

SANAL REFERANS İSTASYONU SİSTEMİ (VRS)

Niyazi ARSLAN¹, Cüneyt AYDIN¹, Aydın ÜSTÜN², Hüseyin DEMİREL¹

¹YTÜ, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 80750 İSTANBUL

²YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 80750 İSTANBUL

Özet: GPS (Global Konumlama Sistemi) yazılım ve donanım teknolojisinin hızla gelişmesi sonucunda, statik ölçme yöntemiyle yüksek doğrulukta koordinat elde etmek mümkün olmuştur. Öte yandan Real-Time Kinematik (RTK) GPS uygulamalarında ise referans istasyonundaki alıcı ile gezici alıcı arasındaki mesafenin kısa (<20 km) olması durumunda yeterli doğruluk (2-2.5 cm) elde edilebilmektedir. Alıcılar arasındaki mesafe arttıkça iyonosfer, troposfer, efemeris gibi hataları modellemek güç olmakta ve konum doğruluğu azalmaktadır. RTK GPS'nin bu gibi eksik yönlerini gideren yeni bir yöntem, Sanal Referans İstasyon Sistemi (Virtual Reference Station System- VRS) ortaya atılmıştır. VRS'de temel yaklaşım sürekli gözlem yapan referans istasyonları yardımıyla bir sanal referans istasyonunda iyonosfer, troposfer ve efemeris hatalarının modellenmesine dayanmaktadır. Bu işlemin en önemli adımını iyonosfer modellenmesi oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, VRS'nin matematiksel temelleri verilerek RTK GPS'de iyonosferin modellenmesinin önemi açıklanacaktır.

Anahtar Sözcükler: GPS, Sanal Referans İstasyon Sistemi, İyonosfer

1. GİRİŞ

GPS sinyallerinin içinden geçtiği atmosfer katmanları hakkında doğru bilgi yüksek presizyonlu konum belirleme çalışmalarında önemli bir rol oynar. Uyduların duyarlı yörünge bilgisiyle birlikte IGS istasyonları yardımıyla iyonosfer ve troposferin modellenmesi ve bu bilginin baz çözümünde kullanılması konum belirleme doğruluğunu arttırmaktadır. Bu durum RTK GPS uygulamaları için de geçerlidir.

İyonosferi temsil eden TEC belirleme ile ilgili çalışmaların artması ile birlikte, Diferansiyel GPS (DGPS) tekniklerinden Real-Time Kinematik (RTK) uygulamalar için daha uzun mesafelerde de iyi sonuçlar elde etmek mümkün olmuştur. Ancak, bu sonuçlar doğrudan elde edilemezler. Bu nedenle özel çözüm algoritmaları geliştirilmiş ve bunların sonucunda Sanal Referans İstasyon Sistemi (Virtual Reference Station System-VRS) ortaya çıkmıştır.

RTK GPS'in bir uzantısı gibi düşünülen VRS'nin farkı, referans alıcı olarak sürekli gözlem yapan sabit GPS istasyonlarının olmasıdır. Bu istasyonların dağılımı hata modellerini en doğru biçimde oluşturacak şekilde olmaktadır. Sürekli gözlem yapan sabit istasyonlardan elde edilen veriler sanal referans istasyonlarının oluşturulması ve iyonosferik, troposferik hataları modellemek için kullanılır. VRS'de sabit istasyonlardan elde edilip modellenen troposferik ve iyonosferik etkiler seçilen herhangi bir noktaya interpolasyon yöntemiyle aktarılır. Böylece sabit istasyonların kullanılmasıyla oluşturulan VRS istasyonunun farkı alınmamış faz ve kod ölçüleri iyonosferik ve troposferik etkilerden arındırılır. Bu yüksek kalitedeki veriler

kullanılarak RTK ya da hızlı statik (Post-processing) uygulamalarda, mesafenin uzun olması durumunda bile, oldukça iyi sonuçlar elde edilebilir.

VRS'de yüksek kalitede veri elde edebilmek için atmosferin iyonosfer bölgesindeki değişimlerin iyi bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir. İyonosfer iki kısımda incelenir. Bunlar deterministik ve stokastik kısımlardır. Deterministik kısım TEC ile ifade edilmektedir. Özellikle RTK uygulamalarında TEC değişimlerinin doğru bir biçimde modellenmesi gerekmektedir. TEC'deki ani değişimlerde stokastik kısım içinde ele alınmalıdır. İyonosferin stokastik kısmında ele alınan ve TEC'deki ani değişimler sonucu meydana gelen, orta ve küçük ölçekli sinyal yolu iyonosfer düzensizliklerinin doğru bir şekilde izlenmesi oldukça önemlidir (Wanninger, 1999). Burada spektral analiz yöntemleri kullanılır.

VRS'de yatay konum doğruluğu 35 km'ye kadar olan bazlarda ± 5 cm civarındadır. Bu hassasiyetin daha fazla artması oluşturulan sanal referans istasyonunun konumuna bağlıdır. Oluşturulan sanal referans istasyonu, sabit istasyonların ağırlık merkezinde ise daha iyi sonuçlar elde etmek mümkündür. Burada iyonosferik aktivitesinde gözönüne alınması gerekmektedir (Retscher, 2002).

Bu çalışmada, DGPS yöntemleri, VRS gözlem denklemlerinin elde edilişi, VRS'de modellenmesi gereken hata kaynakları, VRS'de tamsayı belirsizliği çözümü, VRS istasyonunun elde edilişi ve VRS'ye ilişkin uygulama örnekleri verilmektedir.

2. DİFERANSİYEL GPS (DGPS)

GPS ilk tasarlandığında, bütün dünyada, anında (real-time) konumlama imkanı sağlayacak bir navigasyon sistemi olarak düşünülmüştür. Fakat GPS'nin doğasından gelen hata kaynakları nedeniyle özel ölçme donanımı ve yazılımı kullanılmadan elde edilen anlık koordinatların doğruluğu düşüktür. Bu nedenle klasik GPS olarak adlandırılan bu yöntemden daha hızlı ve doğru sonuçların elde edildiği DGPS yöntemleri geliştirilmiştir.

DGPS'te bir alıcı konumu çok iyi bilinen bir noktada sabit iken diğer alıcılar hareketlidir. Sabit noktadaki ölçüler veya ölçüler ile hesaplanan yeni koordinatların bilinen eskilerinden farkları alınarak bulunan fark düzeltme olarak gezen alıcıların ölçü ve koordinatlarına getirilir (Kurt, 1997). DGPS kullanım alanlarına göre 3'e ayrılır.

2.1 Küçük Bölgelerde DGPS

Farklı DGPS uygulamalarında, her bir uydunun kod-faz ölçülerine düzeltmeler getirmek için tek referans istasyonu kullanılır. Eğer düzeltmeler 10 saniye içinde iletiliyorsa ve kullanıcı 1000 km'lik bir alan içerisindeyse doğruluk 1-10 m arasında değişmektedir.

2.2 Geniş Bölgelerde DGPS

Ağda bulunan referans istasyonları kullanılarak, her bir uydu için uydu saat düzeltmeleri, uydu konum hatalarının 3 bileşeni ve iyonosferik gecikme hataları elde edilir. Bu veriler kullanılarak hareketli alıcılar için konum düzeltmesi getirilir. Geniş

bölgelerde DGPS yöntemi kıtaları ya da yeryuvarını kapsayan genişlikte kullanılabilir. (WADGPS -Wide Area DGPS)'de denilmektedir. Bu yöntemde pek çok referans istasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır.

2.3 Taşıyıcı Fazın Kullanıldığı DGPS

Yüksek doğruluk gerektiren çalışmalarda taşıyıcı fazın kullanıldığı DGPS yöntemi uygulanır. Burada ölçülen, referans istasyonundaki taşıyıcı faza göre hareketli alıcısındaki GPS taşıyıcı faz ölçüsüdür. Sonuçta uzaklık ölçme duyarlılığı taşıyıcı dalga boyunun birkaç yüzdelik kısmına karşılık gelmektedir. Statik ölçme yönteminde duyarlılık milimetre düzeyindedir. Eğer antenler hareketli ise bu işlemler RTK olarak adlandırılır. Tablo 1, değişik yöntemlere göre DGPS'nin yatay konum doğruluğunu vermektedir (Parkinson ve Spilker, 1996).

