

GÜNCELLEŞTİRİLMİŞ TÜRKİYE JEODİ (TG-99A) (UPDATED TURKISH GEOID (TG-99A))

Ali KILIÇOĞLU

ÖZET

Türkiye’de GPS ile elde edilen elipsoid yüksekliklerinden uygulamada kullanılan ortometrik yüksekliklerin doğrudan elde edilmesi için duyarlı jeoid yüksekliklerine olan gereksinim güncelliğini korumaktadır. Bu problem mevcut gravimetrik jeoid ve GPS/Nivelman jeoidi birleştirilerek çözülebilir. Türkiye Gravimetrik Jeoidi (TG-91) nokta gravite ölçüleri, global yer potansiyel modeli ve sayısal arazi modeli kullanılarak kaldır-yerine koy tekniği ve En Küçük Karelerle Kolokasyon modeli ile hesaplanmıştır. Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA-99A)’nın oluşturulması ile noktaların ITRF96 ile uyumlu elipsoid yükseklikleri bilinmektedir. Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı’nın yeniden dengelenmesiyle (TUDKA99) tüm Türkiye için homojen ve duyarlı Helmert ortometrik yükseklikler hesaplanabilmektedir. Türkiye’ye dağılmış 197 noktada TUTGA99 datumunda elipsoid yükseklikleri ile Helmert ortometrik yükseklikleri belirlenmiştir. Bu noktalarda TG-91 jeoid yükseklikleri interpolasyonla belirlenmiştir. TG-91 referans yüzeyi alınarak GPS/nivelman jeoid yükseklikleri ile arasındaki farklar 197 noktada hesaplanmıştır. Farkların modellendirilmesinde öncelikle deterministik kısım (trend) altı parametrelili polinomsal yüzey ile hesaplanmış ve farklardan çıkarılarak artık ölçüler elde edilmiştir. Artık ölçüler stokastik özelliklere sahip olup ayarlanabilir sürekli eğim algoritması kullanılarak modellendirilmiş ve gridlenmiştir. Tüm Türkiye için 3’x3’ grid köşe noktalarında bilinen TG-91 jeoid yüksekliği, hesaplanan trend değeri ve gridlenen artık ölçü eklenerek Güncelleştirilmiş Türkiye Jeoid (TG-99A) yükseklikleri hesaplanmıştır. TG-99A’nın hesabında kullanılan 197 noktada farkların modellendirilmesinden sonra elde edilen düzeltmelerin ortalaması 1.4 cm ve standart sapması 9.1 cm olarak hesaplanmıştır. Çeşitli mühendislik uygulamalarında GPS/nivelman jeoid yükseklikleri elde edilen ancak birleştirmede kullanılmayan 122 noktada TG-99A jeoid yükseklikleri interpolate edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Farkların ortalaması -0.1 cm ve standart sapması 14.5 cm olarak hesaplanmıştır. Buradan TG-99A’nın yaklaşık olarak 10 cm iç duyarlılığa ve 15 cm doğruluğa sahip olduğu değerlendirilmektedir. TG-99A orta ve küçük ölçekli coğrafi materyal üretiminde doğrudan kullanılabilir. Büyük ölçekli harita üretiminde ise 4-6 nokta ile oluşturulacak yerel GPS/nivelman jeoid yükseklikleri ile güncelleştirilerek kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

ABSTRACT

Currently the need for precise geoid heights, which are to be used in obtaining the orthometric heights directly from GPS ellipsoidal heights, has still been continuing. This problem may be solved by the combination of existing gravimetric geoid and GPS/Leveling geoid. Turkish Gravimetric Geoid (TG-91) was computed by Least Squares Collocation method using point

gravity observations, digital terrain model and earth geopotential model in a remove-restore procedure. The ellipsoidal heights of the points referred to ITRF96 have been made available by the establishment of the Turkish Fundamental National GPS Network (TUTGA-99A). Precise and homogeneous Helmert orthometric heights all over Turkey can be computed after the re-adjustment of Turkish National Vertical Control Network (TUDKA99). Helmert orthometric and ellipsoidal heights (TUTGA-99A) were determined at 197 points scattered over Turkey. TG-91 geoid heights at those points were interpolated. The differences between GPS/Leveling and TG-91 geoid heights, as TG-91 being the reference surface, were computed at 197 points. In the modeling of the differences, first, the deterministic part (trend) was determined by a 6-parameter polynomial surface, and subtracted from the differences in order to obtain the residual differences. The residual differences have stochastic properties, and have been modelled and gridded by using adjustable tension continuous curvature surface gridding algorithm. The Updated Turkish Geoid-1999A (TG-99A) for Turkey were computed by summing up known TG-91 geoid heights, computed trend values and gridded residual differences at 3'x3' grid nodes. The mean and standard deviation of the residuals between computed and observed values at 197 control points used in the computation of TG-99A are found to be 1.4 cm and 9.1 cm respectively. TG-99A geoid heights (computed) were interpolated at 122 co-located check points of which the GPS/Leveling geoid heights (observed) too were determined in some engineering projects in order to observe the differences between observed and computed values (c-o). The mean and standard deviation of the differences 'c-o' are found to be -0.1 cm and 14.5 cm respectively. It is evaluated that TG-99A has an internal precision of 10 cm and accuracy of 15 cm according to the statistics of 'c-o' differences at 197 control points and 122 check points respectively. TG-99A may directly be used in small and middle scale map production. It is anticipated that TG-99A can be used in large scale map production after local modifications by observed GPS/Leveling geoid heights at such 4-6 stations.

1. GİRİŞ

Global Konumlama Sistemi (GPS) ile noktaların global jeosentrik bir koordinat sisteminde enlem, boylam ve elipsoid yükseklikleri belirlenmektedir. Harita yapımı ve mühendislik çalışmalarında ise noktaların ortometrik yüksekliklerinin kullanılması gerekmektedir. Ortometrik yükseklikler klasik olarak Ulusal Düşey Kontrol Ağına bağlı olarak geometrik nivelman ölçüleri ile belirlenmektedir. Ancak bu durum GPS teknolojisinin sağladığı 3-boyutta koordinat belirleme olanağının tam olarak kullanılamaması anlamına gelmektedir. Bu nedenle GPS ile elde edilen elipsoid yüksekliklerinin doğrudan ortometrik yüksekliğe dönüştürülebilmesi için uygun jeoid modellerinin belirlenmesi ve kullanıma sunulması gerekmektedir.

