

TÜRKİYE TEMEL GRAVİTE AĞI-1999 (TTGA-99)
(FUNDAMENTAL GRAVITY NETWORK OF TURKEY-1999)

Coşkun DEMİR, Ali KILIÇOĞLU, Orhan FIRAT
Harita Genel Komutanlığı, Ankara
coskun.demir@hgk.mil.tr

ÖZET

Türkiye Temel Gravite Ağı-1956 (TTGA-56) nokta gravite doğrulukları ($\pm 0.07-0.19$ mGal) jeodezik, jeofizik ve mühendislik amaçlı çalışmalar için yetersiz kaldığından, 1993-1999 yılları arasında gerçekleştirilen çalışmalarla Türkiye Temel Gravite Ağı-1999 (TTGA-99) oluşturulmuştur. TTGA-99, 55 l'inci derece nokta ve 13 mutlak gravite noktası olmak üzere toplam 68 noktadan oluşmaktadır. Bu noktalar arasında 132 gravite bağlantı ölçüsü, Harita Genel Komutanlığı (HGK) ve Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'nden sağlanan iki adet LaCoste & Romberg (LCR) Model G gravimetresi ile aynı anda ve gidiş-dönüş olarak gerçekleştirilmiştir. Gravimetre okumaları, üretici firma tarafından her gravimetre için ayrı ayrı verilen kalibrasyon değerleri ile gravite değerlerine dönüştürülmüş ve bu değerlere gel-git düzeltmesi eklenmiştir. Her gravimetreye ilişkin aynı gündeki ölçüler ayrı ayrı dengelenmiş, drift hesaplanmış ve ölçüler indirgenmiştir. İndirgenmiş ölçüler, 13 mutlak gravite ölçüsü ve her gravimetre için yıllık olarak tanımlanan ölçek bilinmeyenleri dikkate alınarak topluca dengelenmiş ve dengeleme sonucunda l'inci derece nokta gravite değerleri için $\pm 0.0038 - 0.0086$ mGal standart sapma değerleri elde edilmiştir. 17 Ağustos 1999 İzmit ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri sonrasında, deprem bölgesindeki gravite bağlantı ölçüleri 2000 yılında yenilenerek değerlendirilmiş ve sonuçlar deprem öncesi gravite değerleri ile karşılaştırılmıştır; Adapazarı noktasında $+0.0475$ mGal (~ 15 cm çökme), Yığılca mutlak gravite noktasında -0.0406 mGal (~ 13 cm yükselme) gravite değişimi belirlenmiştir.

Anahtar Kelime: Gravite, gravite ağı, drift etkisi, gelgit düzeltmesi, dengeleme.

ABSTRACT

Considering that the accuracies ($\pm 0.07-0.19$ mGal) of Fundamental Gravity Network of Turkey – 1956 (TFGN-56) point gravity values do not meet requirements of geodetic, geophysical, geodynamical and engineering purposes, the Fundamental Gravity Network of Turkey – 1999 (TFGN-99) was established between 1993 and 1999. TFGN-99 consists of 68 stations of which first order and absolute gravity stations are 55 and 13 respectively. 132 gravity connections, between the 55 first order and 13 absolute gravity stations, were measured, in so called go-back way, by two LaCoste & Romberg gravity meters (G-347, G-379) simultaneously, provided by General Command of Mapping (GCM) and General Directorate of Mineral Research and Exploration (MRE). Gravimeter readings were converted to gravity values using manufacturer calibration values, and then tidal corrections were applied. The daily measurements of each gravimeter were adjusted individually and corrected for instrumental drift. All reduced measurements were then adjusted by least squares taking into account the absolute gravity values. The adjustment resulted in standard

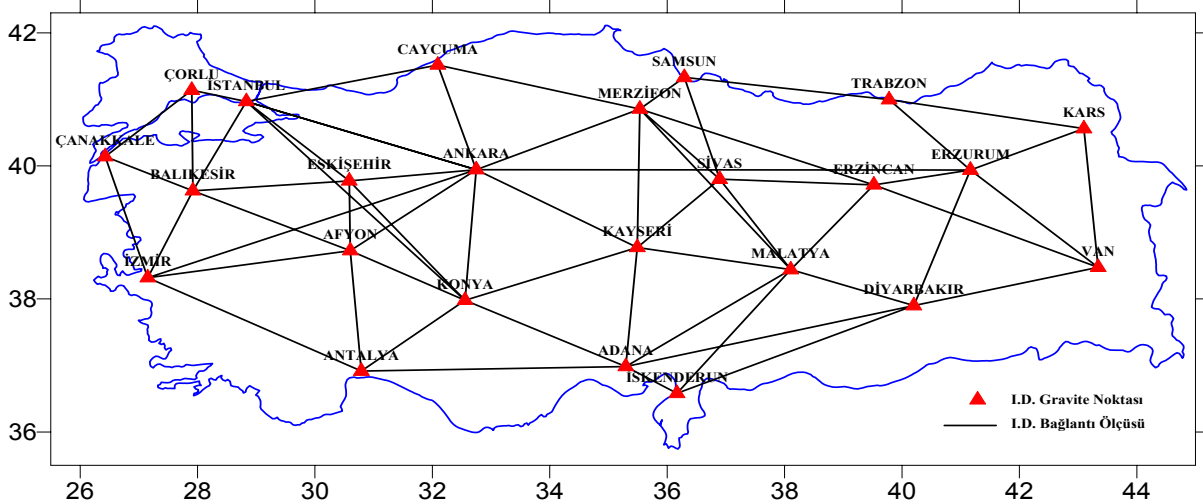
deviations of first order gravity points between $\pm 0.0038 - 0.0086$ mGal, in which annual scale parameters for each gravity meter were also introduced. After 17 August 1999 Izmit and 12 November 1999 earthquakes, TFGN-99 connection measurements in earthquake area were renewed in 2000, and new values were compared to the pre-earthquake gravity values. In this comparison, $+0.0475$ mGal (~ 15 cm. subsidence) and -0.0406 mGal (~ 13 cm. uplift) gravity variations were found in Adapazarı first order gravity point and Yığılca absolute gravity point respectively.

Key words: Gravity, gravity network, rift effect, tide correction, adjustment.

1. GİRİŞ

24 hava alanı noktasından oluşan I'inci derece Gravite Ağı (Türkiye Temel Gravite Ağı-1956) tesis ve ölçüm çalışmaları Harita Genel Komutanlığınca 1956-1958 yıllarında tamamlanmıştır. Şekil-1'de verilen bağlantı ölçüleri, hava yoluyla taşınan iki adet Nörngaard (325 ve 468) gravimetresi ile gerçekleştirilmiştir. TTGA-56'nın datumu, Türkiye-Almanya arasında iki adet Worden gravimetresi ile 1960 yılında yapılan bağlantı ölçüleriyle tanımlanmış ve Ankara noktasının gravite değeri Potsdam mutlak gravite noktasına dayalı olarak Potsdam Datumunda belirlenmiştir. Diğer I'inci derece ve alt dereceli noktaların gravite değerleri de Ankara datum noktasına göre bağlantı ölçülerinden yararlanarak hesaplanmıştır.