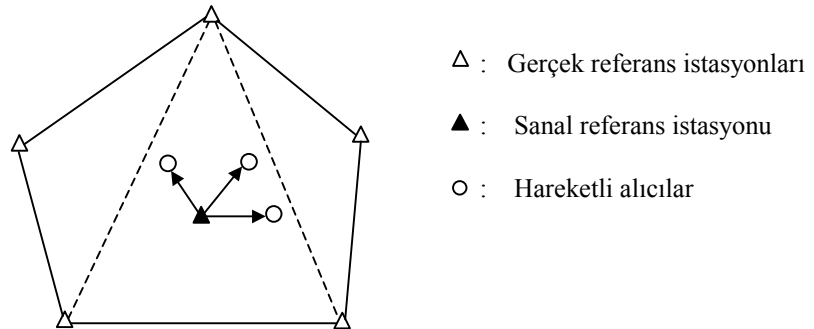
Tablo 1: Değişik yöntemlerden elde edilebilecek yatay konum doğrulukları

Ölçme Yöntemi		Baz Uzunluğu		
		0-50 km	0-200 km	0-3000 km
Taşıyıcı faz ölçüleri	Statik	1-10mm+1ppm		
	Kinematik	10-100 mm		
Kod-faz ölçüleri	Küçük Böl. DGPS		1-5 m	
	Geniş alan DGPS			5-10 m

RTK GPS ile konumlamada doğruluk referans istasyonlar arasındaki mesafeye bağlıdır. Çünkü mesafe arttıkça efemeris, troposfer ve iyonosfer hataları da artmaktadır. RTK GPS ile 10 km'ye kadar olan mesafelerde, VRS'de ise 80 km'ye kadar olan mesafelerde birkaç santimetre düzeyinde doğruluk elde etmek mümkündür (Higgins, 2002).

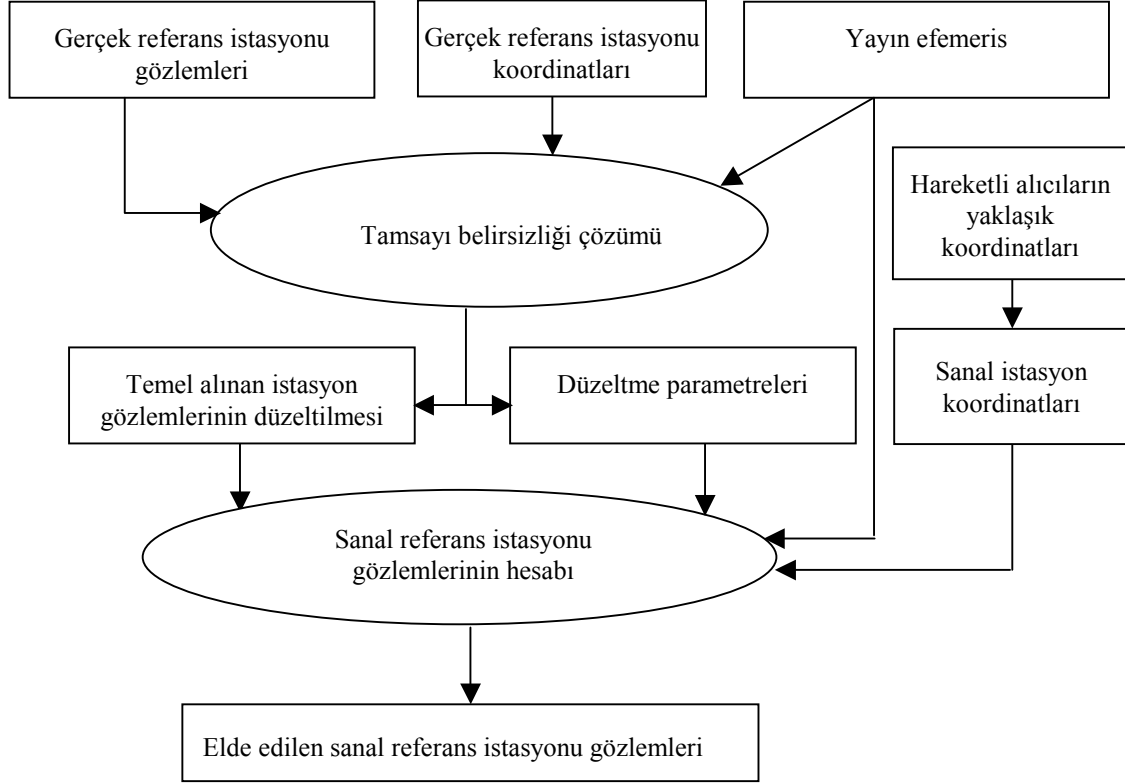
3. SANAL REFERANS İSTASYONU SİSTEMİ (VRS)

Yöntemin esası, çalışma bölgesini kaplayan referans istasyonları verilerini kullanarak oluşturulan sanal bir referans istasyonuna göre hareketli alıcıların konumunun belirlenmesine dayanmaktadır (Şekil 1). Bu işlemde hareketli alıcının konumu yaklaşık olarak bilinmelidir. Bunun için kod ölçüleri yeterlidir. Sanal referans istasyonu hareketli alıcının yakınında oluşturulur. VRS'de referans istasyonlar arasındaki mesafe 80 km'ye kadar ulaşmaktadır.



Şekil 1 Bölgesel ağlarda sanal referans istasyonları

Referans istasyonları aynı zamanda troposfer ve iyonosferi modellemek için kullanılır. Sanal referans istasyonu gözlemlerinin elde edilmesi şekil 2’de özetlenmektedir (Wanninger, 1999).



Şekil 2 Bölgesel GPS ağlarındaki sanal referans istasyonunun taşıyıcı faz gözlemlerinin hesabı

VRS, RTK GPS’in bir uzantısı olarak düşünülebilir. Ancak, VRS’nin RTK GPS’e göre aşağıda belirtilen üstünlükleri bulunmaktadır;

- Referans istasyonu üzerine alıcı koymaya gerek yoktur.
- Cep telefonu teknolojisinin radyo dalgaları sayesinde iletişim eksikliği giderilmiştir.
- Çok referans istasyonu olması nedeniyle redündan artacağından, hareketli alıcının güvenilir konumlanması sağlanmış olur.

3.1 VRS’nin Gözlem Denklemlerinin Elde Edilmesi

Sanal referans istasyonu denklemlerini oluşturmak için orijinal kod ve faz ölçülerine yapay kod ve faz gözlemleri eklenir. Çeşitli işlem adımları sonucunda sanal referans istasyonu için kod ve faz ölçüleri elde edilir.

Sanal referans istasyonunda kod ve faz ölçülerini elde edebilmek için kullanılan orijinal kod gözlemleri,

$$P_{il}^j = \rho_{il}^j - c \Delta t_1^j + c \Delta t_{il} + \Delta \rho_{il,ion}^j + \Delta \rho_{il,trop}^j + \varepsilon_{cod,il}^j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

dir. Burada; i , alıcı; j , uydu; l , epok; ρ_{il}^j , uydu ve alıcı arasındaki mesafe; c , ışık hızı; Δt_l^j , uydu saat hatası; Δt_{il} , alıcı saat hatası; $\Delta \rho_{il,ion}^j$, iyonosferden dolayı sinyal gecikmesi; $\Delta \rho_{il,trop}^j$, nötr atmosferden dolayı sinyal gecikmesi; $\epsilon_{cod,il}^j$, kod gözlemlerinin hatasıdır. Bu denklemler faz gözlemleri içinde yazılabilir. Faz gözlemi,

$$\varphi_{il}^j = \rho_{il}^j - \Delta \rho_{il,ion}^j + \Delta \rho_{il,trop}^j - c \Delta t_l^j + c \Delta t_{il} + \lambda N_i^j + \epsilon_{\varphi,il}^j \quad (2)$$

ile ifade edilir. (2) denkleminde N_i^j tamsayı bilinmeyen, λ taşıyıcının dalgaboyu, $\epsilon_{\varphi,il}^j$ faz ölçümü hatasıdır. Eğer uyduya kilitleme kaybolmazsa tek bir tamsayı belirsizliği değeri hesaplanır. (1) ve (2) denklemi iki frekans için yazılabilir.

t_1 epokunda, j uydusu için, seçilen dalgaboyunda (orjinal dalga ya da doğrusal kombinasyon) (2) tipindeki kod gözlemleri n tane alıcıdan ayrı ayrı elde edilebilir. Böylece,

$$P_{il}^j = \rho_{il}^j + \Delta \rho_{il,ion}^j + \Delta \rho_{il,trop}^j - c \Delta t_l^j + c \Delta t_{il} + \epsilon_{cod,il}^j \quad (3)$$

denklemi elde edilir. Referans istasyon koordinatları hassas bir biçimde bilindiğinden ρ_{il}^j uydu alıcı mesafesi de hassas bir biçimde hesaplanabilir. Troposferik gecikme referans alıcılardan elde edilen verilerle, iyonosferik kırılma da çeşitli yöntemlerle belirlenir. Yukarıda belirtilen n sayıda alıcıdan elde edilen (3) denklemi tek bir gözlem denkleminde ve aynı sanal referans istasyonuna kolaylıkla dönüştürülür. (3) denkleminin her iki tarafına

$$\xi_{i/0}^j = \rho_{0l}^j + \Delta \rho_{0l,ion}^j + \Delta \rho_{0l,trop}^j - \rho_{il}^j - \Delta \rho_{il,ion}^j - \Delta \rho_{il,trop}^j \quad (4)$$

eşitliği eklenirse yeni pseudo uzaklık denklemi,

$$\tilde{P}_{il}^j = P_{il}^j + \xi_{i/0}^j \quad (5)$$

olur. Böylece sanal referans istasyonu için ilk gözlem denklemi bir uydu için,

$$\tilde{P}_{il}^j = \rho_{0l}^j + \Delta \rho_{0l,ion}^j + \Delta \rho_{0l,trop}^j - c \Delta t_l^j + c \Delta t_{il} + \epsilon_{cod,il}^j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

olarak elde edilir. Burada bilinmeyenler sanal referans istasyon koordinatları, n sayıda alıcı için saat düzeltmeleri ve uydu saat düzeltmesidir ($3+n+1$ sayıda bilinmeyen).