Türkiye'de jeoid belirleme ile ilgili olarak yapılan bilinen çalışmalar 1976 yılında başlamış olup halen sürmektedir. (Ayan, 1976; 1978) ve (Gürkan, 1978) tarafından yapılan ilk çalışmalarda 98 astronomi noktasındaki çekül sapması bileşenleri kullanılmıştır. Daha sonra özellikle uydu teknolojilerinin de gelişmesiyle (Ayhan v.d., 1987) tarafından Güney Batı Anadolu Doppler Jeoidi hesaplanmıştır. Bilgisayar olanaklarının artması, ölçü tür ve sayılarının çoğalması ve hesaplama yöntemlerinin gelişmesi ile 1991 yılında gravite, topoğrafya ve global jeopotansiyel model kullanılarak tüm Türkiye için gravimetrik jeoid (TG-91) En Küçük Karelerle Kolokasyon yöntemi ile hesaplanmıştır (Ayhan, 1992; 1993). TG-91; Türkiye'de ilk kez çok sık heterojen veri kullanılarak hesaplanan ve topoğrafya ve

gravitenin kısa ve çok kısa dalga boylu etkilerini de içeren bir jeoid modeli olması nedeniyle önemlidir. Daha sonra; 184 noktada belirli TRANSIT Doppler elipsoid yükseklikleri ve ortometrik yükseklikler ile Türkiye Doppler Jeoidi (TDJ-92) (Ayhan ve Kılıçoğlu, 1993) ve 200 noktada çekül sapması bileşenleri ile ve astrogravimetrik nivelman yöntemi ile Türkiye Astrojeodezik Jeoidi (TAG-94) hesaplanmıştır (Ayhan ve Alp, 1994). Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA)'nın oluşturulmasıyla birlikte tutarlı ve homojen elipsoid yükseklik belirleme olanağı doğmuştur. Seçilen 197 TUTGA noktasının Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı (TUDKA)'na dayalı olarak duyarlı geometrik nivelman ölçüleriyle ortometrik yükseklikleri belirlenmiştir. Böylece GPS/Nivelman jeoid yükseklikleri elde edilmiştir. TG-91 mutlak jeosentrik jeoid modeli ile tam olarak uyuşmamakta ve aralarında kayıklı ve eğim gibi uzun dalga boyunda etkili farklılıklar bulunmaktadır. Bu nedenle GPS/Nivelman jeoidi ile TG-91 jeoidinin birleştirilerek GPS ile uyumlu jeoid modelinin oluşturulması için TUTGA99 çalışmaları içinde çalışmalar gerçekleştirilmiş ve Türkiye Jeoidi-1999 (TG-99) hesaplanmıştır (Ayhan v.d., 2001). Bu çalışma TUTGA99 kapsamında gerçekleştirilen çalışmanın GPS/Nivelman jeoid yüksekliği belirli ek noktaların katılımı ile güncelleştirilmesini içermektedir. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen jeoid modeli TG-99'un ilk (A) güncelleştirilmesi olarak TG-99A ismiyle anılmaktadır (Ayhan v.d., 2002).

Aşağıda jeoid ve yükseklikler ile ilgili kısa bilgiler verilmekte, diğer bölümlerde sırasıyla TG-91 ve GPS/Nivelman jeoid modelleri ile TG-99A'nın hesabı açıklanmaktadır. Son bölümde TG-99A'nın kullanımı ile ilişkili olarak sonuç ve öneriler verilmektedir.

P yeryüzü noktasının ortometrik yüksekliği (H_p) bu noktadan geçen çekül eğrisi boyunca jeoid kadar ölçülen uzunluktur ve

$$H_p = \frac{C_p}{\bar{g}} \quad (1)$$

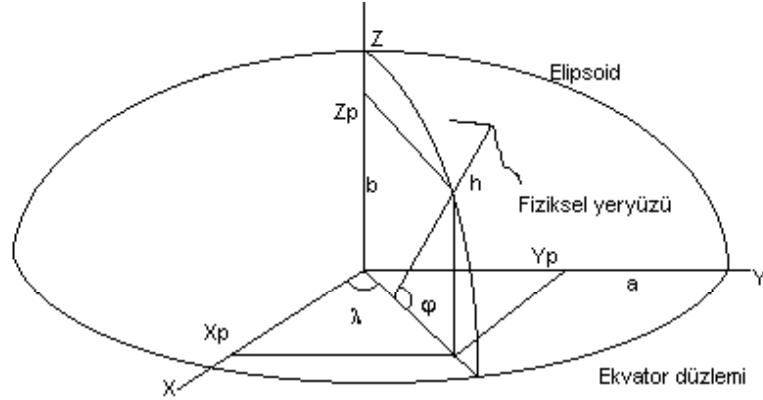
ile tanımlanır. Burada, \bar{g} , çekül eğrisi boyunca ölçülen ortalama gravite, C_p jeopotansiyel sayı olup, W_p , P noktasının gravite potansiyeli, W_0 , jeoid'in gravite potansiyeli olmak üzere

$$C_p = W_0 - W_p \quad (2)$$

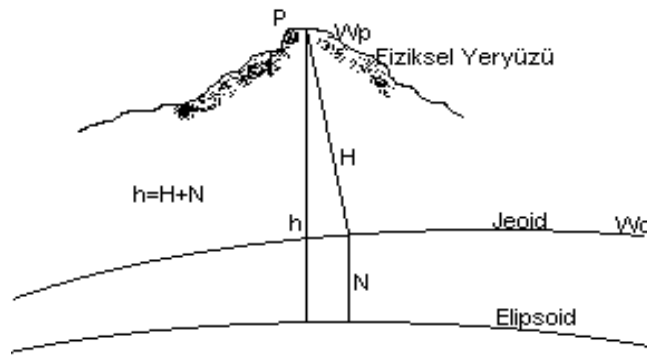
olarak tanımlıdır. P noktasının elipsoid yüksekliği (h_p), P noktasından elipsoid yüzeyine inilen dikin uzunluğu olup elipsoidin boyutları ve datum tanımı ile ilişkilidir. Elipsoid yüksekliği tamamen geometrik bir değerdir ve yerin gerçek gravite alanı ile ilgili olmayıp fiziksel bir özellik taşımaz (Şekil-1). Uygulamada, geometrik nivelman ve gravite ölçülerine dayalı olarak hesaplanan ortometrik yükseklikler kullanılır. GPS ölçüleri ile üç boyutlu jeosentrik bir koordinat sisteminde seçilen başlangıç elipsoidine göre elipsoid yüksekliği (h) belirlenmekte olup elipsoid yüksekliği ile ortometrik yükseklik arasında,

$$h = H + N \quad (3)$$

ilişkisi bulunur. Burada N jeoid yüksekliği olup jeoid ile elipsoid arasındaki uzaklıktır. Ortometrik yükseklik, elipsoid yüksekliği, jeoid yüksekliği, jeoid ve başlangıç elipsoidi arasındaki ilişkiler Şekil-2 'de gösterilmektedir.