Daha sonra Uluslararası Gravite Standardizasyon Ağının (The International Gravity Standardization Net 1971, IGSN-71) oluşturulması kapsamında; Ankara'da seçilen beş adet IGSN-71 noktasında (Esenboğa Havaalanında iki, Güvercinlik, Etimesgut Havaalanları ve Ankara Üniversitesi Fen Fakültesinde birer nokta) gravite ölçümü yapılmış ve bu noktaların IGSN-71 sisteminde gravite değerleri belirlenmiştir (Morelli, C., vd. 1974). IGSN-71'e göre Potsdam gravite datum düzeltmesi (-14 mGal), tüm gravite değerlerine eklenerek "Düzenlenmiş Potsdam Datumu"nda, IGSN-71 datumu ile hemen hemen özdeş, gravite değerleri elde edilmiştir (Ayhan, , vd. 1995a).



Şekil 1. Türkiye Temel Gravite Ağı -1956 (TTGA-56).

TTGA-56 görelî gravite ölçüleri, 1991 yılında yeniden düzenlenmiş ve gravite indirgemeleri yapıldıktan sonra, TTGA-56 Ankara noktasının (14192 numaralı Güvercinlik IGSN-71 noktası) IGSN-71 datumundaki gravite değeri hatasız kabul edilerek yeniden dengelenmiştir. Dengeleme sonucunda nokta gravite değerlerinin doğrulukları 0.07-0.19 mGal arasında bulunmuştur (Ayhan, vd., 1992). Bu doğruluklar, Türkiye'deki jeodezik, jeofizik, jeodinamik ve mühendislik amaçlı güncel gravite çalışmalarına temel oluşturan l'inci derece Gravite Ağı için yeterli düzeyde değildir. Ayrıca TTGA-56 datumu tek nokta ile tanımlandığından, bu datumun doğruluğu kontrol edilememiştir (Ayhan, vd., 1995a; Ayhan, vd., 1995b). Diğer taraftan gravimetreleri kalibre etmek amacıyla 1964 yılında Ankara-Konya kalibrasyon ağı tesis edilmiş ve 1965-1979 yılları arasında kalibrasyon ölçüleri yapılmıştır. Bunun yanı sıra, diğer kurumlar (MTA, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı-TPAO) tarafından kendi amaçlarına yönelik olarak farklı bölgelerde kalibrasyon ağı tesis edilmiş olup, bu ağların yerine geçecek doğruluğu yüksek yeni bir kalibrasyon ağının oluşturulması ihtiyacı doğmuştur.

TTGA-56 ile ilgili yukarıda belirtilen hususlar göz önünde tutularak, 1993-1999 yılları arasında 55 noktalı yeni l'inci derece Gravite Ağı oluşturulmuştur. Ayrıca Ankara ile Konya arasında 10 noktalı Gravite Kalibrasyon Bazı kurulmuş ve 1996 yılında Almanya Kartoğrafya ve Jeodezi Kurumu (BKG) tarafından sağlanan FG5 (101) mutlak gravimetre aleti ile 13 noktada mutlak gravite ölçülmüştür (Wilmes, vd. 1997a; Wilmes, vd., 1997b). 55 l'inci derece ve 13 mutlak gravite noktasından oluşan TTGA-99'da görelî gravite bağlantı ölçüleri, HGK ve MTA'dan sağlanan iki adet LCR Model G (347 ve 379) gravimetresi ile aynı anda ve gidiş-dönüş olarak yapılmıştır. Ankara-Konya kalibrasyon bazının oluşturulması ile ilgili ölçme ve değerlendirme çalışmaları, bu yazının kapsamı dışında tutulmuştur.

İkinci bölümde l'inci derece Gravite Ağına ilişkin ölçülerin indirgenmesi ile ilgili bilgiler verilmekte, üçüncü bölümde ölçülerin değerlendirilmesinde kullanılan dengeleme modeli açıklanmakta ve dördüncü bölümde ise TTGA-99'un oluşturulması açıklanmaktadır.

2. GÖRELİ GRAVİTE ÖLÇÜLERİNİN İNDİRGENMESİ

Gravimetrenin iç yay sisteminde zamana ve taşıma esnasında oluşan sarsıntılara bağlı değişimler (drift), fiziksel koşullar nedeniyle gravitenin zamana bağlı değişimi (gel-git, kutup gezinmesi, yeraltı su seviyesi değişimi) ve dış etkenlerden (manyetik alan, hava basıncı, hava sıcaklığı) kaynaklanan sistematik etkiler nedeniyle görelî gravite ölçülerine düzeltmeler getirilir. Bu düzeltmelerden gel-git, atmosfer basıncı, kutup gezinmesi ve drift düzeltmeleri modellendirilebilir. Ancak ölçme doğruluğu 0.01-0.02 mGal olan LCR model G gravimetre ölçüleri için atmosferik basınç ve kutup gezinmesi düzeltmeleri, 0.003 mGal'den daha küçük kaldığından göz ardı edilmiştir (Torge, 1989).

a. Mikrometre Okumalarının Gravite Değerine Dönüştürülmesi

Mikrometre okumaları, üretici firmanın verdiği dönüşüm değerleri kullanılarak,

$$g = (R + D k) \lambda \quad (1)$$

eşitliği ile gravite değerine dönüştürülür (LaCoste & Romberg (LCR); Sevilla, vd., 1990). Burada; g görelî gravite değeri, R tam mikrometre değeri (100'ün katları) karşılık gelen gravite değeri, D mikrometre okumasının tam değerden olan farkı, k ilgili aralığa ilişkin katsayı ve λ ölçek faktörüdür. Alette ölçek hatası yoksa $\lambda = 1$ alınır.

b. Gel-git düzeltmesi

Gravitenin zamana bağılı değişimi büyük ölçüde Ay ve Güneş'in çekim etkisinden kaynaklanır. Çekim etkisi nedeniyle esnek yapıdaki yerkabuğunda ve gravite alanında deformasyon oluşmaktadır. Konuma bağılı olarak gravitede oluşan bu değişime gel-git etkisi denir. Gel-git düzeltmesi; noktanın konumuna, Ay ve Güneş'in kütleleri ile ölçme anındaki konumlarına bağılı olarak,

$$\Delta g_{ms} = \delta (g_m + g_s) \quad (2)$$

$$g_m = \frac{GM_m r_p}{d_m^3} (3\cos^2\theta + 1) + 1.5 \frac{GM_m r_p}{d_m^4} (5\cos^3\theta + 3\cos\theta) \quad (3)$$

$$g_s = \frac{GM_s r_p}{d_s^3} (3\cos^2\rho + 1) \quad (4)$$

eşitlikleriyle hesaplanır (Ayhan, vd., 1992). Burada; g_m , Ay'ın çekim etkisi, g_s , Güneş'in çekim etkisi, δ , Dünya'nın elastik yapısından kaynaklanan global bir faktör, G Newton çekim sabiti, M_m Ay'ın kütlesi, M_s Güneş'in kütlesi, d_m ve d_s sırasıyla Dünya ile Ay ve Güneş'in merkezleri arasındaki uzaklık, θ Ay'ın merkezselsel zenit açısı, ρ Güneş'in merkezselsel zenit açısı, r_p ise noktanın Dünya'nın merkezinden olan uzaklığıdır.