t_1 epoku için n sayıda alıcının m sayıda uyduyu gözlediği düşünülürse, $n+m+3$ sayıda bilinmeyenli $N=nm$ sayıda denklem elde edilecektir. (Örnek: $n=10$, $m=8$, $u=21$, $f=N-u=59$, u ; bilinmeyen sayısı, f ; serbestlik derecesi). Serbestlik derecesi sıfırdan büyük olmasına karşın, buradan oluşturulacak normal denklem katsayılar matrisi tekil olmaktadır. Bu durumda herhangi bir alıcı saatini ya da uydu saatini sabit alarak çözüme ulaşmak mümkün olur (Beutler vd., 1999).

(6) denklemi t_1 epokunda yapay gözlem oluşturmak için temel denklemdir. Bu denklemde atmosferin durumu herhangi bir kaynaktan elde edildiğinden bilinen olarak alınmaktadır. Sanal referans istasyonu için faz gözlemlerini oluştururken kod gözlemlerine benzer bir yol izlenir. Ancak bu aşamada tamsayı belirsizliği çözümü güçleşmektedir. Tamsayı belirsizliğinin ikili farklardan farkı alınmamış tamsayı belirsizliğine dönüştürülmesi için özel bir yöntem kullanmak gerekmektedir (Beutler vd., 1999). Tamsayı belirsizlikleri elde edildikten sonra bu terim faz gözlem eşitliğinin sol tarafına atılır. Böylece problem kod gözlemlerine dönüşmüş olur (Beutler, 2000).

4. VRS'de MODELLENMESİ GEREKEN HATA KAYNAKLARI

4.1 Troposferik Etki

Özellikle yükseklik farklarının çok olduğu dağlık bölgelerde troposfer önemli bir hata kaynağıdır. Düzeltmelerin oldukça önem kazandığı VRS gibi sistemlerde troposferik etkinin de doğru bir biçimde ele alınması gerekmektedir. İyonosferde kullanılan interpolasyon yöntemine benzer bir biçimde, ağ çözümünden elde edilen troposfer parametreleri kullanılarak sanal referans istasyonundaki troposfer gecikmesi modellenir. Diğer bir deyişle troposferik etkiler enterpole edilir.

4.2 Yörünge (Efemeris) Hatasının Etkisi

VRS RTK ölçmelerinde IGS predikte edilmiş ya da yayın (broadcast) efemerisi, uygulama açısından istenilen sonuçların elde edilmesini sağlar. Öte yandan IGS hassas yörüngelerinin kullanılması çözümün kalitesini 1.5-2 kat arttırmaktadır.

Uzun bazlarda kısa zaman aralıklarındaki çözümlerde yörüngelerin hassas bir biçimde elde edilmesi gereklidir (Beutler, 2000) .

4.3 İyonosferik Etki

GPS ölçme işlemleri açısından iyonosfer tabakası önemli hatalara neden olur. İki nokta arasındaki mesafenin artmasıyla birlikte iyonosferik etki tamsayı belirsizliği çözümünü güçleştirmektedir. Sanal referans istasyonu kavramı içinde de iyonosferik etki oldukça önemlidir. Bu etkinin doğru bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir.

İyonosfer tabakasından dolayı meydana gelen hatalar iyonosferdeki elektron yoğunluğu değişimleri nedeniyle düzenli ya da düzensiz bir biçimde oluşurlar. Özellikle ülkemizde içinde bulunduğu orta enlem bölgelerinde belirleyici etkenler;

- Düşey elektron yoğunluğu
- Orta ölçekli sinyal yolu iyonosfer düzensizliği (MSTID)
- Küçük ölçekli sinyal yolu iyonosfer düzensizliği (Scintillation)

biçimindedir. Orta ölçekli sinyal yolu iyonosfer düzensizliği olduğunda, çift frekans verilerinin kullanılması durumunda 10 km'den daha küçük bazlarda bile tamsayı belirsizliği çözümü güç ve karışık olmaktadır. MSTID oldukça geniş bir alanı kapsamaktadır. Bu nedenle uydu-uydu iyonosferik düzeltme yapılsa bile MSTID kalıntı hataların kalmasına neden olmaktadır.

Güneş aktivitesinin artmasıyla birlikte iyonosferik TEC daha yoğun olmaktadır. Orta enlemlerde küçük ölçekli sinyal yolu iyonosfer düzensizliği bazen etkili olmaktadır. Fakat orta ölçekli sinyal yolu iyonosfer düzensizliği çok sık olmaktadır. Bu nedenle 80 km'ye kadar olan istasyonlar arasında MSTID'nin doğru bir biçimde modellenmesi gerekmektedir (Wanninger, 1999).

İyonosferi etkileyen başka bir etkende jeomanyetik alanın davranışıdır. Jeomanyetik etki TEC'in artmasına neden olur (Odiijk, 2002).

Toplam elektron yoğunluğunun deterministik kısmını ifade eden iyonosfer modelinin tersine, TEC'in stokastik kısmı modelin düzeltme kısmını ifade etmektedir. Düzeltmelerin büyüklüğü iyonosferde meydana gelen kısa süreli dalgalanmalara bağlıdır. TEC haritaları iyonosferin ani değişimlerinde yetersiz kalmaktadır (Schaer vd., 1999).

Görüldüğü üzere, VRS kavramı iyonosferik etkilere oldukça duyarlıdır. GPS çözüm algoritmasına bağlı olarak elde edilen ikili farklar iyonosfer düzeltmesinin farkı alınmamış iyonosfer düzeltmesine dönüştürülmesi gerekmektedir. VRS'de elde edilecek sanal referans istasyonu için iyonosferin interpolasyonu yapılmalıdır. Bunun nedeni, zaman içindeki MSTID değişimleri nedeniyle, iyonosferin sanal referans istasyonu üzerinde değişik yapıda olmasıdır (Jaggi vd, 2001).

4.4 Tamsayı Belirsizliği Çözümü

VRS kavramı içinde koordinatları hassas bir biçimde bilinen istasyonlarda tamsayı belirsizliği çözümü ilk aşamadır. Tamsayı belirsizliği çözümü görüş alanına giren yeni uydular içinde çözülmelidir. Faz sıçraması meydana geldiğinde tamsayı belirsizliklerinin yeniden çözülmesi gerekmektedir (Lachapelle, 2000). Tamsayı belirsizliği çözümü herhangi bir gözlem için gerçekleştirilemezse bu gözlem işlem dışı bırakılır. Ağda bulunan referans istasyonların koordinatları hassas bir biçimde bilindiğinden tamsayı belirsizliği çözümünü gerçekleştirmek oldukça kolay olmaktadır (Wanninger, 1999). Tamsayı belirsizliği çözümü elde edildikten sonra hata modelleri oluşturulmaktadır.

5. VRS UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Sanal referans istasyonu verileri, uygulamada RTK ve hızlı statik konumlama yöntemleri için kullanılmaktadır.

RTK yöntemi için VRS'nin kullanıldığı ülkeler Tablo 2'de verilmektedir. Bu ülkelerdeki uygulamalarda sistemin çalışmasında öncelikle 80 km'ye kadar aralıklarla dizilmiş referans istasyonlarından toplanan veriler merkezi bir bilgisayara aktarılır. Merkezi işlem yapan bilgisayar mekansal hataları modellemek için referans istasyonları kullanır ve uygun düzeltmeler getirir.