Şekil-1 : Üç boyutlu dik koordinat sistemi ve elipsoid



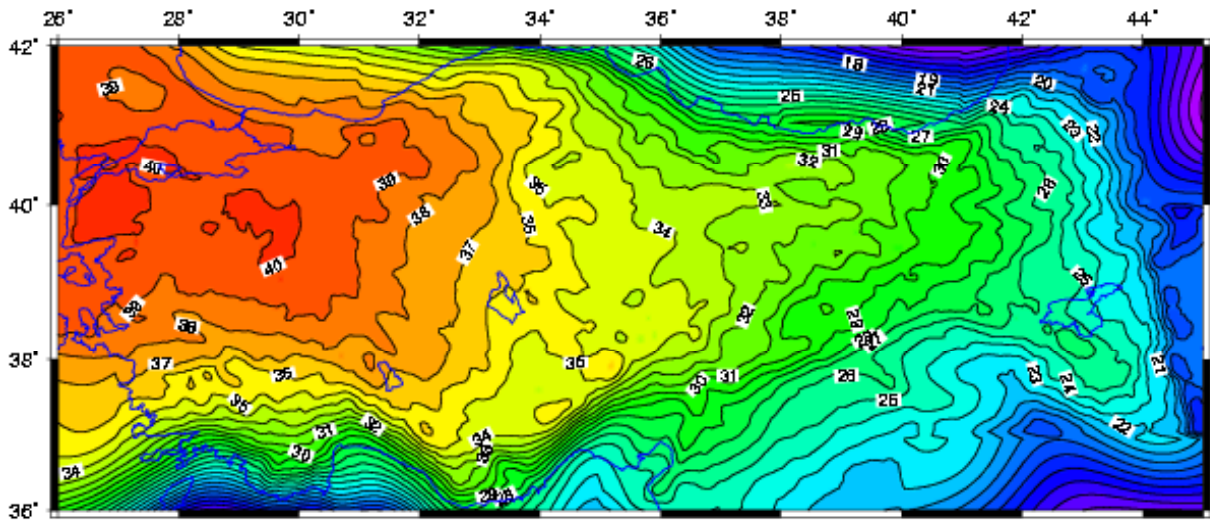
Şekil-2 Elipsoid, jeoid ve yükseklikler

2. TÜRKİYE JEİDİ – 1991 (TG-91)

Türkiye Jeoidi-1991 (TG-91) adı ile bilinen gravimetrik jeoid, GPM2-T1 yer potansiyel katsayıları, topoğrafik yükseklikler ve gravite ölçüleri değerlendirilerek hesaplanmıştır (Ayhan, 1992; 1993). Mevcut yer potansiyel modellerinin oluşturulmasında Türkiye'deki gravite ölçüleri kullanılmadığından, GPM2 yer potansiyel modeli Türkiye'deki gravite ölçüleri ile geliştirilip GPM2-T1 modeli oluşturulmuştur. Ulusal Gravite Kütüğü (UGK), düzenlenmiş Potsdam gravite datumunda, 34.5-42.5 enlem ve 25.5-45.0 boylamları arasında kalan bölgede, 3-5 km sıklıkla 62250 nokta gravite ölçüsünü kapsamaktadır. UGK'de komşu ülkeler ile denizler için gravite ölçüleri yoktur. Topoğrafik yükseklik olarak Türkiye ve yakın çevresindeki kara alanlarını kapsayan bölgede, 15"x20" (450 x 450 m) grid köşelerinde yükseklikler 1/25000 ölçekli haritalar üzerinden sayısallaştırılmış, ayrıca topoğrafik indirgemelerde kullanılmak amacıyla 5'x5', 15'x15' ve 30'x30' grid hücrelerinde ortalama yükseklikler hesaplanmıştır.

Türkiye Jeoidi-1991 (TG-91); yer potansiyel modeli, topoğrafik yükseklikler ve nokta gravite ölçülerinin "kaldır-yerine koy" (remove-restore) tekniği kullanılarak En Küçük Karelerle Kolokasyon (EKKK) yöntemiyle değerlendirilmesi ile GRS-80 elipsoidine göre belirlenmiştir. 1°x1° boyutlu alt bölgelerde, 3'x3' grid köşelerinde GEOCOL yazılımı (Tscherning vd., 1984) kullanılarak jeoid yükseklikleri hesaplanmış ve (1°x1°) alt bölgeler birleştirilerek tüm Türkiye için TG-91 jeoid yükseklikleri grid kütüğü oluşturulmuştur. Enlem ve boylamı bilinen herhangi bir noktada jeoid yüksekliği prediksyonu için değişik yöntem ve yazılımlar mevcuttur (Tscherning vd., 1984; Ulubay, 1990).

Şekil-3'de gösterilen TG-91 jeoid modeli yaklaşık jeosentrik olup global koordinat sistemlerine (örn.ITRF96) bağlı olarak tanımlanan jeosentrik (mutlak) jeoid ile arasında kayıklık ve eğim olması beklenmektedir. GPS ile global koordinat sistemlerine bağlı olarak oluşturulan jeodezik ağlarda elipsoid yükseklikleri hesaplandığından, ortometrik yüksekliklerin (3) eşitliği ile hesabında TG-91 jeoid yüksekliklerinin doğrudan kullanılması uygun olmamakta, TG-91'in kayıklık ve eğimini belirlemek, varsa yerel bozukluklarını gidermek amacıyla GPS/Nivelman jeoid yüksekliklerinin belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç, Antalya ve çevresinde yapılan uygulamada gösterilmektedir (Demirkol, 1999).



Şekil-3 : TG-91 Jeoid Modeli (m)

Küçük bölgelerde; GPS ile elde edilen elipsoid yüksekliklerinden TG-91 jeoidi kullanılarak ortometrik yükseklik hesaplamak için değişik yöntemler mevcut olup çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır (Ayhan ve Kılıçoğlu, 1995a, 1995b). Ancak elipsoid yüksekliklerinden ortometrik yüksekliklerin doğrudan hesabı için tüm Türkiye'yi kapsayan bölgede GPS/nivelman jeoid yükseklikleri belirlenmeli ve GPS/nivelman jeoidi ile TG-91 arasındaki sistematik farklılıklar belirlenerek TG-91 mutlak jeoidine dönüştürülmelidir.

