç, orta ve dış olmak üzere dört bölgeye ayrılmıştır. Her bölgede kullanılan DTM ve doğrudan değerleri Çizelge 9'da verilmektedir.

tc değeri uygulanan yöntemle de bağlı olarak topoğrafyanın sayısallaştırılmasını ve yoğun hesaplamaları gerektirmektedir. Uygulamada değişik kuruluşların değişik zamanlarda aynı bölgede gravite ölçüsü yaptığı ve ölçü noktalarında farklı yöntemlerle tc hesapladıklarına rastlanmaktadır. Türkiye'de; standart veri ve yöntemle yerey düzeltmeleri belirlenip yerey düzeltme haritası hazırlanmadığından bu ikilemler devam etmektedir. Bu nedenle uygulama ve bilimsel araştırmalarda kullanıma uygun nitelikte yerey düzeltmelerinin standart verilerden ve tek bir yöntemle belirlenmesi ülkemiz açısından önem kazanmaktadır. Bu amaçla aşağıda beş aşamadan oluşan bir çözüm önerisi getirilmektedir.

a. Bilgisayar olanakları ile Türkiye topoğrafyası sayısallaştırılarak 1"x1" lik DTM oluşturulması.

b. Ulusal boyutta belirlenecek grid ağı (Örn. 10"x10") köşe noktalarında yerey düzelmesi hesabı.

c. Grid köşe noktalarında yerey düzeltmelerinin bir veri tabanında düzenlenmesi.

d. Türkiye yerey düzeltme haritasının hazırlanması.

e. Koordinatları verilen ölçü noktalarında; veri tabanından seçilen grid veriden yerey düzeltmesi interpolasyonu.

Yukarıda belirtilen beş aşamadan en önemli ve

büyük ekonomik destek gerektireni Türkiye topoğrafyası ile ilgili DTM'in hazırlanmasıdır. Söz konusu DTM; oluşturulacak bir proje kapsamında ilgili kuruluşların finansal desteği ile hazırlanabilecektir.

## KAYNAKLAR

- Ayhan, E. 1981, Topoğrafik-isostatik çekül saptaması ve isostatik anomali, *Harita Dergisi* 89, 55-84.
- Ayhan, E. ve Kahveci, M. 1991, Gravimetrik yerey düzeltmesinin sayısal arazi modelinden yararlanarak hesabı, *Harita Dergisi* 107, 1-24.
- Ballina Lopez, H.R. 1990, FORTRAN program for automatic terrain correction of gravity measurements, *Computers and Geosciences* 16, 237-244.
- Banerjee, B. and Das Gupta, S.P. 1977, Gravitational attraction of a rectangular parallelepiped, *Geophysics* 42, 1053-1055.
- Bhaskara Dao, D. and Ramesh Babu, N. 1991, A FORTRAN-77 computer program for three-dimensional analysis of gravity anomalies with variable density contrast, *Computer and Geosciences* 17, 655-667.
- Blais, J.A.R. and Ferland, R. 1983, Optimization in Gravimetric terrain corrections, *Can. J. Earth Sci.* 21, 505-515.
- Cogbill, A.H. 1990, Gravity terrain corrections calculated using digital elevation models, *Geophysics* 55, 102-106.
- Danes, Z.I. 1982, An analytic method for the determination of distant terrain corrections, *Geophysics* 47, 1453-1455.
- Forsberg, R. 1984, A study of Terrain Reductions, Density Anomalies and Geophysical Inversion Methods in Gravity Field Modelling, OSU, Dept. of Geod. Sci. and Surv., Rept. No. 335.
- Garcia and Abdeslen, J. 1992, Gravitational attraction of a rectangular prism with depth-dependent density, *Geophysics* 57, 470-473.
- Hammer, S. 1939, Terrain corrections for gravimetric stations, *Geophysics* 4, 184-194.
- Hammer, S. 1982, Critique of terrain corrections for gravity stations, *Geophysics* 47, 839-840.
- Harrison, J.C. and Dickinson, M. 1989, Fourier transform methods in local gravity modelling, *Bull. Geod.* 63, 149-166.
- Hayford, J.F. and Bowie, W. 1912, The effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity, *Coast and Geod. Surv.*, Special Pub. No. 10.
- Heiskanen, W.H. and Moritz, H. 1967, *Physical Geodesy*, Freeman.
- Lafehr, T.R. 1991, Standardization in gravity reduction, *Geophysics* 56, 1170-1178.
- Nagy, D. 1966, The gravitational attraction of a right rectangular prism, *Geophysics* 31, 362-371.
- Nagy, D. 1988, A Short program for three-dimensional gravity modelling, *Acta Geog. Geophy. Mont. Hung.* 23, 449-459.
- Pick, M. 1987, On the calculation of the gravity terrain corrections in Czechoslovakia. *Studia Geophy. et Geod.* 31, 131-144.

- Pick, M. 1988, Gravity topographic correction computed from a square grid of height points. *Studia Geophy. et Geod.* 32, 245-248.
- Sarbanoglu, H. 1991, Coğrafi bilgi sistemleri için veri toplama yöntemleri (2. Bölüm), *Harita Dergisi* 107, 51-81.
- Sideris, M.G. 1984, Computation of Gravimetric Terrain Corrections using Fast Fourier Transform Techniques. University of Calgary, Calgary, Alberta.
- Sprenke, K.F. 1989, Efficient terrain corrections: A geostatistical analysis, *Geophysics* 54, 1622-1628.
- Stacey, R.A., Stephens, J.E. 1970, Procedures for calculating terrain corrections for gravity measurements. *Dominion Observatory, Ottawa, Vol. 39, No. 10.*
- Wichiencharoen, C. 1982, The Indirect Effects on the Computations of Geoid Ondulations. *OSU. Dept. of Geod. Sci. and Surv., Rept. No. 336.*