Tablo 2: VRS'nin kullanıldığı ülkeler

VRS ağı	Ülke	Alıcı Tipi	İstasyon sayısı
Trimble terrasat demo ağı	Almanya	Trimble	5
ASCOS/Ruhrgas AG	Almanya	Javad	29
Arazi ölçme baverya	Almanya	Leica/Trimble	40
Swiss Topo	İsviçre	Trimble	29
Swiss@t AG	İsviçre	Javad	21
Geotrim oy	Finlandiya	Geotracer	4
Shengzhen	Çin	Trimble	4
SWEPOS	İsveç	Ashtech	21
LE34	Danimarka	Trimble	26
GSI	Japonya	Trimble	11
JEC	Japonya	Trimble	11
TAO/YRP	Japonya	Trimble	5
By/S@T group a.s	Çek Cumh.	Ashtech	4
Arazi ölçüm Hessen	Almanya	Trimble/Leica	13
Arazi ölçüm NRW	Almanya	Trimble	20
Statens Kartverk	Norveç	Trimble	6
OC GIS Vlaanderen	Belçika	Leica	40
MinnDot	USA	Trimble	6
ASCOS/DGPS	Almanya	Javad	29
BKG DGPS	Almanya	Javad	10
OBR Ouennsland	Avusturalya	Trimble	5

Kullanıcı açısından bakıldığında hareketli alıcı merkez ile iletişim kurar. Buraya kendi yaklaşık konumunu gönderir ve düzeltmeleri talep eder. İşlem yapan merkezi bilgisayar gezici alıcının yaklaşık konum koordinatlarında referans alıcı varmış gibi düzeltmeler üretir ve gezici alıcı sanal referans istasyonuna göre konumlandırılır (Higgins, 2002).

VRS'nin kullanıldığı RTK uygulamalarında konum doğruluğu referans istasyonlarından uzaklaşılması durumunda bile santimetre seviyesinde olmaktadır (Higgins, 2002).

VRS'nin hızlı statik konumlama yöntemi (Post-processing) için kullanılmasına ilişkin bir uygulama İsviçre AGNES ağında 1999 yılında yapılmıştır. Bu uygulamada Zimmerwald noktasında sanal referans istasyonu elde edilmiş ve bu nokta ile Wabern, Thun, Muttentz noktaları arasında bazlar oluşturulmuştur. Değişik uzunluktaki bazlarda 5 ile 15 dakikalık veriler kullanılmış ve aşağıdaki durumlarda belirtilen veri kümeleri elde edilmiştir.

1.durum : Zimmerwald-Wabern (6 km) bazında 5 dakikalık 288 küme

2. durum: Zimmerwald-Thun (17km) bazında 5 dakikalık 288 küme

3. durum: Zimmerwald-Muttenz (74km) bazında 15 dakikalık 96 küme

FARA (Hızlı tamsayı belirsizliği çözüm algoritması) tekniği kullanılarak kısa mesafelerde bütün tamsayı belirsizlikleri çözülmüştür (1. ve 2. durum). Orta mesafelerde başarı oranı %90 civarındadır (3. durum). 3. durum için iyonosferin modellenmesi oldukça önemlidir (Beutler, 2000). Bunun nedeni iki nokta arasındaki mesafenin uzun olmasıdır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada VRS'nin yapısı, uygulama alanları ve VRS'yi etkileyen sistematik hatalar üzerinde durulmuştur.

Sabit GPS istasyonları kullanılarak oluşturulan VRS istasyonlarıyla yapılan RTK uygulamalarının, tek istasyon kullanılarak yapılan RTK uygulamalarına göre pek çok üstünlüğü vardır. VRS, RTK uygulamaları açısından iyonosfer, troposfer ve efemeris hataları gibi pek çok sistematik etkiyi azaltması sonucunda tamsayı belirsizliği çözüm doğruluğunu uzun bazların olması durumunda da arttırmaktadır. Böylece 80 km'ye kadar olan bir alan içerisinde rahatlıkla herhangi bir referans istasyonuna alıcı konulmadan çalışılabilmektedir. Böylece klasik RTK uygulamalarının eksik yönleri giderilmektedir.

VRS istasyonları RTK uygulamaların yanısıra hızlı statik konumlama uygulamalarında da kullanılabilir. Böylece 15 dakika gibi kısa bir zaman içerisinde 80 km'ye kadar olan bazlarda yüksek oranlarda tamsayı belirsizliği çözümleri elde edilebilir.

Bu gibi üstün özellikleri gözönüne alındığında, VRS'nin ülkemizdeki RTK ya da hızlı statik konumlama uygulamalarında kullanılmasının oldukça önemli olacağı söylenebilir.

7. KAYNAKLAR

Beutler G., Schaer S., Rothacher M., Wide Area Differential GPS, AIUB Swiss Federal Office of Topography 1999.

Beutler G., Ionosphere Related Activities within the IGS, Earth Science Advisory Committee (ESAC), Paris, October 26/27, 2000.

Higgins M. B., Australia's Changing Surveying Infrastructure from Marks in the Ground to Virtual Reference Stations, FIG XXII International Congress, Washington DC, USA, April 19-26 2002.

Jaggi A., Beutler G., Hugentobler U., Using Double Difference Information From Network Solutions to Generate Observations for a Virtual GPS Reference Receiver, IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, Hungary, 2-7 Sept., 2001.

Kurt M., Diferansiyel GPS, Yüksek Lisans Bitirme Tezi, Şubat, İstanbul, 1997.

Lachapelle G., Alves P., Fortes L. P., Cannon E. M., DGPS RTK Positioning Using a Reference Network, ION GPS 2000, Salt Lake City, September 19-22, 2000.

- Odiş D., Instantaneous GPS Positioning Under Geomagnetic Storm Conditions, MGP Research Group Publications, 2002.
- Parkinson B. W., Spilker J. J., Global Positioning System: Theory and Applications, Vol.2, 1996.
- Retscher G., Accuracy Performance of Virtual Reference Station (VRS) Networks, Journal of Global Positioning System, Vol.1, No.1:40-47, 2002.
- Schaer S., Beutler G., Rothacher M., Brockmann E., Wiget A., Wild U., The Impact of the Atmosphere and Other Systematic Errors on Permanent GPS Networks, IAG Symposium on Positioning, Birmingham, UK, July 21,1999.
- Wanninger L., The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS Networks Under Solar Maksimum Conditions, Proceedings of ION-GPS 99, , Nashville TN, Sept 14-17, 1999.

YERYUVARININ DIŞ ÇEKİM ALANININ ELİPSOİDAL HARMONİKLERE AÇINIMI: KÜRESEL HARMONİKLERDEN ELİPSOİDAL HARMONİKLERE DÖNÜŞÜM

Aydın ÜSTÜN

Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 80750 İSTANBUL

Özet: Yeryuvarının kitle dağılımı tam olarak bilinmediğinden V dış çekim potansiyeli, $\Delta V = 0$ Laplace diferansiyel denkleminin çözümünü veren harmonik fonksiyonlar ile gösterilir. Bu gösterimde matematiksel bir kolaylık sağladığı için genellikle küresel harmonikler kullanılmaktadır. Ancak kutuplardan basık bir dönel elipsoit yeryuvarının gerçek şekline küreden daha yakındır. Geometrik referans yüzeyi olarak kullanılan dönel elipsoit, yeryuvarının dış çekim alanı için de bir referans yüzey olarak kullanılabilir. Dış çekim alanını elipsoidal harmoniklerle gösterebilmek için Laplace denkleminin elipsoidal koordinat sisteminde tanımlanması gerekir.

Bu çalışmada elipsoidal koordinatlara göre tanımlanan Laplace denklemi için jeodezik sınır değer probleminin çözümü ve elipsoidal katsayıların belirlenmesinde izlenen işlem adımları açıklanmış, katsayı belirleme yöntemlerinden biri olarak küresel harmoniklerden elipsoidal harmoniklere dönüşüm eşitlikleri verilmiş ve EGM96 global jeopotansiyel model katsayıları kullanılarak sayısal bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Yeryuvarının çekim alanı, Elipsoidal harmonikler, Elipsoidal koordinatlar, EGM96 global jeopotansiyel modeli, Legendre polinomları

1. GİRİŞ

Jeodezik gözlemlerin hemen hemen tamamını etkileyen yerçekimi, yeryuvarının şeklinin belirlenmesi problemi ile aynı öneme sahiptir. Bu problem geometrik ve fiziksel gerçeğe yakın bir modelin (referans) tanımlanmasını gerekli kılar. Ancak öncelikle “referans yüzeyi ne olmalıdır?” sorusunun cevabı aranmalıdır. Bir an için yeryuvarının suyla kaplı olduğunu ve kendi eksenini etrafında sabit bir hızla döndüğünü düşünelim. Kitle yoğunluk dağılımı homojen olan böyle bir cisim, kendi çekim alanı ve merkezkaç kuvvetinin etkisiyle hidrostatik bir denge durumu oluşturur. Denge halindeki su kitlelerinin yüzeyi kutuplarda basık bir küre (dönel elipsoit) görünümünü alır. Sonuç olarak çekim ve merkezkaç kuvveti yeryuvarının şeklini belirleyen temel kuvvetlerdir.