c. Drift Düzeltmesi

Gravimetrelerin uzun süreli kullanılmasıyla yaylarının özelliğini zamana bağılı olarak yitirmesi, yayda meydana gelen ani sıçramalar ve ulaşımdan kaynaklanan sarsıntılarının sonucu drift oluşur. Bunun yanı sıra, gravimetre sıfır noktasının zamana bağılı değişimi de drift olarak tanımlanabilmektedir. Drift; t zamanındaki mikrometre okuma değeri $z(t)$, bir t_0 başlangıç zamanına göre Taylor serisine açılarak,

$$z(t) = z(t_0) + \sum_{n=1}^N d_n (t - t_0)^n \quad (5)$$

ile modellendirilir (Torge, 1989). Bu eşitlikte $(t-t_0)$ 'ın d_n çarpanları (bilinmeyen) drift katsayıları ve N drift polinomunun derecesidir. İki nokta arasındaki gravite farkları için $z(t_0)$ ortadan kalkar.

3. GRAVİTE ÖLÇÜLERİNİN DENGELENMESİ

Mikrometre okumaları, gravite değerine dönüştürüldükten sonra, gel-git düzeltmesi getirilerek indirgenmiş ölçüler elde edilir. İndirgenmiş ölçüler için fonksiyonel model,

$$\Delta g_{ij} + r_{ij} = -g_i + g_j + \sum_{n=1}^N d_n (-t_i^n + t_j^n) + \sum_{m=1}^M \lambda_m (-lg_i^m + lg_j^m) \quad (6)$$

şeklinde (Boedecker, vd., 1981; Boedecker, vd., 1986; Demirel, vd. 1987; Kubackova, 1986; Morelli, vd., 1974; Sevilla, vd., 1990; Torge, 1989). Burada,

Δg_{ij} : i ve j noktaları arasındaki indirgenmiş gravite farkı ölçüsü,

r_{ij} : Düzeltme,

g_i, g_j : i ve j noktalarının bilinmeyen gravite değerleri,

lg_i, lg_j : i ve j noktalarına ilişkin indirgenmiş gravite ölçüleri,

t_i, t_j : i ve j noktalarında ölçme zamanı,

λ_m : ölçek bilinmeyenleri,

d_n : drift bilinmeyenleri,

N : drift polinomunun derecesi,

M : kalibrasyon polinomunun derecesidir.

Drift bilinmeyenlerinin belirlenebilmesi için aynı noktada tekrarlı ölçüler olmalıdır. Drift bilinmeyenleri her gravimetre ve her ölçü grubu (aynı günde tamamlanan) için ayrı ayrı tanımlanabileceği gibi aynı gravimetreye ilişkin tüm ölçüler için ortak drift parametreleri de tanımlanabilir. (6) eşitliği sadece drift bilinmeyenlerini belirlemek amacıyla da kullanılabilir. Bu durumda eşitliğin sağ tarafındaki ölçekle ilgili terim dikkate alınmaz. Eğer drift bilinmeyenleri ayrı olarak belirlenirse öncelikle ölçülerden driftin etkisi elemine edilir ve ağız dengeleme aşamasında drift etkisinden arındırılmış ölçüler kullanılır. Bu durumda, (6) eşitliğinden drift bilinmeyenlerine ilişkin terimler çıkarılır. (6) eşitliği ile verilen gözlem denklemlerinin ve ölçülerin istatistiksel özelliklerinin matrisiyel ifadesi,

$$\mathbf{r} = \mathbf{A} \delta + \mathbf{w} , \quad \mathbf{C}_r \quad (7)$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{f}(\mathbf{x}^0) - \mathbf{I}^0$$

şeklinde. Burada, n ölçü sayısı ve u bilinmeyen sayısı olmak üzere, $\mathbf{A}_{(n,u)}$ katsayılar matrisi, $\mathbf{r}_{(n,1)}$ düzeltmelerin gerçek değer vektörü, $\delta_{(n,1)}$ bilinmeyenlerin gerçek değer vektörü, $\mathbf{w}_{(n,1)}$ kapanma vektörü, $\mathbf{x}^0_{(u,1)}$ bilinmeyenlerin yaklaşık değer vektörü, $\mathbf{I}^0_{(n,1)}$ ölçü vektörü ve $\mathbf{C}_r_{(n,n)}$ ise ölçülerin varyans-kovaryans matrisidir.

Gravite ağı dengelemesinde datum tanımı için en az bir noktanın gravite değeri bilinmelidir. Birden fazla noktanın gravite değeri biliniyorsa bu noktaların tamamı veya bir kısmı hatasız kabul edilebileceği gibi, noktalar varyanslarına bağlı olarak belirlenen ağırlıkları ile de datum belirlemede kullanılabilir. Gravimetrelerin ölçek bilinmeyenlerinin belirlenebilmesi için en az iki noktanın mutlak gravite değeri veya herhangi iki nokta arasındaki gravite farkı bilinmelidir. Eğer birden fazla gravimetre kullanılmış ise bunların birbirlerine göre ölçek farklılığı belirlenebilir. Mutlak gravite ölçüleri ile elde edilen veya önceden bilinen mutlak gravite değerlerine ilişkin \mathbf{x}^0 vektörü ve ilgili varyans kovaryans matrisi $\mathbf{C}_{\mathbf{x}^0}$ olarak gösterilirse, en küçük kareler yöntemine göre çözüm,

$$\phi = \mathbf{r}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{r} + \hat{\delta}^T \mathbf{C}_{\mathbf{x}^0}^{-1} \hat{\delta} \Rightarrow \min. \quad (8)$$

ilkesiyle gerçekleştirilir. Çözüm eşitlikleri;

$$\hat{\delta} = -(\mathbf{C}_{\mathbf{x}^0}^{-1} + \mathbf{N})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{w}, \quad \mathbf{N} = (\mathbf{A}^T \mathbf{C}_r^{-1} \mathbf{A}) \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^0 + \hat{\delta}, \quad \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{C}_{\mathbf{x}^0}^{-1} + \mathbf{N})^{-1} \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{A} \hat{\delta} + \mathbf{w}, \quad \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{r}}} = \mathbf{C}_r - \mathbf{A} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A} \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l}^0 + \hat{\mathbf{r}}, \quad \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{l}}} = \mathbf{A} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{r}}^T \mathbf{C}_r^{-1} \hat{\mathbf{r}} + \hat{\delta}^T \mathbf{C}_{\mathbf{x}^0}^{-1} \hat{\delta}}{n - u + u_b} \quad (13)$$

şeklinde (Koch, 1983; Mikhail, vd., 1976; Torun, 1997). (9)-(13) eşitliklerinde geçen ($\hat{\cdot}$) işareti ilgili değişkenlerin tahmin değerlerini temsil etmektedir. (13) eşitliğinde verilen $\hat{\sigma}_0^2$ dengeleme sonrası varyans faktörü olup, u_b mutlak gravite değeri bilinen nokta sayısıdır. Dengeleme öncesinde gravite değeri bilinmeyen noktalar için ölçülerden yararlı yaklaşık gravite değerleri hesaplanır ve bu noktalar için $\mathbf{C}_{\mathbf{x}^0}$ matrisinde ilgili köşegen elemanı (varyanslar) çok büyük tanımlanır (örneğin=100 mGal²).