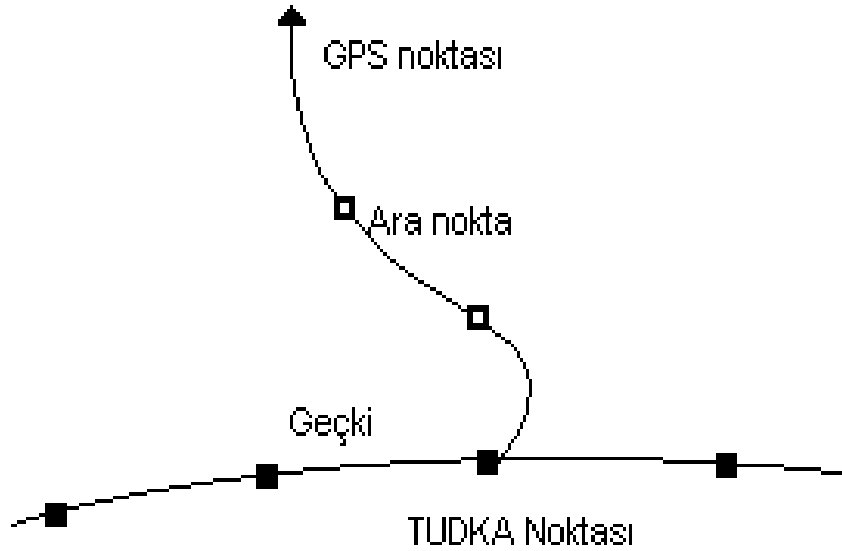
3. GPS/NİVELMAN JEOİDİ

GPS/nivelman jeoid yüksekliklerini belirlemek için; Türkiye içinde uygun dağılımda, jeoidin hızlı değiştiği bölgelerde daha sık olmak üzere, 197 TUTGA-99 noktası seçilmiş ve geometrik nivelman ölçüleriyle Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı-1999 (TUDKA-99) 'na bağlanmıştır. Seçilen bu noktalardan ayrı olarak çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere 122 GPS/nivelman noktası daha oluşturulmuştur. Söz konusu 122 nokta hesaplanan jeoid modelinin dış kontrolü amacıyla kullanılacaktır. Toplam 197 GPS/nivelman noktasının TUTGA-99 koordinat sisteminde elipsoid yükseklikleri ile TUDKA-99 datumunda geometrik nivelman ölçüleri ve gravite değerleri ile ortometrik yükseklikleri belirlenmiştir.

Nivelman bağlantısı yapılan TUTGA-99 noktalarında elipsoid yükseklikleri, 1992-1999 yılları arasında gerçekleştirilen GPS kampanyalarının (Ayhan v.d., 2002) açıklandığı gibi

birleştirilmesi ile ITRF96 koordinat sisteminde (epok=1998.0) ve GRS-80 elipsoidine göre tanımlıdır.

TUTGA-99 datumunda elipsoid yükseklikleri belirli GPS/Nivelman noktalarının ortometrik yükseklikleri TUDKA-99'a dayalı olarak belirlenmiştir. Söz konusu GPS/Nivelman noktalarından bir tanesinin (SEYH) nivelman bağlantı ölçüleri Marmara Depremlerinden sonra gerçekleştirildiğinden ortometrik yüksekliği Düzenlenmiş TUDKA-99 ve elipsoid yüksekliği Düzenlenmiş TUTGA-99 datumunda hesaplanmıştır.

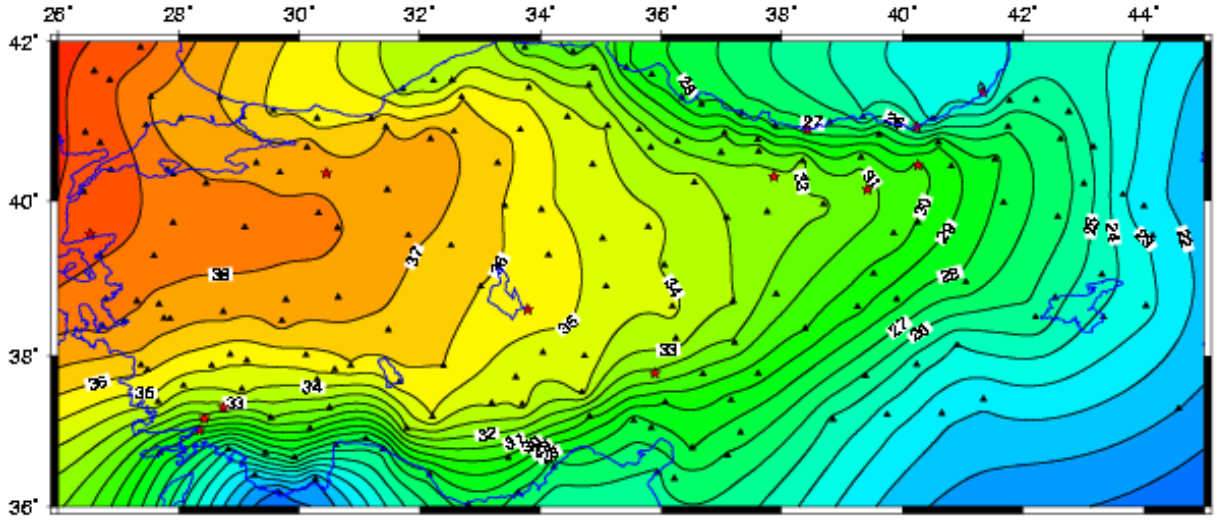


Şekil-5 TUTGA noktasının TUDKA'ya bağlantısı

GPS noktalarının TUDKA-99'a nivelman bağlantısı yapılırken, arazide bulunan en az iki TUDKA-99 noktası arasındaki yükseklik farkı kontrol ölçüleri ile test edilmiş, daha sonra GPS noktasına kadar gidiş-dönüş kol şeklinde duyarlı nivelman ölçüsü yapılmıştır (Şekil-5).

Ölçülerde gidiş-dönüş farkının $6\sqrt{K}$ mm'den (K, km biriminde nivelman geçki uzunluğu) küçük olması öngörülmüştür. Kol ölçüsü boyunca mesafenin uzun olması durumunda birer kilometre aralıkta nokta inşa edilmiştir (HGK, 1992). Nivelman bağlantı ölçüleri 1991-2002 yılları arasında yapılmış ve 197 TUTGA-99 noktasının TUDKA-99'a bağlantı ölçüsü gerçekleştirilmiştir.

Helmert ortometrik yüksekliği hesaplanan noktada gerçek gravite değerlerinin bilinmesi gerekir. TUDKA-99 noktalarında gerçek gravite değeri belirli olmakla birlikte kol geçkisi boyunca yeni tesis edilen ara noktalarda ve TUTGA-99 noktalarında bilinmemektedir. Bu noktalarda gravite ölçüsü yapılması ekonomik olmadığından bu noktalardaki gravite değerleri, UGK'da yer alan gravite ölçü noktalarından yararlanarak, ortometrik yükseklik hesabı için yeterli doğrulukta (± 3 mGal) kestirilmiştir. Bu amaçla, gravite kestirimi yapılacak noktaların enlem ve boylamları 1/25000 ölçekli topoğrafik haritalardan saniye doğruluğunda sayısallaştırılmış ve Ayhan ve Alp (1988)'de verilen yöntem ve hazırlanan yazılım kullanılmıştır.