Yukarıdaki paragraftan da anlaşıldığı gibi dönel elipsoit yeryuvarının geometrik ve fiziksel referans yüzeyi olarak kullanılabilir. Öte yandan uydu yörüngesi belirleme çalışmalarına başlanılmasından bu yana yeryuvarının dış çekim potansiyeli, sonlu küresel harmonik serilerle gösterilmektedir [Rapp, 1997]:

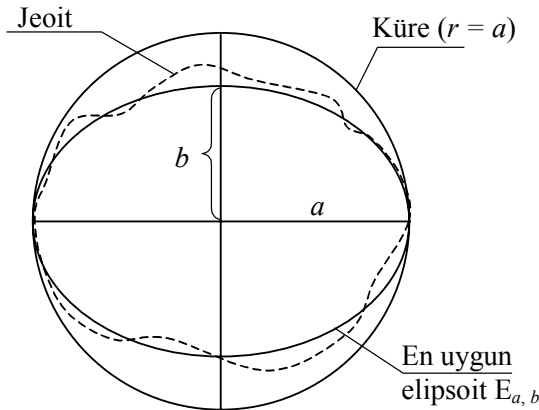
$$V(\vartheta, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{N_{\max}} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \vartheta) \right] \quad (1)$$

Burada ϑ , λ , r sırasıyla jeosentrik enlem, boylam ve yarıçap (küresel koordinatlar), N_{\max} küresel harmonik açınımın maksimum derecesi, GM Newton'un evrensel çekim sabiti

ve yeryuvarının kütlesi çarpımı (ya da kısaca jeodezik çekim sabiti), a ekvatorial yarıçap, \bar{C}_{nm} ve \bar{S}_{nm} tam normalleştirilmiş küresel harmonik katsayılar ve \bar{P}_{nm} tam normalleştirilmiş birinci tür Legendre fonksiyonudur.

Matematiksel olarak basit, sayısal uygulamaya elverişli olması nedeniyle global jeopotansiyel modeller için referans yüzeyi olarak genellikle elipsoit yerine küre tercih edilir. (1), jeoidin dışında harmonik bir fonksiyondur. Küresel koordinatlarla gösterilen Laplace diferansiyel denkleminin ilişkin sınır değer problemlerinin çözümü olarak elde edilir [Heiskanen ve Moritz, 1984; s.45-49]. Açınım teorik olarak sonsuz olmalıdır. Ancak yeryüzünde kısıtlı sayıda gerçekleştirilmiş gözlemler nedeniyle belirli bir derecede sonlandırılmış serilerle gösterilir. Global jeopotansiyel model belirleme ve kullanımı hakkında teori ve uygulamalar Martinec [1998], Pavlis [1997] ve Rapp [1997]'de bulunabilir.

Uygulama açısından yeryuvarının dış çekim potansiyelinin elipsoidal harmoniklerle gösterilmesi son yirmi yıllık sürede jeodezik literatüre konu olmuştur [Jekeli, 1988; Gleason, 1988; Sona, 1995; Thong ve Grafarend, 1989; Yu ve Cao, 1995]. Yeryuvarının görünümü bir küreden ziyade dönel elipsoidi çağrıştırır. Öteki jeodezik büyüklüklerde olduğu gibi gravimetrik büyüklüklere de elipsoide ilişkin referans değerlerle daha çabuk yaklaşılar. Başka bir deyişle getirilecek düzeltme küreninkilere göre daha küçüktür. Yeryuvarının dış çekim alanına elipsoidal harmonik serilerle yaklaşılmasında da durum aynıdır. Özellikle çekim potansiyelinin harmonik serilerle belirlenmesinde noktaların çeken cisim dışında olması zorunluluğu göz önüne alındığında, elipsoidal harmoniklerin önemi büyüktür. Şekil 1'den de görüldüğü gibi yeryüzüne yakın noktalar, yarıçapı yeryuvarının ekvatorial yarıçapı a 'ya eşit bir kürenin içinde kalmaktadır. Oysa ki çekim potansiyeli sadece çeken cismin dışında harmoniktir; elipsoit yüzeyinde küresel harmonik açınımı kullanmak olanaksızlaşır.



Şekil 1. Yeryuvarının gravite alanının gösteriminde kullanılan referans yüzeyler

Matematiksel ve sayısal nedenlerden dolayı jeodezik çalışmalarda yaygın olarak kullanılsa da, elipsoidal harmonik açınım yeryuvarının gravite alanı için daha gerçekçidir. Bu çalışma ile yeryuvarının dış gravite alanının elipsoidal harmonik serilerle gösterilmesi ve bu modelin jeodezik çalışmalardaki önemine ilişkin bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

2. YERYUVARININ GRAVİTE ALANI ve ÇEKİM POTANSİYELİ

Yerçekiminin günlük yaşantımızdan evrene dek uzanan etkisi, cisimlerin yeryüzünde ve uzayda nasıl hareket edeceğini belirler. Bir vektör alanı olan yeryuvarının gravite alanı Newton'un evrensel çekim ve hareket yasaları ile tanımlanır:

- Aralarındaki uzaklık r olan iki kitle, birbirini kütleleri ile doğru, aralarındaki uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak çeker.
- Dönen bir cisim, üzerinde bulunan başka cisimler için dönme hareketinden dolayı merkezkaç kuvveti oluşturur.
- Kuvvet, ivme ve kütle çarpımına eşittir.

Buna göre yeryüzündeki bir cisme etki eden gravite (ağırlık) kuvveti,

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_C + \mathbf{F}_M = \left(G \iiint_v \frac{\rho}{r^3} \mathbf{r} dv + \mathbf{p} \omega^2 \right) m \quad (2)$$

\mathbf{F}_C kütleçekim ve \mathbf{F}_M merkezkaç kuvvetinin bileşkesidir. Burada dv yeryuvarının hacim elemanı, ρ hacim elemanının yoğunluğu, \mathbf{r} hacim elemanı ile yeryüzündeki noktasal cisim P arasındaki bağıl konum vektörü, \mathbf{p} P noktasının xy düzlemindeki konum vektörü, ω yeryuvarının açısal hızı, m P 'nin kütlesi ve üç katlı integral yeryuvarının toplam kütlelerini göstermektedir. Yeryuvarının çekim alanı içerisinde uzaydaki her noktaya \mathbf{F} ağırlık kuvveti -ya da çekilen cisim birim kitle kabul edilirse \mathbf{g} gravite vektörü- karşılık gelir. Uzayda belirli bir bölgenin her noktasında bir vektör konumun fonksiyonu olarak verilmişse, bir vektörel alandan söz edilir ki; gravite alanı, fizikte bilinen önemli vektör alanlarından biridir. Bu vektör alanının önemli özelliklerinden biri durağan olması,

$$\text{curl } \mathbf{g} = \text{rot } \mathbf{g} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ g_x & g_y & g_z \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

zamana bağlı olarak değişmemesidir. Bu durumda gravite alanı skaler bir büyüklükle başka bir deyişle gravite potansiyeli

$$W = G \iiint_v \frac{\rho}{r} dv + \frac{1}{2} p \omega^2 \quad (4)$$

ile gösterilebilir [Vaníček ve Krakiwsky, 1986]. Uzayın herhangi bir noktasında gravite potansiyeli W , (4) ile belirlenebiliyorsa yeryuvarının gravite alanı biliniyor demektir. Gerçekte bu olanaksızdır, çünkü yeryuvarının kitle yoğunluk dağılımı sadece yeryüzüne yakın bölgelerde bilinmektedir. Bu nedenle