4. TÜRKİYE TEMEL GRAVİTE AĞI-1999 (TTGA-99)

a. Göreli Gravite Ölçüleri

TTGA-99'un oluşturulmasına yönelik çalışmalar 1993 yılında başlatılmıştır. Bu kapsamda; 1993, 1995 ve 1997 yıllarında keşif çalışmaları ve bu yılları izleyen bir sonraki yıllarda (1994, 1996 ve 1998) ve 1999 yılında inşaat ve ölçü çalışmaları yapılmıştır. TTGA-56; 1956-1957 yıllarında kurulmuş olup, noktalarda yer işareti

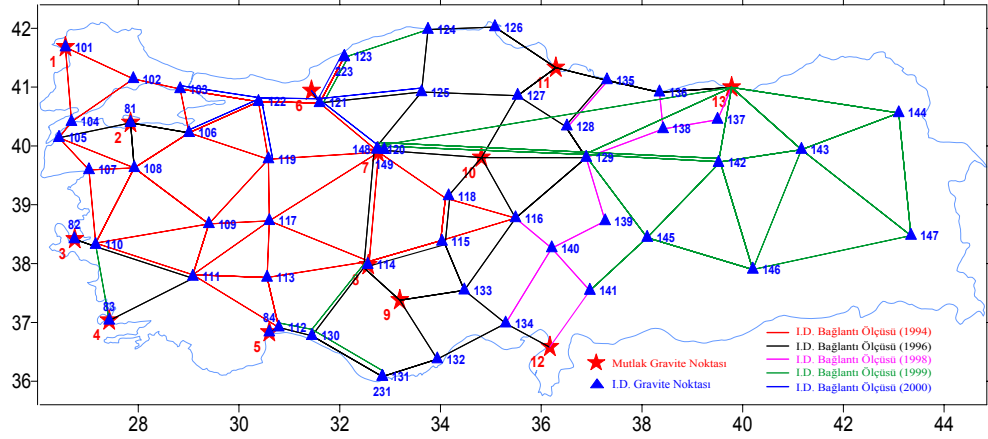
olmadığından ve aradan geçen yaklaşık 40 yıl içerisinde noktaların bulunduğu binalardaki değişiklik ve binaların ortadan kaldırılması vb. nedenlerle, ağ noktalarının önemli bir bölümü tahrip olmuştur. Arazi incelemesi sırasında eski noktanın bulunduğu bina uygun görülürse yeni nokta olabildiğince aynı yerde seçilmiş, binanın bulunmadığı ya da uzun süreli olarak kullanımda kalmayacağı yönünde bilgi alındığı durumda ise yeni nokta seçimi ve tesisi yapılmıştır (Ayhan, vd., 1995b).

TTGA-99 ölçüleri, gidiş-dönüş ölçü planında, HGK ve MTA tarafından sağlanan LCR G379 ve G347 gravimetreleri ile gerçekleştirilmiştir. TTGA-99'un batı bölümünde ölçüler karayolundan yapılmış olup, noktalar arasındaki gidiş-dönüş ölçümlerinin aynı gün içinde tamamlanabilmesi için hava alanı noktaları arasında ek noktalar tesis edilmiştir. Her ölçme döneminde; dönem öncesi ve sonrasında gravimetreler ile Ankara-Konya Gravimetre Kalibrasyon Bazı'nda ölçümler yapılmıştır.

1993 yılında Batı Anadolu'da 13 adet l'inci derece nokta seçilmiştir. 1994 yılında, bu noktalara ilave olarak aynı bölgede 10 nokta daha seçilmiş ve toplam 23 nokta arasında 41 bağlantı ölçümü yapılmıştır (Ayhan, vd., 1995b; Demirel, vd., 1994; Demirel, vd., 1995). 23 noktaya ek olarak 1996 yılında, 13 mutlak gravite noktası ve 17 l'inci derece noktası (4'ü mareograf istasyonlarında mutlak gravite noktaları yakınında) tesis edilmiş, l'inci derece ve mutlak gravite noktaları arasında 46 bağlantı ölçüsü yapılmıştır (Ayhan, vd., 1998; Torun, 1997). Ağ doğu yönünde genişletmek amacıyla, 1998 yılında 5 nokta daha ilave edilmiş ve 11 bağlantı ölçüsü yapılmıştır. Sözü edilen bu ölçülerin tümü karayolu kullanılarak yapılmıştır. 1999 yılında ise ağın doğusunda, 6 adet l'inci derece nokta havaalanlarında seçilmiş, bu noktalar ve ağdaki diğer noktalar arasındaki 18 bağlantı ölçüsü havayolu ile yapılmıştır. Ayrıca, 1999 yılında; tahrip olduğu belirlenen Çaycuma noktası (123) yerine yeni bir nokta (223) tesis edilmiş, Anamur'daki noktanın (131) zemininin iyi olmaması nedeniyle, ikinci bir nokta (231) tesis edilmiş ve bu noktalara ilişkin 5 adet ve İzmir bölgesinde 1 adet olmak üzere toplam 6 bağlantı ölçüsü karayolundan yapılmıştır. 1994 yılında mikrometre ve zaman okumaları yapılmıştır. Sonraki yıllarda bunlara ek olarak sıcaklık, basınç ve alet yüksekliği de ölçülmüştür.

1999 yılında meydana gelen Marmara depremlerinin etkilediği bölgede bulunan Adapazarı ve Bolu'daki l'inci derece Gravite Ağ noktalarında oluşan değişimleri belirlemek amacıyla, 2000 yılında bu noktalara ilişkin 8 bağlantı ölçüsü yenilenmiştir. Ayrıca KKTC Temel Gravite Ağının oluşturulması kapsamında, 2001 yılında Ankara'da tesis edilen 2 adet l'inci derece nokta ile Ankara mutlak gravite noktası arasında bağlantı ölçüsü yapılmıştır (Kılıçoğlu, vd., 2002).