Şekil-6 GPS/Nivelman jeoid modeli (m)

GPS noktalarında Helmert ortometrik yüksekliği hesaplanırken, önce TUDKA noktasından GPS noktasına kadar olan geçki boyunca jeopotansiyel sayı farkı,

$$\Delta C = \sum_{k=1}^K \frac{g_k + g_{k-1}}{2} \Delta n_k \quad (4)$$

ile bulunmuştur. Burada; K, TUDKA-99 noktasından GPS noktasına kadar olan ara noktaların sayısı, Δn_k , ardışık iki ara nokta arasında geometrik nivelman ile bulunan yükseklik farkı, g, noktalardaki gerçek gravitedir. Daha sonra P, TUDKA-99 noktasının jeopotansiyel sayısı C_p 'den yararlar GPS noktasının jeopotansiyel sayısı, C ,

$$C = C_p + \Delta C \quad (5)$$

Helmert ortometrik yüksekliği H;

$$H = \frac{C}{g + 0.0424H} \quad (6)$$

ve GPS noktasının elipsoid yüksekliği h olmak üzere GPS/Nivelman jeoid yüksekliği N_{GPS}

$$N_{GPS} = h - H \quad (7)$$

ile hesaplanmıştır. 197 GPS noktasında hesaplanan ve gridlenerek çizdirilen Türkiye GPS/Nivelman Jeoidi Şekil-6'da verilmektedir. Şekil-6'da kırmızı yıldız ile gösterilenler 2001 yılında eklenen noktalardır.

4. DÜZENLENMİŞ TÜRKİYE JEOİDİ – 1999 (TG-99A)

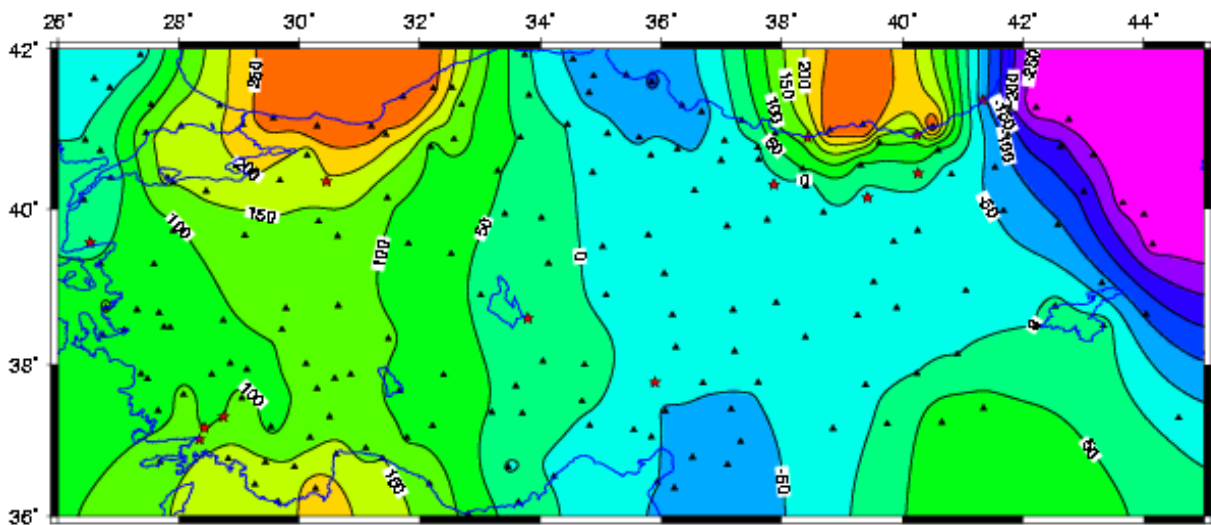
TG-91 ile GPS/Nivelman jeoidinin birleştirilmesi için GPS/Nivelman jeoid yüksekliği bilinen 197 noktada TG-91 ile GPS/Nivelman jeoid yükseklik farklarının bilinmesi gerekir. İstenen noktalarda TG-91 jeoid yükseklikleri interpolate edilebilmektedir. Herhangi bir noktada duyarlı GPS/nivelman jeoid yüksekliğini interpolate etmek yeterli veri sıklığı olmadığından olanaklı değildir. Bu nedenle TG-91 referans yüzeyi olarak alınarak GPS/nivelman jeoidi ile arasındaki farklar hesaplanacak ve bu farklar modellendirilerek her hangi bir noktada farkların interpolasyonu sağlanacaktır. Farkların modellendirilmesinde öncelikle ölçülerdeki deterministik kısım (trend) hesaplanacak ve ölçülerden çıkarılarak stokastik özelliklere sahip artık ölçüler hesaplanacaktır. Artık ölçüler bir yüzey geçirilerek modellendirilebilir. Modellendirilen trend ve artık ölçü değerleri 3'x3' grid köşelerinde hesaplanarak aynı grid köşelerindeki TG-91 jeoid yüksekliklerinden çıkarılacak ve mutlak jeoid yükseklikleri hesaplanacaktır.

Bu amaçla yapılan çalışmalar Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı'nın oluşturulması kapsamında gerçekleştirilmiş ve GPS/Nivelman ve TG-91 jeoid modellerinin birleştirilmesi ile TG-99 oluşturulmuştur (Ayhan v.d., 2001). TG-99'un oluşturulmasında 187 nokta kullanılmış olup artık ölçüler En Küçük Karelerle Kolokasyon yöntemi ile modellendirilmiştir. Bu çalışmada TG-99'un hesaplanmasında kullanılan 187 noktaya ek olarak, 3 adet kontrol ve 10 adet yeni GPS/Nivelman noktasının da oluşturulması ile 197 nokta kullanılmakta olup hesaplanan yeni jeoid Düzenlenmiş Türkiye Jeoidi-1999 (TG-99A) olarak isimlendirilecektir.

Söz konusu 197 noktada TG-91 jeoid yükseklikleri (N_{TG91}); TG-91 3'x3' grid kütüğünden noktaların ITRF96 koordinat sisteminde enlem ve boylamları kullanılarak kestirilmiş ve

$$\delta N = N_{TG91} - N_{GPS} \quad (8)$$

ile ortak noktadaki jeoid yükseklik farkları, δN , hesaplanmıştır. Bu farklar TG-91 ile GPS/Nivelman jeoidinin birleştirilmesinde ölçü olarak kullanılacak olup Şekil-7'de verilmektedir.