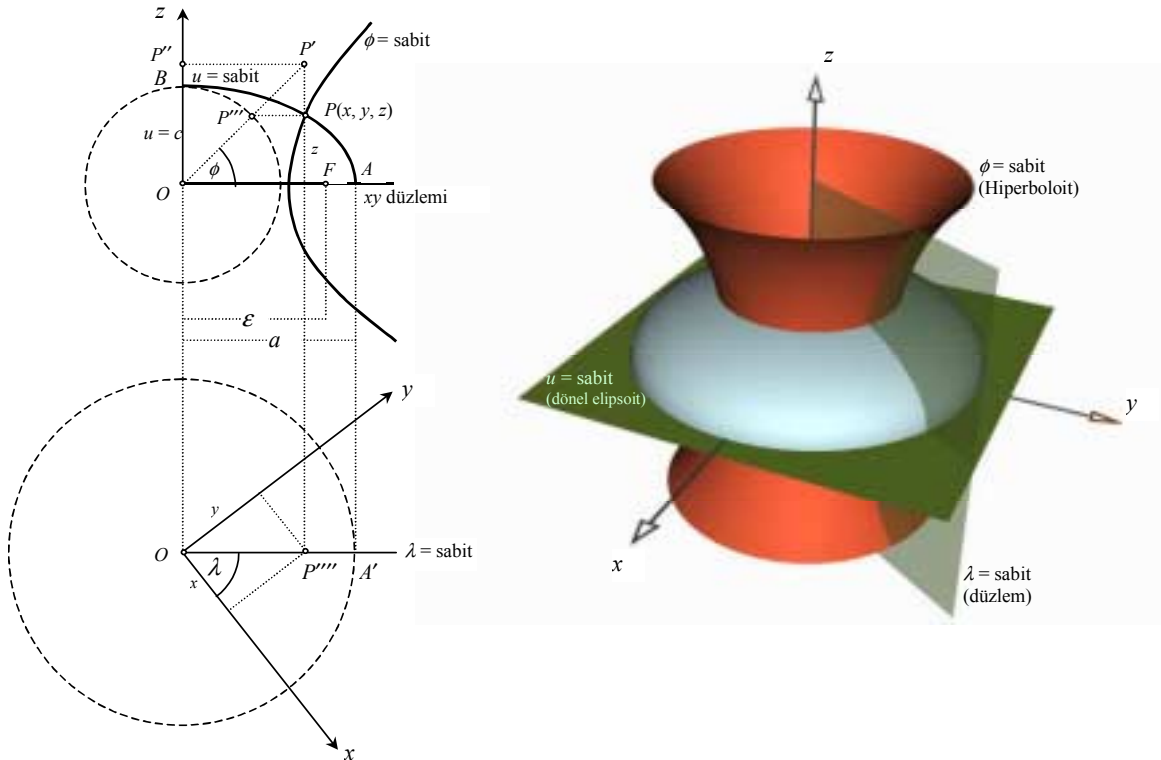
$$V = G \iiint_v \frac{\rho}{r} dv \quad (5)$$

çekim potansiyelinin belirlenmesi jeodezinin problemlerinden birini oluşturur.

3. YERYUVARININ GRAVİTE ALANI ve LAPLACE DENKLEMİ

Çekim potansiyelinde olduğu gibi matematiksel fiziğin bir çok problemde skaler bir büyüklüğü tüm uzayda konumun bir fonksiyonu olarak doğrudan gözleyemsek de belli bir bölgedeki davranışı hakkında bilgi sahibiyizdir: **Çekim potansiyeli çeken kitlelerin dışında Laplace denklemini ($\Delta V = 0$), içinde Poisson denklemini ($\Delta V = -4\pi\rho G$) sağlar.** Bu durumda V 'nin belirlenmesi problemi yeryuvarının dışında konuma bağlı harmonik bir fonksiyon bulunması şeklinde tanımlayabiliriz. Ancak öncelikle problemin geometrisine uygun bir koordinat sisteminin belirlenmesi gerekmektedir. Küre ve dönelel elipsoit söz konusu problemin çözümünde kullanılabilir. Girişte de vurgulandığı üzere dönelel elipsoit yeryuvarı için daha uygun bir modeldir. Bu nedenle burada elipsoidal koordinat sistemine göre tanımlanan Laplace diferansiyel denklemi ve sınır değer problemlerinin çözümü ele alınmıştır.

3.1 Elipsoidal Koordinatlar



Şekil 2. Elipsoidal koordinatlar

Elipsoidal koordinat sistemi (ϕ, λ, u) ,

$$\varepsilon = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (6)$$

olmak üzere eş odaklı elipsoit ve hiperboloit aileleriyle tanımlanır (Şekil 2). Bu yüzey ailelerinden biri olan ve yeryuvarını temsil eden referans elipsoidi, yüzeyin dışında (ya da içinde) harmonik bir fonksiyon belirlemek, gözlemleri fiziksel (gerçek) sınıra en uygun matematiksel yüzey üzerinde göstermek için kullanılır. Elipsoidal koordinat sisteminde bir P noktası,

$$\frac{x^2 + y^2}{u^2 + \varepsilon^2} + \frac{z^2}{u^2} = 1 \quad (7)$$

dönel elipsoit,

$$\frac{x^2 + y^2}{\varepsilon^2 \sin^2 \phi} + \frac{z^2}{\varepsilon^2 \cos^2 \phi} = 1 \quad (8)$$

tek yapraklı hiperboloit ve

$$y = x \tan \lambda \quad (9)$$

meridyen düzleminin kesişimi ile gösterilir. P noktasında bu yüzeyler ortogondur. x, y, z dik ve ϕ, λ, u elipsoidal koordinatlar arasındaki dönüşüm eşitlikleri

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{u^2 + \varepsilon^2} \cos \phi \cos \lambda \\ y &= \sqrt{u^2 + \varepsilon^2} \cos \phi \sin \lambda \\ z &= u \sin \phi \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \arctan \frac{y}{x} \\ \phi &= \arcsin \left[\frac{1}{2\varepsilon^2} \left[\varepsilon^2 - (x^2 + y^2 + z^2) + \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 - \varepsilon^2)^2 + 4\varepsilon^2 z^2} \right] \right]^{1/2} \\ u &= \left[\frac{1}{2} \left[x^2 + y^2 + z^2 - \varepsilon^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 - \varepsilon^2)^2 + 4\varepsilon^2 z^2} \right] \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (11)$$

ile verilir [Sigl, 1973; Thong ve Grafarend, 1989].

3.2 Laplace Diferansiyel Denkleminin Çözümü

Çekim potansiyeli yeryuvarının dışında harmoniktir. Herhangi bir koordinat sistemindeki harmonik seriler, Laplace diferansiyel denkleminin çözümünü oluşturur.

Aynı çözüm, problemin geometrisine en uygun koordinat sistemi olan elipsoidal koordinat sisteminde de elde edilebilir. Bunun için öncelikle Laplace kısmi diferansiyel denklemi elipsoidal koordinatlarla gösterilmelidir.

Ortogonal elipsoidal koordinat sisteminde çekim potansiyeli V 'nin skaler Laplasiyeni,

$$\Delta V = \text{div grad} V = \frac{1}{\sqrt{g}} \left[\frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\sqrt{g}}{g_{\phi\phi}} \frac{\partial V}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{\sqrt{g}}{g_{\lambda\lambda}} \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) + \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\sqrt{g}}{g_{uu}} \frac{\partial V}{\partial u} \right) \right] \quad (12)$$

ile gösterilir. Burada $g_{\phi\phi}$, $g_{\lambda\lambda}$, g_{uu} elipsoidal koordinat sistemine ilişkin metrik katsayılar; g , metrik tensörün determinantıdır:

$$g_{\phi\phi} = u^2 + \varepsilon^2 \sin^2 \phi, \quad g_{\lambda\lambda} = (u^2 + \varepsilon^2) \cos^2 \phi, \quad g_{uu} = \frac{u^2 + \varepsilon^2 \sin^2 \phi}{u^2 + \varepsilon^2} \quad (13)$$

$$g = g_{\phi\phi} g_{\lambda\lambda} g_{uu} \quad (14)$$

(13) ve (14), (12)'de yerlerine konulursa elipsoidal koordinatlarla Laplace denklemi,

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{1}{(u^2 + \varepsilon^2 \sin^2 \phi) \cos \phi} \left[\frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial V}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{u^2 + \varepsilon^2 \sin^2 \phi}{(u^2 + \varepsilon^2) \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) + \frac{\partial}{\partial u} \left((u^2 + \varepsilon^2) \cos \phi \frac{\partial V}{\partial u} \right) \right] \\ &= \frac{1}{u^2 + \varepsilon^2 \sin^2 \phi} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} + \tan \phi \frac{\partial V}{\partial \phi} + \frac{u^2 + \varepsilon^2 \sin^2 \phi}{(u^2 + \varepsilon^2) \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} + (u^2 + \varepsilon^2) \frac{\partial^2 V}{\partial u^2} + 2u \frac{\partial V}{\partial u} \right] = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

elde edilir [Heiskanen ve Moritz, 1984].

(15)'in çözümünde kısmi diferansiyel denklemlerinin temel çözüm yöntemlerinden biri olan değişkenlere ayırıştırma yönteminden yararlanılır. Bunun için çekim potansiyelinin bağımsız üç fonksiyonun çarpımına

$$V(\phi, \lambda, u) = \Phi(\phi) \Lambda(\lambda) U(u) \quad (16)$$

eşit olduğu öngörülür. (16), (15)'de yerine konursa Φ , Λ ve U için üç ayrı adi diferansiyel denklem elde edilir (Stäckel matrisi kullanılarak bu sonuca daha kolay ulaşılabilir. Bak. Moon ve Spencer [1971], s.5). ϕ , λ , u 'ya bağımlı her adi diferansiyel denklem için ayrı bir çözüm gerçekleştirilirse

$$\begin{aligned} \Phi(\phi) &= P_{nm}(\sin \phi) \text{ ya da } Q_{nm}(\sin \phi) \\ \Lambda(\lambda) &= \cos m\lambda \text{ ya da } \sin m\lambda \\ U(u) &= P_{nm}(iu/\varepsilon) \text{ ya da } Q_{nm}(iu/\varepsilon) \end{aligned} \quad (17)$$

çıkar. Burada $m \leq n$ olmak üzere n ve m pozitif tamsayı, P_{nm} ve Q_{nm} sırasıyla bütünleşik birinci ve ikinci tür Legendre fonksiyonudur. “ Φ , Λ ve U ’ya ilişkin diferansiyel

denklemler doğrusal olduğundan bunların çözümlerinin doğrusal kombinasyonu da bir çözümdür” kuralı göz önüne alınır ve bunlar (16)’da yerlerine konulursa elipsoidal koordinat sisteminde Laplace diferansiyel denkleminin çözümü

$$V(\phi, \lambda, u) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n Q_n(iu/\varepsilon) P_{nm}(\sin \phi) [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] \quad (18)$$

elde edilir [Hobson, 1931; Heiskanen ve Moritz, 1984]. Burada C_{nm}, S_{nm} keyfi sayılardır.