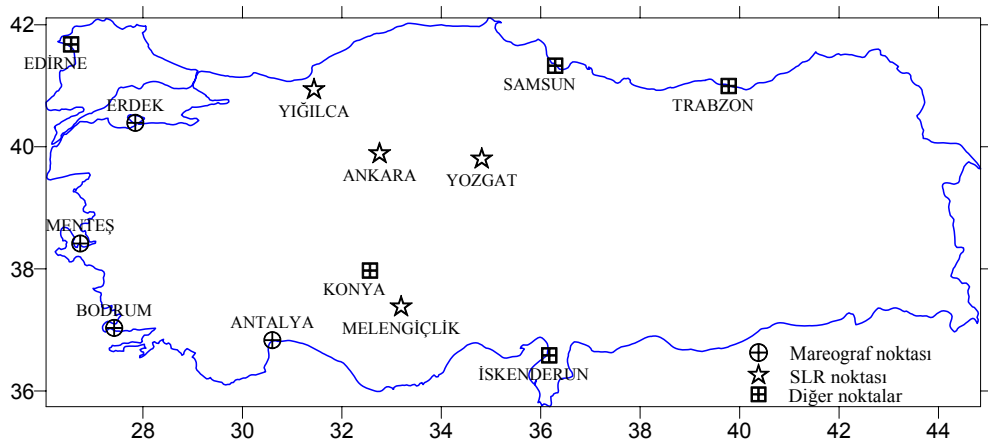
Özet olarak, 1993-2001 yılları arasında yapılan çalışmalar sonucunda; toplam 55 l'inci derece nokta, 13 mutlak gravite noktası ve bu noktalar arasındaki 132 bağlantı ölçüsü ile TTGA-99 oluşturulmuştur (Şekil 2). TTGA-99'un oluşturulması kapsamında; arazi öncesi çalışma, nokta seçimi ve tesisi, bağlantı ölçüleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler (Ayhan, vd., 1995b)'de verilmektedir.



Şekil 2. Türkiye Temel Gravite Ağı-1999 (TTGA-99).

b. Mutlak Gravite Ölçüleri

HGK ile BKG ortak çalışmaları kapsamında, Türkiye'de gravite datumunu ve zamana bağlı değişimini belirlemek amacıyla FG5 (101) mutlak gravimetresi ile 13 noktada ölçüm yapılmıştır. Keşif ve inşaatı 1995 yılında tamamlanan bu noktalardan 4'ü SLR (Uydu Lazer Ölçme), 4'ü mareograf, 2'si gravite kalibrasyon baz (biri aynı zamanda SLR) ve 4'ü I'inci Derece Gravite Ağı noktasıdır (Şekil-3). Mutlak gravite ölçüleri 6 Ağustos - 4 Ekim 1996 tarihleri arasında yapılmış olup nokta yerlerinin seçiminde uygulanan ölçütler ve seçim çalışmaları, mutlak gravite ölçü ve değerlendirilmesi konuları ayrıntılı olarak (Wilmes, vd., 1997a; Wilmes, vd., 1997b)'de verilmektedir. Mutlak gravite ölçülerinin dengelenmesi sonucunda elde edilen nokta gravite standart sapmaları; İskenderun noktasında 16.5 μGal , diğer noktalarda ise 1.1 μGal ile 7.7 μGal arasında değişmektedir. Buna göre mutlak gravite ölçüleri, Türkiye'nin mevcut gravite datumunun geliştirilmesi yanında düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesinde de başlangıç periyodu (epoğu) olarak kullanılabilir niteliktedir.



Şekil 3. Mutlak Gravite Noktaları.

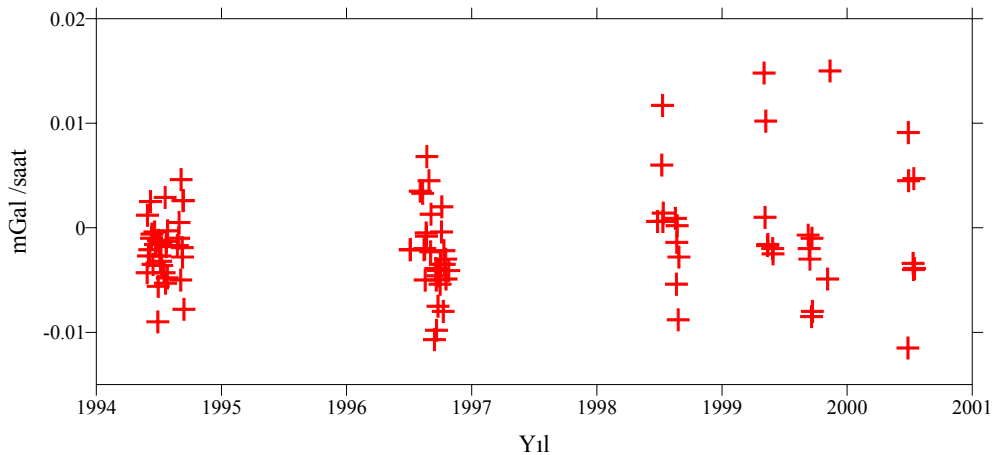
c. Hesaplamalar

Gravimetre okumaları, üretici firma tarafından sağlanan kalibrasyon katsayıları (k ve λ), (1) eşitliğinde kullanılarak gravite değerine dönüştürülmüş ve (2) - (4) eşitlikleriyle gel-git düzeltmeleri getirilerek indirgenmiş gravite değerleri elde edilmiştir. Bu amaçla GRAVSOF (Tscherning, vd., 1994) yazılım paketinin "grredu.f" gravite indirgeme programı kullanılmıştır. Daha sonra drift parametrelerini hesaplamak için her bir gravimetreye ilişkin günlük ölçüler, bağımsız gruplar biçiminde ele alınmış, ağırlıkları eşit kabul edilerek (6) eşitliği ile verilen fonksiyonel modeline göre başlangıç noktasına dayalı olarak dengelenmiş, uyuşumsuz ölçüler ayıklanmış ve drift parametreleri hesaplanmıştır. Drift parametrelerinin anlamlı olup olmadığı %90 güven düzeyi öngörülerek t-testi ile irdelenmiştir (Koch, 1983). Drift parametresinin anlamlı bulunması durumunda ölçülere drift düzeltmesi getirilmiştir. Anlamsız drift parametreleri "sıfır" kabul edilmiş ve bu durumda ölçülere düzeltme getirilmemiştir. Drift düzeltmesi amacıyla MATLAB'de hazırlanan "drift.m" programı kullanılmıştır (Demir, vd., 2005).