Şekil-7 : TG-91 – GPS/Nivelman Jeoid Yükseklik Farkları (Ölçüler) (cm)

TG91 jeoid yükseklikleri ile GPS/Nivelman jeoid yükseklikleri arasındaki fark (δN) iki boyutlu bir polinom ile modellendirilebilir.

$$t_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4y_i^2 + a_5x_iy_i + a_6x_i^3 + a_7y_i^3 + a_8x_i^2y_i + a_9x_iy_i^2 \quad (9)$$

Yukarıda 3ncü dereceden iki boyutlu bir polinom (10 parametrelili) gösterilmektedir. Burada;

t_i : i noktasındaki trend değeri

a_j : bilinmeyen parametreler [$j = 0, n-1$; parametre sayısı ($n=10$)],

$\varphi_0 = 0^\circ$ ve $\lambda_0 = 0^\circ$ olmak üzere x_i ve y_i ;

$$x_i = \lambda_i - \lambda_0 \quad (10a)$$

$$y_i = \varphi_i - \varphi_0 \quad (10b)$$

ile tanımlıdır. Yukarıda verilen modelde 1 parametrelili çözüm ortalama düzlem, 4 parametrelili çözüm bilineer yüzey, 6 parametrelili çözüm quadratik yüzey ve 10 parametrelili çözüm 3ncü dereceden bir polinom göstermektedir. Bu çalışmada (9) eşitliğine göre 1, 4, 6 ve 10 parametrelili çözüm en küçük karelerle dengeleme yapılarak gerçekleştirilmiş, her noktada hesaplanan trend fark ölçülerinden çıkarılmış ve

$$dN_i = \delta N_i - t_i \quad (11)$$

eşitliği ile artık ölçüler (dN) hesaplanmıştır. Fark ölçülerinden trend hesaplanmasında iki ana yöntem uygulanmıştır. Birinci yöntemde rasgele dağılmış 197 noktadaki fark ölçülerinden trend hesaplanmış, ikinci yöntemde ise rasgele dağılmış fark ölçüleri bir yüzey geçirilerek gridlenmiş (fark grid) ve oluşturulan grid değerlerinden trend hesaplanarak çıkarılmıştır. Her iki yöntemde de fark ölçülerinden trend değeri çıkarılarak artık ölçüler hesaplanmıştır. Çalışma bölgesinde rasgele dağılmış noktalarda ve grid noktalarında hesaplanan trend ve artık ölçülere (dN) ilişkin istatistikler sırasıyla Tablo-1 ve Tablo-2’de verilmektedir. Tablo-1 ve -2’den görüldüğü gibi parametre sayısı arttıkça daha anlamlı bir trend çıkmakta ve artık ölçülerin RMS değeri azalmaktadır. Ancak aralarında çok belirgin bir fark gözükmemektedir. Bu nedenle tüm yöntemler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo-1 : Rasgele dağılmış noktalarda trend ve artık ölçülere ilişkin istatistikler (cm)

	Fark ölçüleri	1 par. çözüm (ortalama)		4 par. çözüm (bilineer yüzey)		6 par. çözüm (quadratik yüzey)		10 par. çözüm (3° polinom)	
		Trend	Artık ölçü	Trend	Artık ölçü	Trend	Artık ölçü	Trend	Artık ölçü
minimum	377.4	39.8	337.6	143.5	403.1	121.4	399.7	192.9	434.5
maximum	-289.5	39.8	-329.3	-101.2	-204.2	-145.0	-185.1	-210.7	-188.0
Ortalama	39.3	39.8	-0.4	35.3	4.0	35.0	4.3	34.1	5.1
RMS	119.5	39.8	112.8	76.9	90.9	79.3	89.2	87.6	83.1
std.sp.	113.1	0	113.1	68.5	91.0	71.3	89.3	80.9	83.2

Tablo-2 : (3'x3') grid köşe noktalarında trend ve artık ölçülere ilişkin istatistikler (cm)

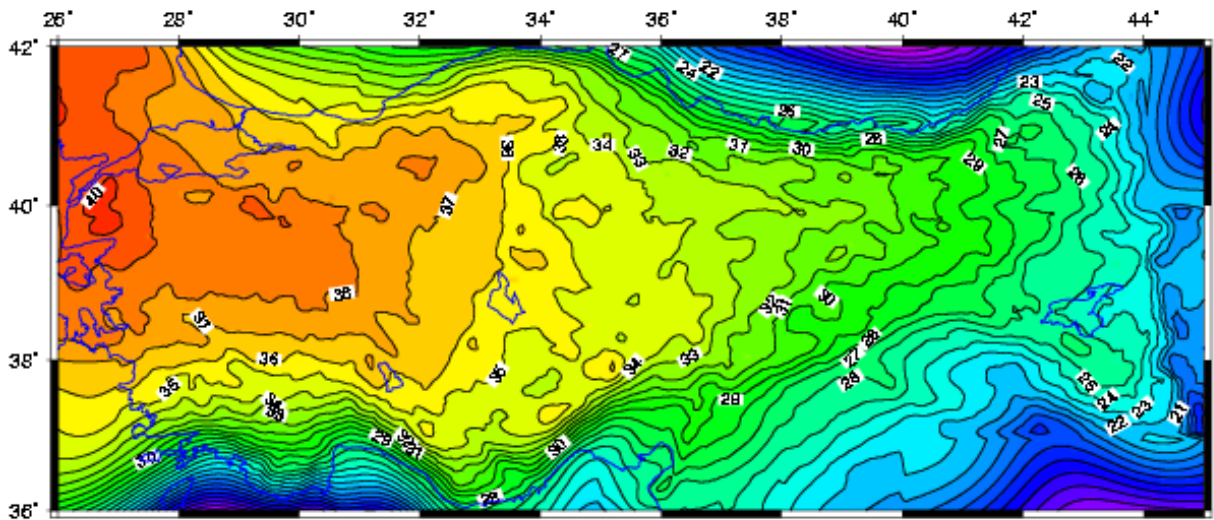
	Fark ölçüleri	1 par. çözüm (ortalama)		4 par. çözüm (bilineer yüzey)		6 par. çözüm (kuadratik yüzey)		10 par. çözüm (3° polinom)	
		Trend	Artık ölçü	Trend	Artık ölçü	Trend	Artık ölçü	Trend	Artık ölçü
minimum	373.4	27.9	345.5	243.2	415.3	230.9	395.7	250.5	370.5
maximum	-430.9	27.9	-458.9	-217.0	-284.0	-229.3	-271.7	-420.0	-254.9
ortalama	27.9	27.9	0	27.9	0	27.9	0	27.9	0
RMS	128.1	27.9	125.1	87.4	93.7	91.5	89.6	102.2	77.6
std.sp.	125.1	0	125.1	82.8	93.7	87.2	89.6	98.3	77.6

Artık ölçülerin modellendirilmesinde; Generic Mapping Tools (GMT) paket yazılımında uygulanan ayarlanabilir sürekli eğimli yüzey gridleme algoritması kullanılarak (3'x3') grid köşelerinde artık ölçüler hesaplanmıştır (Smith and Wessel, 1990).