4. LAPLACE DENKLEMİ İÇİN JEODEZİK SINIR DEĞER PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ ve GLOBAL JEOPOTANSİYEL MODEL

Yeryuvarının gravite alanının belirlenmesi potansiyel kuramının sınır değer problemlerinin çözümü ile özdeştir. Sınır değer problemi, sınır yüzey üzerindeki limit değerlerini kullanarak yüzeyin dışında harmonik bir fonksiyonun bulunması şeklinde tanımlanır. Burada sözü edilen sınır değerler yeryüzünde gözlenen gravite anomalileri, jeopotansiyel sayılar ve denizlerdeki altimetre verilerinden türetilen gravite anomalileridir. Çözüm üç aşamada gerçekleştirilir: 1) tüm uzayda bilinmeyen bir fonksiyonun belirli bir bölgedeki davranışının (alan özelliklerinin) belirlenmesi, 2) bilinmeyen fonksiyonun (ya da fonksiyonlarının) bir sınır yüzey üzerindeki değerlerinin gözlenmesi, gözlem denklemlerinin oluşturulması ve doğrusallaştırılması, 3) gereğinden fazla gözlemler yardımıyla bilinmeyen parametrelerin dengeleme yoluyla kestirilmesi. Ana hatlarıyla global gravite alanının belirlenmesi probleminin matematiksel tanımı aşağıdaki gibi yapılabilir:

$$\left. \begin{array}{l} \text{div grad } V = 0 \\ \text{div grad } V = -4\pi\rho G \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{yeryuvarının dışında} \\ \text{yeryuvarının içinde} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{div grad } V = 0 \\ \text{div grad } V = -4\pi\rho G \end{array}} \right\} \text{Diferansiyel denklemler} \quad (19a)$$

$$\left. \begin{array}{l} |\text{grad } V| = b \\ V = V \\ V = V_0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{yeryüzünde} \\ \text{yeryüzünde} \\ \text{jeoitte} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} |\text{grad } V| = b \\ V = V \\ V = V_0 \end{array}} \right\} \text{Sınır değerler} \quad (19b)$$

$$\left. \begin{array}{l} V = \frac{GM}{r} + O\left(\frac{1}{r^2}\right) \end{array} \right\} \text{sonsuzda } (r \rightarrow \infty) \quad \left. \vphantom{V = \frac{GM}{r} + O\left(\frac{1}{r^2}\right)} \right\} \text{Sonsuzda düzenlilik} \quad (19c)$$

Merkezkaç kuvveti, astronomik gözlemler yardımıyla belirlenebildiğinden yeryuvarının gravite alanının belirlenmesinde bir problem oluşturmaz. Bu nedenle (19) eşitlikleri merkezkaç kuvvetinin etkisinden arındırılmıştır.

(18) bağıntısı elipsoidal koordinatlara göre Laplace diferansiyel denkleminin çözümüdür. Bundan sonraki adım elipsoit yüzeyine indirgenmiş sınır değerler yardımıyla C_{nm}, S_{nm} katsayılarını belirlemektir. Bu dış gravite alanının elipsoidal harmoniklerle gösterimi için gereklidir.

(18), (19b)’de gösterilen sınır koşulları sağlamalıdır. Bu durumda elipsoit yüzeyinde

$$f(\phi, \lambda, u = b) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n Q_{nm}(ib/\varepsilon) P_{nm}(\sin \phi) [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] \quad (20)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada f elipsoit yüzeyi üzerindeki V 'ye karşılık gelir (Dirichlet koşulu). Öteki sınır koşulları için de (20)'e benzer denklemler oluşturulabilir. $P_{nm}(\sin \phi) \cos m\lambda$ ve $P_{nm}(\sin \phi) \sin m\lambda$ elipsoidal yüzey harmoniklerinin ortogonalite özelliği

$$\frac{1}{S_e} \iint_s w(\phi, \lambda) \left(P_{nm}(\sin \phi) \begin{Bmatrix} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{Bmatrix} \right)^2 ds = 1 \quad (21a)$$

$$\frac{1}{S_e} \iint_s w(\phi, \lambda) \left(P_{nm}(\sin \phi) \begin{Bmatrix} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{Bmatrix} \right) \left(P_{sr}(\sin \phi) \begin{Bmatrix} \cos r\lambda \\ \sin r\lambda \end{Bmatrix} \right) ds = 0 \quad (21b)$$

elipsoit yüzeyi üzerinde bilinen f değerlerine göre katsayıların belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Burada S_e elipsoit yüzeyinin alanını, ds yüzey elemanını gösterir. $w(\phi, \lambda)$, yüzey harmoniklerinin elipsoit yüzeyi üzerinde ortogonal olmasını sağlayan ağırlık fonksiyonudur [Arfken, 1985; Thong ve Grafarend, 1989]. (20) eşitliğinin her iki yanını, C_{nm} için $P_{nm}(\sin \phi) \cos m\lambda$, S_{nm} için $P_{nm}(\sin \phi) \sin m\lambda$ ile çarpılıp, elipsoit yüzeyi üzerinde her iki tarafın integrali alınırsa (21a) ve (21b)'den

$$\begin{Bmatrix} C_{nm} \\ S_{nm} \end{Bmatrix} = \frac{1}{Q_{nm}(ib/\varepsilon)} \frac{1}{S_e} \iint_s w(\phi', \lambda') f(\phi', \lambda') P_{nm}(\sin \phi') \begin{Bmatrix} \cos m\lambda' \\ \sin m\lambda' \end{Bmatrix} ds \quad (22)$$

ç çıkar. Böylelikle elipsoidal katsayılar elipsoit yüzeyi üzerindeki $f(\phi', \lambda')$ sınır değerlerinden elde edilmiş olur. C_{nm} ve S_{nm} katsayılarının (22) yardımıyla bulunması elipsoidal harmonik analiz olarak da bilinir. Katsayılar (18)'de yerine konursa elipsoit dışında harmonik bir fonksiyon olan çekim potansiyeli

$$V(\phi, \lambda, u) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{Q_{nm}(iu/\varepsilon)}{Q_{nm}(ib/\varepsilon)} P_{nm}(\sin \phi) [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] \quad (23)$$

elde edilir.

Uygulama açısından (22) ve (23) bağıntılarının hesaplamalar için doğrudan kullanılması elverişli değildir. Özellikle açınının yüksek dereceli terimleri için Legendre fonksiyonları hızla sifira yaklaşır yani kararsızdır. Bu nedenle uygulamada Q_{nm} , P_{nm} ve C_{nm} , S_{nm} yerine onlardan belli bir oranda sapan tam normalleştirilmiş \bar{Q}_{nm} , \bar{P}_{nm} ve \bar{C}_{nm} , \bar{S}_{nm} kullanılır. [Bak. Heiskanen ve Moritz, 1984; s41].

4.1 Küresel Harmonik Katsayılardan Elipsoidal Harmonik Katsayılara Dönüşüm

(19) ile tanımlanan jeodezik sınır değer probleminin çözümü için küre yaklaşımı uygulanırsa (1) elde edilir. Elipsoidal harmonik katsayılar ikinci bir yöntem olarak küresel harmonik katsayılardan da dönüştürülebilir. İlk olarak Jekeli [1988] tarafından yayımlanan elipsoidal ve küresel harmonik açınım arasındaki tam dönüşüm eşitlikleri, Sona [1996], Thong ve Grafarend [1989], Yu ve Cao [1995] tarafından da incelenmiştir. Burada söz konusu çalışmaların bir özeti verilmiştir. Bir karışıklılığa neden olmamak için küresel harmonik katsayılar s , elipsoidal harmonik katsayılar e üst indisi ile gösterilecektir.