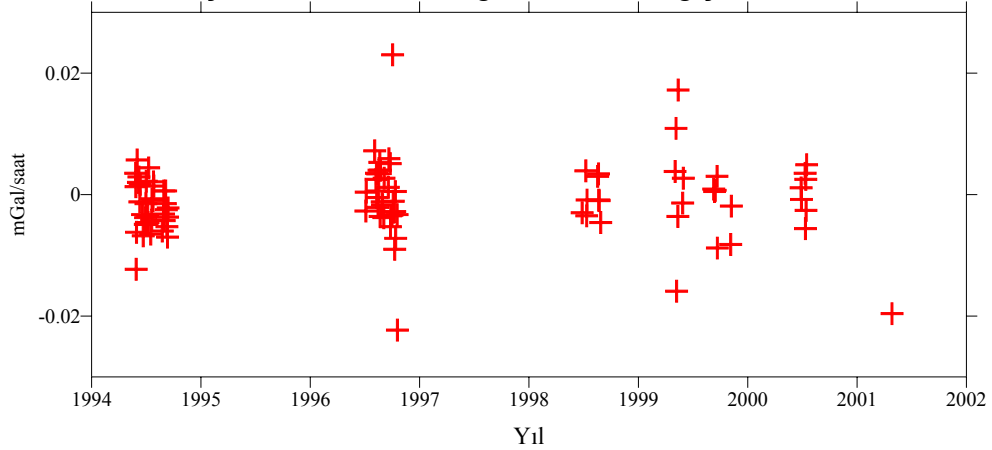
LCR G347 ve LCR G379 gravimetrelerine ilişkin günlük ölçülerin gruplar biçiminde değerlendirilmesi sonucunda hesaplanan günlük drift parametreleri ile ilgili istatistikler Tablo-1'de ve günlük drift değişimleri ise Şekil 4 ve 5'de gösterilmiştir. Hesaplanan drift parametrelerinin %81'i anlamlı, %19'u ise anlamsızdır. Şekil 4 ve 5 incelendiğinde, farklı aletlerin farklı günlerdeki drift parametrelerinin, farklı işaretli değişik değerler aldığı görülmektedir. Bu drift değerlerinin ortalaması, (Torge, 1989)'da LCR tipi gravimetreler için verilen drift değerleri ile uyumlu olmasına karşılık, drift parametrelerinin günden güne değişmesi ve belirgin bir sistematığının olmaması, personel, ölçü, taşıma vb. nedenlerden kaynaklanan sistematik hataların drifti etkilediği biçiminde yorumlanabilir.

Tablo 1. Gravimetrelerin drift parametreleri ile ilgili istatistikler.

Gravimetre No	Toplam Grup Sayısı	Anlamlı Drift Sayısı	Drift Parametresi (mGal/saat)			
			Min	Max	Ort.	St.Sapma
LCR G347	120	98	-0.0011	-0.0150	-0.0014	0.0048
LCR G379	122	99	-0.0022	-0.0230	-0.0010	0.0060



Şekil 4. LCR G347 günlük drift değişimi.



Şekil 5. LCR G379 günlük drift değişimi.

LCR G347 ve G379 numaralı gravimetrelere ilişkin iki ölçü grubunun bağımsız dengelenmesi sonucunda belirlenen drift parametreleri göz önüne alınarak ölçüler düzeltilmiştir. Drift nedeniyle indirgenmiş bu ölçü grupları için zorlamasız tanı dengelemeleri uygulanarak (Kavouras, 1982; Koch, 1983)'de verilen testler yardımıyla uyuşumsuz ölçüler belirlenmiş ve önsel (apriori) varyanslar kestirilmiştir. Tanı dengelemelerinde bir gravimetreye ilişkin tüm ölçüler eşit ağırlıklı kabul edilmiş, her iki gravimetre için yıllık bazda farklı ölçek parametresi tanımlanmıştır. Tanı dengelemelerine ilişkin istatistikler Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Tanı dengelemesi istatistikleri.

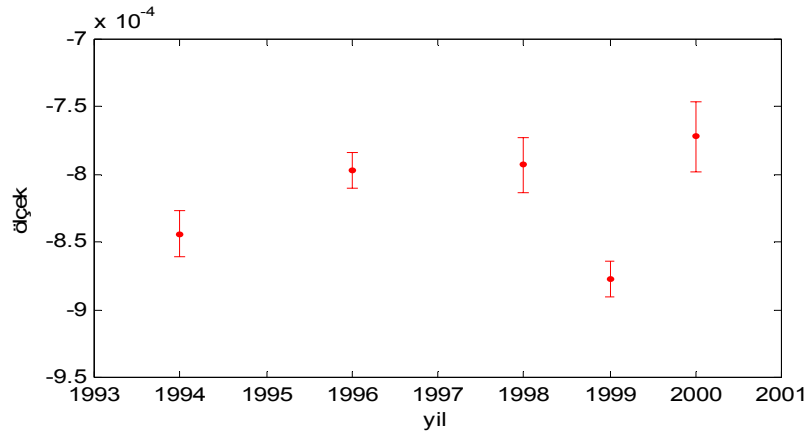
Gravimetre	Ölçü Sayısı (Okumalar)	Uyuşumsuz Ölçü Sayısı	Sonsal (aposteriori) st.sapma (mGal)
LCR G347	1029	20	± 0.0126
LCR G379	1033	22	± 0.0142

Her iki gravimetreye ilişkin ölçüler, içindeki uyuşumsuz olanlar ayıklandıktan sonra mutlak gravite ölçüleri ile birlikte topluca dengelenerek TTGA-99 oluşturulmuştur. Bu dengelemede, görelî gravite ölçülerinin önsel standart sapmaları için tanı dengelemeleriyle bulunan ve Tablo 2'de verilen değerler alınmıştır. Daha sonra istatistiksel modelin iyileştirilmesi amacıyla LCR G379'a ilişkin ölçülerin standart sapması 1.152 sayısı ile ölçeklendirilmiştir. Mutlak gravite ölçüleri için önce mutlak gravite ölçülerinin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen standart sapma değerleri kullanılmış, daha sonra mutlak gravite değerlerinin dengeleme sonucunda değişmemesi için standart sapmaları ± 0.001 mGal kabul edilmiştir. Görelî gravimetrelere ilişkin ölçek parametresinde yıldan yıla değişim olup olmadığını belirlemek amacıyla her gravimetre için yıllık olarak farklı ölçek parametresi tanımlanmıştır. TTGA-99 dengelemesi için MATLAB dilinde hazırlanan "deng_grav.m" programı kullanılmıştır (Demir, vd. 2005).