Bu aşamada herhangi bir noktadaki TG-99A jeoid yükseklik değeri (N_{TG99A}) bilinen TG-91 jeoid yüksekliği (N_{TG91}), trend değeri (t) ve artık ölçü (dN) toplanarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$N_{TG99A} = N_{TG91} - t - dN \quad (12)$$

TG-91 jeoid yükseklikleri, trend değerleri ve artık ölçü değerleri (3'x3') grid köşe noktalarında belirli olduğundan bu üç grid matris (12) eşitliğinde verildiği gibi toplanarak sonuç Düzenlenmiş Türkiye Jeoidi-1999 (TG-99A) hesaplanabilir. Tablo-1 ve -2'de verilen trend ve artık ölçüler ile TG-91 jeoid yükseklikleri kullanılarak değişik jeoid modelleri elde edilebilir. Bu modeller arasında belirgin bir fark olmamakla birlikte rasgele dağılmış noktalarda 6 parametrelili çözüm ile bulunan trend modeli en uygun olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak (3'x3') grid köşelerinde TG-91 jeoid yükseklikleri, 6 parametrelili polinom modeli (kuadratik yüzey) ile hesaplanan trend değerleri ve ayarlanabilir sürekli eğimli yüzey gridleme algoritması ile hesaplanan artık ölçüler (12) eşitliğinde verildiği gibi toplanarak Düzenlenmiş Türkiye Jeoidi - 1999 (TG-99A) oluşturulmuştur (Şekil-8).



Şekil-8 : Düzenlenmiş Türkiye Jeoidi - 1999 (TG-99A) (m)

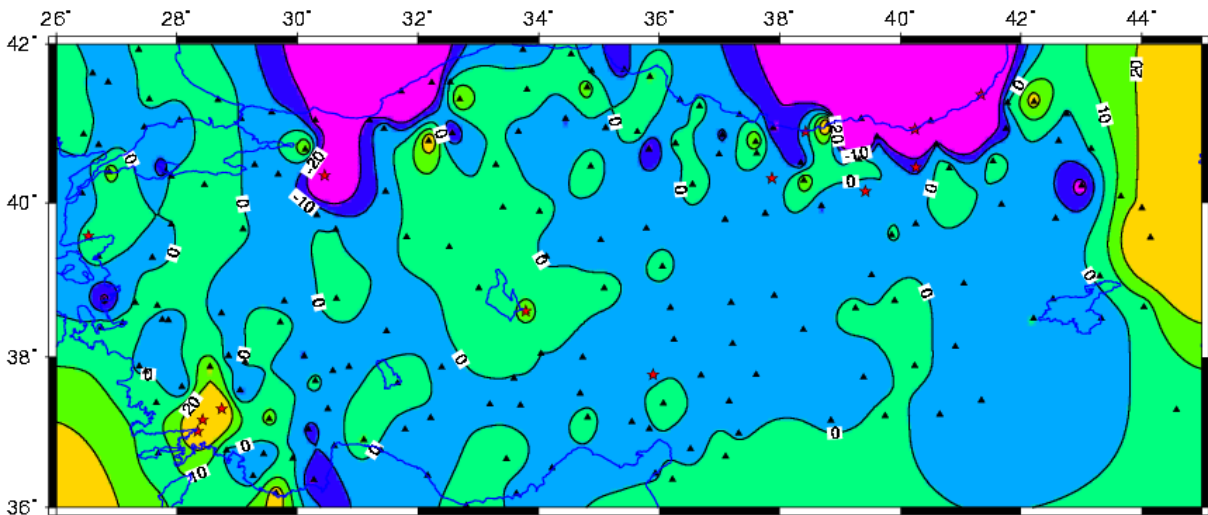
TG-99A gravimetrik jeoid (TG-91) ile GPS/Nivelman jeoidinin birleştirilmiş halidir ve GPS yöntemi ile hesaplanan elipsoid yüksekliklerinden ortometrik yüksekliklerin hesaplanması için (3) eşitliğinde doğrudan kullanılabilir.

TG-99A'nın kontrolü amacıyla aşağıdaki uygulamalar yapılmış olup istatistikler Tablo-3'de verilmektedir.

- (A) Hesap noktalarında TG-99A jeoid yüksekliklerinin interpolasyonu ve karşılaştırılması (İç kontrol; $N_{TG99A} - N_{GPS}$)
- (B) Kontrol noktası olarak seçilen 122 noktada TG-99A jeoid yüksekliklerinin prediksyonu ve karşılaştırılması (Dış kontrol; $N_{TG99A} - N_{GPS}$)
- (C) TG-99A ve TG-99 jeoid modellerinin İç Kontrol noktalarında (C_1), dış kontrol noktalarında (C_2) ve grid köşelerinde (C_3) karşılaştırılması (Kazanç kontrolü, $N_{TG99A} - N_{TG99}$)

Tablo-3 : TG-99A'nın kontrolü (cm)

	İç Kontrol	Dış Kontrol	Karşılaştırma (TG99A-TG99)		
	A	B	C_1	C_2	C_3
Minimum	-14.7	-34.1	-264.7	-21.8	-459.2
Maksimum	91.2	52.3	60.6	33.2	248.2
Ortalama	1.4	1.4	-3.5	0.2	-10.4
St.Sapma	9.1	14.5	30.7	10.1	55.7
Şekil	Şekil-5.9	Şekil-5.10	Şekil-5.11	Şekil-5.12	Şekil-5.13



Şekil-9 : TG99A – TG99 jeoid yükseklik farkları (C_1)

TG-99A jeoid modelinin oluşturulmasında kullanılan 197 noktanın jeoid yüksekliği interpolasyonla hesaplanmış ve gerçek değerlerinden çıkarılarak farklar bulunmuştur. Farkların ortalaması 0.7 cm ve standart sapması 9.1 cm'dir. Buradan TG-99A jeoid modelinin kendi içerisinde uyumlu olduğu söylenebilir. Hesaplama kullanılmayan 122 adet GPS/nivelman noktasının hesaplanan ve gerçek jeoid yükseklikleri arasındaki farkların ortalaması -0.1 cm ve standart sapması 14.5 cm'dir. TG-99A hesabında yeni noktaların eklenmesi özellikle Doğu Karadeniz bölgesinde kazanç sağlamaktadır. C_1 karşılaştırmasında elde edilen farkların haritası incelendiğinde özellikle Doğu Karadeniz Bölgesinde farkların arttığı diğer bölgelerde ise farkın -/+10 cm içerisinde olduğu anlaşılmaktadır (Şekil-9).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Şekil-8'de verilen TG-99A yaklaşık 10 cm iç duyarlılığa ve 15 cm doğruluğa sahip olup orta ve küçük ölçekli coğrafi materyal üretiminde doğrudan kullanılabilir.