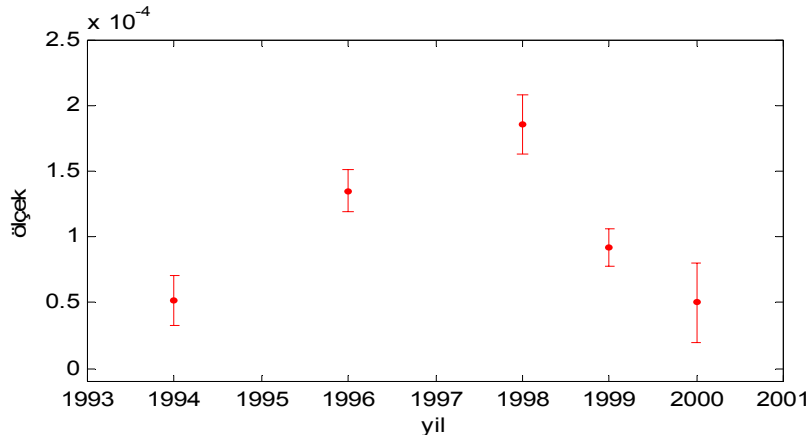
1996 yılında, Edirne mutlak gravite noktasında ölçüler gerçekleştirilirken, bu nokta ile 101 numaralı l'inci derece nokta (Edirne) arasındaki bağlantı ölçüsü BKG tarafından sağlanan LCR G563 gravimetresi ile yapılmıştır. Sözü edilen gravimetre ile voltaj farkı ölçülmekte olup bu ölçü de diğer görelî gravite ölçüleri ile birlikte

değerlendirilerek 001-101 arasındaki gravite farkı 0.152 mGal bulunmuştur. Bu gravite farkı ölçüsü ile birlikte Marmara bölgesinde 1999 yılında meydana gelen İzmit ve Düzce depremleri sonrasında, 2000 yılında gerçekleştirilen ölçüler de bu dengelemeye dahil edilmiştir. Ancak, depremler sonrasında değiştiği varsayılan 006 (Yığılca Mutlak), 121 (Bolu) ve 122 (Adapazarı) noktalarındaki ölçüler için sırasıyla 506, 521 ve 522 numaraları öngörülmüş, böylece bu noktalarda depremler nedeniyle olası gravite değişimlerinin de belirlenmesi amaçlanmıştır.

Mutlak ve görelî gravite ölçülerinin topluca dengelenmesi sonucunda, her iki gravimetrenin mutlak gravite değerlerine göre hesaplanan yıllık ölçek bilinmeyenleri ve standart sapmaları ve yıllara göre ölçek değişimi grafik olarak Şekil-6 ve 7'de gösterilmektedir. Ölçek değişimi için (6) eşitliğinde verilen fonksiyonel model göz önünde bulundurulmalıdır. Bu eşitlikte, ölçek ile ilgili terim, eşitliğin sağ tarafında bulunduğundan, görelî gravimetrelere ilişkin ölçülerin ölçek nedeniyle düzeltilmesi için Şekil-6 ve 7'de verilen ölçek parametreleri ters işaretli olarak hesaba katılmalıdır. Her iki gravimetrenin yıllara göre ölçekleri ve değişimleri incelendiğinde; G347 numaralı gravimetre ölçeğinin (ort.: $-0.813 \cdot 10^{-3}$, st.sapması: $0.039 \cdot 10^{-3}$), G379'un ölçeğinden (ort.: $-0.102 \cdot 10^{-3}$, st.sapması: $0.059 \cdot 10^{-3}$) daha büyük, ancak değişiminin küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 6. LCR G347 gravimetresinin ölçek değişimi. Hata çizgileri 1 σ düzeyindedir.



Şekil 7. LCR G379 gravimetresinin ölçek değişimi Hata çizgileri 1 σ düzeyindedir.

TTGA-99 dengelemesi sonucunda, nokta gravite değerlerinin standart sapmaları $\pm 0.0028-0.0092$ mGal arasında bulunmuş olup ortalaması ± 0.0055 mGal dir. Bu sonuçlar eski ağ (TTGA-56) için hesaplanan $\pm 0.07 - 0.16$ mGal değerleriyle karşılaştırıldığında, önemli bir doğruluk artışı sağlandığı görülmektedir.

Diğer taraftan, 17 Ağustos 1999 İzmit ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri sonrasında, bağlantı ölçüleri yenilenen TTGA-99 gravite noktalarında, deprem öncesi ve deprem sonrası nokta gravite değerlerinden yararlanarak (gravite farkı -0.00308 mGal/cm ile bölünerek) yükseklik değişimleri hesaplanmıştır (Tablo-3). Ayrıca tekrarlı GPS ölçüleri yardımıyla (Reilinger, vd., 2000; Ayhan, vd., 2001)'de geliştirilen model fay parametreleri kullanılarak, (Aktuğ, 2003)'de verilen dislokasyon modeline uygun yazılım ile düşey yer değiştirmeler hesaplanmış ve Tablo-3'te verilmiştir. Tablo-3 incelendiğinde, gravite ve GPS ölçüleri ile bulunan yükseklik değişimlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Deprem öncesi ve sonrası gravite değerlerinin karşılaştırılması.

Nokta	Gravite Değişimi (mGal)	Gravite ölçüsü ile bulunan yükseklik değişimi (cm)	Dislokasyon modeli (cm)
Yığılca	-0.0406	13.2	12.8
Adapazarı	0.0475	-15.4	-11.8
Bolu	-0.0017	0.6	5.0

5. SONUÇLAR

TTGA-56 nokta gravite değerleri standart sapmalarının ($\pm 0.07-0.16$ mGal) jeodezik, jeofizik ve jeodinamik çalışmalarda gereksinimler için yeterli düzeyde olmadığı göz önünde tutularak, 1993-2001 yılları arasında yapılan çalışmalarla TTGA-99 oluşturulmuştur. TTGA-99, 55 l'inci derece ve 13 mutlak gravite noktası olmak üzere toplam 68 noktadan oluşmaktadır.

TTGA-99 noktaları arasındaki 132 bağlantı ölçüsü, HGK ve MTA'dan sağlanan iki LCR-G gravimetresi ile aynı anda ve gidiş-dönüş ölçü planına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçülere gel-git düzeltmesi getirildikten sonra, gravimetrelere ilişkin günlük ölçüler gruplar halinde bağımsız olarak dengelenmiş, drift hesaplanmış ve ölçüler indirgenmiştir. İndirgenmiş ölçüler, mutlak gravite değerleri ile birlikte dengelenerek l'inci derece nokta gravite değerleri ve standart sapmaları elde edilmiştir. l'inci derece nokta gravite değerlerinin standart sapmaları $\pm 0.0028 - 0.0092$ mGal arasında bulunmuştur.

IGSN-71 datumunu oluşturma kapsamında Ankara'da seçilen dört noktada görel gravite ölçümü yapılmıştır (Morelli, vd. 1974). Bu dört noktadan biri aynı zamanda TTGA-99'un 120 numaralı Ankara noktasıdır. Bu noktanın IGSN-71 ve TTGA-99 gravite değerleri arasındaki fark 0.0033 mGal bulunmuştur. Bu sonuç TTGA-99 ile IGSN-71'in datumlarının bu bölgede özdeş olarak kabul edilebileceğini göstermektedir.

17 Ağustos 1999 İzmit ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri sonrasında, deprem bölgesindeki TTGA-99 gravite bağlantı ölçüleri 2000 yılında yenilenerek ağınc güncelleştirilmesi sağlanmış, bununla birlikte deprem öncesi ve deprem sonrası gravite değerleri karşılaştırılarak bölgedeki yükseklik değişimi ile ilgili bilgi üretilmiştir. Bu sonuç, büyük depremlerin, yanal atılımlı faylar boyunca olsa bile, gravite değerlerinde önemli değişimler oluşturduğunu göstermektedir.

TTGA-99'un oluşturulması amacıyla bağlantı ölçüleri yapılırken, I'inci derece noktalarla II'nci derece noktalar arasında da bağlantı ölçüleri yapılmıştır. TTGA-99 ile doğruluğu yüksek bir ağ oluşturulmuştur. Bu doğruluğun alt derecedeki gravite değerlerine yansıtılması için II'nci derece gravite ağının (Ayhan, M.E., vd. 1993)'de verilen modeller göz önünde tutularak I'inci derece ağa dayalı olarak dengelenmesi, daha sonra da sıklaştırma gravite ağlarının II'nci derece ağa dayalı olarak doğruluklarının artırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Aktuğ, B., 2003, Elastik Yarı Uzay Modelleri ve Depremsel Koordinat Değişimlerine Dinamik Bir Yaklaşım, *Harita Dergisi*, **sayı 129**, s. 1-16.

Ayhan, M.E., Demir C., Çağlar Y., 1998, Türkiye Ulusal Gravite Ağının İyileştirilmesi Projesi, İç Rapor No: JEOF 98-2, HGK Jeodezi Dairesi, Ankara, ss. 25.

Ayhan, M.E., Demir, C., Torun, A., 1995b, Yeni Ulusal Birinci Derece Gravite Ağının Tanıtılması, TUJJB Bilimsel Kongresi, 2-5 Mayıs, Ankara, s. 268-279.

Ayhan, M.E., Demir, C., Torun, A. 1995a, IGSN-71 noktaları ile TTGA-56 Ankara Noktası Arasında Yapılan Gravite Bağlantı Ölçülerinin Dengelenmesi. İç Rapor No: JEOF 95-5, HGK Jeodezi Dairesi, Ankara, ss. 24.

Ayhan, M.E., Demir, C., Torun, A., 1993, Türkiye Ulusal Gravite Ağının İyileştirilmesi Projesi İç Rapor No: JEOF 93-2, HGK Jeodezi Dairesi, Ankara, ss. 28.

Ayhan, M.E., Demir, C., Alas, B., 1992, Türkiye Temel Gravite Ağı 1956 (TTGA-56)'nın Yeniden Dengelenmesi, *Harita Dergisi*, **sayı 108**, s. 43-58.

Ayhan, M. E., Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Aktuğ, B., Herece, E., Reilinger R.E., 1981, Kinematics of the Mw 7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 367-370.

Boedecker, G., I. Marson, C. Poitevin, G.S. van Hees (1986), Unified European Gravity Network (UEGN) Status Report, Bulletin D'Information 59, s. 133-143, BGI.

Boedecker, G., B. Richter 1981, The New Gravity Base Net 1976 of The Republic of Germany (DSGN76), *Bull. Geod.* **55**, s. 250-266.

Demir, C, Kılıçoğlu, A., Fırat, O., 2005, Türkiye Temel Gravite Ağı 1999 (TTGA-99), İç Rapor No: JEOF-2005-2, HGK Jeodezi Dairesi, Ankara.

Demirel, H., Ayhan, M.E., Demir, C., Torun, A., 1995, 1990-1994 Yıllarında.Türkiye'deki Jeodezik, Jeodinamik ve Mühendislik Amaçlı Gravite Çalışmaları, 5. Harita Kurultay Kitabı, s. 279-286, Ankara.

Demirel, H., Ayhan, M.E., Demir, C., 1994, Gravimetric Works in Turkey for the period 1990-1994, Bulletin D'Information 75, s. 120-123.

Demirel H., M. Becker, E.Groten, A. Aksoy, 1987, Kuzey Anadolu Fay hattınınYeniçağa Kesiminde Mikro-Gravimetri Ölçüleri ve İlk Değerlendirmeler, 1.Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.

Kavouras, M., 1982, On the Detection of Outliers and the Determination of Reliability in Geodetic Networks. Technical Report No:87, University of New Brunswick, Canada.

Kılıçoğlu, A., Fırat, O., 2002, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti Ulusal Gravite Ağı'nın (KUGA-2001) Oluşturulması, Harita Dergisi, sayı 127, s. 1-8.

Koch, H.R., 1983, Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models.

Kubackova, L., 1986, Optimum Processing of Gravimetric Observations Affected by the Drift in a One-stage Net and the Analysis of the Accuracy of the Results, Studia Geoph., s. 236-241.

LaCoste & Romberg (LCR), Instruction Manual For LCR, Inc., Model G Geodetic Gravi Meter No 379, LaCoste & Romberg Inc., Texas.

Mikhail, M.E., F. Ackermann, 1976, Observations and Least Squares, Harper & Row Publishers, New York.

Morelli, C., C.Ganter, T. Honkasalo, J.G. aner, R.K. Mc Connel, B. Szabo, U.Uotila, U. C.T. Whalen, 1974, The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN-71), Special Publication No:4, IAG, Paris.

Reilinger, R.E., S. Ergintav, R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, A. Barka, O. Gurkan, L. Hearn, K. L. Feigl, R. Cakmak, B. Aktug, H. Ozener, M.N. Töksoz, 2000, Coseismic and Postseismic Fault Slip for the 17 August 1999, M=7.5, Izmit, Turkey Earthquake, Science, 289,s. 1519-1524.

Sevilla M.J., A.J. Gill, P. Romero, 1990, Adjustment of The First Order Gravity Net in The Iberian Peninsula, Bulletin D'Information 66, s. 21-54, BGI.

Tscherning, C.C., R. Forsberg, P.Knudsen, 1994, The GRAVSOFTE Package for Geoid Determination. Proc. 1. Continental Workshop on the Geoid in Europe, Prague, May 1992, s. 327-334, Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography, Prague.

Torge, W., 1992, Gravimetry and Tectonics, Lecture notes, NKG Autumn School, Helsinki.

Torge, W., 1989, Gravimetry, Walter de Gruyter, Berlin.

Torun A., 1997, Türkiye Ulusal Gravite Ağının İyileştirilmesi Projesi İç Rapor, İş Teslim Raporu. HGK Jeodezi Dairesi, Ankara.

Vanicek, P., Krakiwsky, E., 1980, Geodesy The Concepts, Elsevier Science Publisher, Holland.

Wilmes, H., Falk, R., Lothhammer, A., Kressman, A., Lang, O., Kılıçoğlu, A., 1997b, Final Report of the Absolute Gravity Campaign 1996 in Turkey. (Yayımlanmadı).

Wilmes, H., Falk, R., Lothhammer, A., Kressman, A., Lang, O., Kılıçoğlu, A., 1997a, Absolute Gravity Campaign in Turkey 1996 – First Results. Proceedings of the Second Turkish-German Joint Geodetic Days (Eds. O.Altan, L.Grundig). 27-29 May, Berlin, s. 51-58.