1:5000 ve daha büyük ölçekli harita üretiminde ise 4-6 nokta ile oluşturulacak yerel GPS/Nivelman jeoid yükseklikleri ile kontrol edilerek ve güncelleştirilerek doğrudan kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. TG-99 kullanılarak yapılan 1:5000 ve daha büyük ölçekli mühendislik uygulamalarında genel olarak istenen doğruluk elde edilmektedir. Yerel jeoidi ile uyumun iyi olmadığı yerlerde bu çalışmada verildiği gibi veya hazırlanmakta olan BÖHY' de belirtildiği gibi farklar modellendirilerek çözüm sağlanabilir.

TG-99A mevcut gravimetrik jeoid (TG-91) ve 197 noktadan hesaplanan GPS/Nivelman jeoidinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. GPS yöntemi ile hesaplanan elipsoid yüksekliklerinin ortometrik yüksekliğine dönüşümü için doğrudan kullanılabilir.

Halen yürütülmekte olan Türkiye Jeoidinin yeniden belirlenmesi projesinde karalarda ve denizlerde ek gravite ölçüleri, deniz dibi yükseklik bilgileri, komşu ülkelere ilişkin topoğrafik yükseklikler elde edilmiş, uydu altimetre ölçülerinden denizlerde gravite anomalileri hesaplanmıştır. Güncel yer potansiyel modelleri referans olarak alınarak GPS/nivelman jeoid yükseklikleri ile düzenlenmiş topoğrafya ve gravite verilerinin kullanılmasıyla hesaplanacak yeni Türkiye Jeoidi ile daha duyarlı sonuçların elde edileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- /1/ Ayan, T. : Astrogeodatische Geoidberechnung für das Gebiet der Türkei. Diss.Karlsruhe, 1976.
- /2/ Ayan, T. : 1976 Türkiye Geoidi, Harita Dergisi, Sayı 85, sayfa 5-17, 1978.
- /3/ Gürkan, O. : Astrojeodezik ağların deformasyonu ve Türkiye I. Derece triyagülasyon ağı. KTÜ Yayın No. 104, YBF Yayın no. 21, KTÜ Yer Bilimleri Fakültesi, Trabzon, 1978.
- /4/ Ayhan, M.E., E.Bank, O.Lenk, H.A.Şeker : South-Western Anatolia (aegean Region) Doppler Geoid. Boll. di Geod. e Sci. Aff., Anno XLVI, No.4, pp.293-308, 1987.
- /5/ Ayhan, M.E. : Türkiye Jeoidi – 1991 (TG-91), Harita Dergisi, Sayı 108, s. 1-17, Ankara, 1992.

- /6/ Ayhan, M.E. : Geoid determination in Turkey (TG-91). Bull. Geod., Vol. 167, No. 1, pp. 10-22, 1993.
- /7/ Ayhan, M.E., A. Kılıçoğlu : Türkiye Doppler Jeoidi (TDJ), Prof. Dr. H. Wolf Jeodezi Sempozyumu, s: 09-435, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1993.
- /8/ Ayhan, M.E. ve O. Alp : Türkiye Astrojeodezik Jeoidi – 1994 (TAG-94). İç Rapor, No. Jeof-94-2. Harita Genel Komutanlığı, Ankara, 1994.
- /9/ Ayhan, M.E., O. Lenk, C. Demir, A. Kılıçoğlu, M. Kahveci, A. Türkezer, M. Ocak, M. Açıkgöz, A. Yıldırım, B. Aktuğ, Y. S. Şengün, A. İ. Kurt, O. Fırat : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı – 1999 (TUTGA-99), Teknik Rapor, HGK, Ankara, 1999.
- /10/ Ayhan, M.E., C. Demir, O. Lenk, A. Kılıçoğlu, B. Aktuğ, M. Açıkgöz, O. Fırat, Y. S. Şengün, A. Cingöz, M. A. Gürdal, A. İ. Kurt, M. Ocak, A. Türkezer, H. Yıldız, N. Bayazıt, M. Ata, Y. Çağlar, A. Özerkan : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı – 1999A (TUTGA-99A), Harita Dergisi, Özel Sayı 16, Ankara, 2002.
- /11/ Tscherning, C.C., P. Knudsen and R. Forsberg : Description of the GRAVSOFTE package. Geophysical Institute, University of Copenhagen, Technical Report, 1991, 2. Ed. 1992, 3. Ed. 1993, 4. Ed., 1994.
- /12/ Ulubay, A. : Bi Kübik Spline fonksiyonları ile jeoid yüksekliklerinin prediksyonu. Bitirme Tezi, Harita Yüksek Teknik Okulu, HGK, Ankara, 1990.
- /13/ Demirkol, Ö. : Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı Datum Probleminin Çözümüne Yönelik Kara ve Deniz Gravite Ölçülerine Dayalı Jeoit Belirleme. YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. 1999.
- /14/ Ayhan, M.E., A. Kılıçoğlu : Ankara GPS Test Ağında GPS Baz vektörlerinin Üç Boyutta nokta sıklaştırması. TUJJB, Ankara, 1995.
- /15/ Ayhan, M.E., A. Kılıçoğlu, : Global Konumlama Sistemi (GPS) Baz vektörlerinin Benzerlik ve Afin Dönüşümü ile Üç Boyutta Nokta Sıklaştırması Türk Haritacılığının 100. yılı TUJJB ve TUFUAB Kongreleri bildiri Kitabı, 1-5 Mayıs, 307-320, 1995b.
- /16/ HGK : Nivelman Çalışmaları Teknik Talimatı, HGK: MST/125-10, HGK, Ankara, 1992.

/17/ Ayhan, M.E., O.Alp

: Serbest Hava Anomali Kestirim Yöntemleri ve Yöntemlerin Karşılaştırılması. Harita Dergisi, Sayı 101, HGK, Ankara, 1988.

/18/ Smith, W. H. F, P.Wessel

: Gridding with continuous curvature splines in tension, Geophysics, 55, 293-305, 1990.