İki katsayı kümesi arasındaki dönüşüm dolu elipsoit ve küre harmonikleri arasındaki ilişkiden yararlanarak elde edilir. Sonuç olarak dönüşüm

$$\lambda_{nmk} = \frac{\sqrt{(n-2k-m+1)(n-2k-m+2)(n-2k+m+1)}}{2k(2n-2k+1)} \times \sqrt{\frac{(n-2k+m+2)(2n-4k+1)}{2n-4k+5}} \left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^2 \lambda_{nm,k-1} \quad \forall \lambda_{nm0} = 1, k \geq 1 \quad (24)$$

olmak üzere

$$\begin{Bmatrix} \bar{C}_{nm}^e \\ \bar{S}_{nm}^e \end{Bmatrix} = \bar{Q}_{nm}(b/\varepsilon) \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \lambda_{nmk} \begin{Bmatrix} \bar{C}_{n-2k,m}^s \\ \bar{S}_{n-2k,m}^s \end{Bmatrix} \quad (25)$$

yardımla gerçekleştirilir. Toplam işlemi $(n-m)/2$ 'nin tam değerine ulaşıncaya kadar devam ettirilir.

4.2 Legendre Fonksiyonları

Legendre diferansiyel denklemi, Laplace denkleminin değişkenlere ayrıştırılmasından sonra elde edilen üç adi diferansiyel denklemden biridir. Legendre fonksiyonları bu denklemin çözümü olarak karşımıza çıkar. Uygulamada onların açık formülleri yerine yineleme bağıntıları kullanılır. Aşağıda, birinci ve ikinci tür Legendre fonksiyonlarının hesabı için gerekli formüller verilmiştir (fonksiyonlar hakkında daha ayrıntılı bilgi için Arfken [1985] ve Hobson [1931]'e bakınız).

Tam normalleştirilmiş birinci tür Legendre fonksiyonları,

$$\begin{aligned} \bar{P}_{00}(\sin \phi) &= 1 & \bar{P}_{20}(\sin \phi) &= \frac{\sqrt{5}}{2}(3\sin^2 \phi - 1) \\ \bar{P}_{10}(\sin \phi) &= \sqrt{3} \sin \phi & \bar{P}_{21}(\sin \phi) &= \sqrt{15} \sin \phi \cos \phi \\ \bar{P}_{11}(\sin \phi) &= \sqrt{3} \cos \phi & \bar{P}_{22}(\sin \phi) &= \frac{\sqrt{15}}{2} \cos^2 \phi \end{aligned} \quad (26)$$

başlangıç değerleri kullanılarak

$$\begin{aligned} \bar{P}_{nn}(\sin \phi) &= \frac{\sqrt{2n+1}}{\sqrt{2n}} \cos \phi \bar{P}_{n-1,n-1}(\sin \phi) \quad , \quad \bar{P}_{n,n-1}(\sin \phi) = \frac{\sqrt{2n+1}}{\sqrt{2(n-1)}} \cos \phi \bar{P}_{n-1,n-2}(\sin \phi) \\ \bar{P}_{nm}(\sin \phi) &= \frac{\sqrt{4n^2-1}}{\sqrt{n^2-m^2}} \sin \phi \bar{P}_{n-1,m}(\sin \phi) - \frac{\sqrt{(2n+1)(n+m-1)(n-m-1)}}{\sqrt{(n^2-m^2)(2n-3)}} \bar{P}_{n-2,m}(\sin \phi) \end{aligned} \quad (27)$$

yineleme bağıntıları ile hesaplanabilir.

Tam normalleştirilmiş ikinci tür Legendre fonksiyonları, yeryuvarının dış çekim alanının elipsoidal harmoniklerle gösteriminde kullanılır. Ancak birinci tür Legendre fonksiyonlarının aksine ikinci tür Legendre fonksiyonlarıyla kompleks sayılar elde edilir. Sonuçlar daha sonra gerçek değerlere dönüştürülse bile, n (derece) arttıkça sonuçlar hızla kararsızlaşır. Gerçek değerli ve kararlaştırılmış sonuçlar elde etmek için Thong ve Grafarend [1989]

$$\bar{Q}_{nmk}(u/\varepsilon) = \frac{(1-n-m-2k)(n+m+2k)}{2k(2n+2k+1)(u/\varepsilon)^2} \bar{Q}_{nm,k-1}(u/\varepsilon) \quad \forall k \geq 1 \quad (28)$$

$$\bar{Q}_{nm,0}(u/\varepsilon) = \left(\frac{\sqrt{u^2 + \varepsilon^2}}{u} \right)^m \left(\frac{a}{u} \right)^{n+1} \quad (29)$$

bağıntılarının kullanılmasını önermiştir. \bar{Q}_{nm} kesin değerine ulaşıncaya kadar yineleme devam ettirilir. Bu işlem bilgisayarda istenen bir duyarlılıkta kontrol edilebilir.

(28) ve (29) bağıntıları işlemci hızına bağlı olarak bilgisayarda yoğun bir hesap işlemi gerektirir. Özellikle yüksek dereceli (360'dan daha büyük) açınımlar ve çok sayıda nokta için değerlendirme yapılması durumunda sonuçların elde edilmesi uzun zaman alır. Sona [1995] Elipsoidin üzerinde sınırlı bir tabakaya kadar ($b \leq u \leq b + 6400 \text{ m}$) (28) ve (29) yerine

$$\bar{Q}_{nm}^{(1)}(u/b) = \frac{\bar{Q}_{nm}(u/\varepsilon)}{\bar{Q}_{nm}(b/\varepsilon)} \cong \left(\frac{b}{u} \right)^{n+1} \left[1 + e^2 \left(\frac{u}{b} - 1 \right) \frac{(n+1)(n+2) + m^2}{2n+3} \right] \quad (30)$$

yaklaşımının kullanılabileceğini göstermiştir.

4.3 Sayısal Uygulama

Yeryuvarının gravite alanının elipsoidal harmoniklerle gösterilmesine ilişkin bir uygulama, EGM96 [Lemonie vd., 1996] jeopotansiyel model katsayılarıyla gerçekleştirilmiştir.

EGM96 çekim potansiyeli V 'nin küresel harmonik açınımidir. Açınımın maksimum derece ve sırası 360 dır. Katsayıları uydu gözlem verileri, yersel gravite ve uydu

altimetre verileriyle belirlenen model, $GM = 3986004.415 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{s}^2$ ve $a = 6378136.3 \text{ m}$ yeryuvarı jeodezik parametrelerini kullanır.

Tablo 1: EGM96 küre ve elipsoit harmoniklerine ilişkin bazı katsayılar

n	m	Küre		Elipsoit	
		\bar{C}_{nm}^s	\bar{S}_{nm}^s	\bar{C}_{nm}^e	\bar{S}_{nm}^e
0	0	1.000000000000E+00	0.000000000000E+00	1.00111910480E+000	0.000000000000E+000
1	0	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+000	0.000000000000E+000
1	1	0.000000000000E+00	0.000000000000E+00	0.000000000000E+000	0.000000000000E+000
2	0	-4.84165371736E-04	0.000000000000E+00	5.15995468590E-004	0.000000000000E+000
2	1	-1.86987635955E-10	1.19528012031E-09	-1.87706139063E-010	1.19987300409E-009
2	2	2.43914352398E-06	-1.40016683654E-06	2.44499802884E-006	-1.40352755864E-006
3	0	9.57254173792E-07	0.000000000000E+00	9.62981745110E-007	0.000000000000E+000
3	1	2.02998882184E-06	2.48513158716E-07	2.04137405368E-006	2.49906949607E-007
3	2	9.04627768605E-07	-6.19025944205E-07	9.08684808689E-007	-6.21802128129E-007
3	3	7.21072657057E-07	1.41435626958E-06	7.22957624436E-007	1.41805356056E-006
4	0	5.39873863789E-07	0.000000000000E+00	-2.52340887304E-007	0.000000000000E+000
4	1	-5.363221616971E-07	-4.73440265853E-07	-5.40263436622E-007	-4.76914574342E-007
4	2	3.50694105785E-07	6.62671572540E-07	3.59725194060E-007	6.63040469209E-007
4	3	9.90771803829E-07	-2.00928369177E-07	9.95620489706E-007	-2.01911681926E-007
4	4	-1.88560802735E-07	3.08853169333E-07	-1.89079401838E-007	3.09702608741E-007
5	0	6.85323475630E-08	0.000000000000E+00	7.49051710185E-008	0.000000000000E+000
5	1	-6.21012128528E-08	-9.44226127525E-08	-5.11340153430E-008	-9.38679275785E-008
5	2	6.52438297612E-07	-3.23349612668E-07	6.62145949091E-007	-3.28971308583E-007
5	3	-4.51955406071E-07	-2.14847190624E-07	-4.52836884119E-007	-2.11878164177E-007
5	4	-2.95301647654E-07	4.96658876769E-08	-2.96830499705E-007	4.99230206623E-008
5	5	1.74971983203E-07	-6.69384278219E-07	1.75469712591E-007	-6.71288424365E-007
6	0	-1.49957994714E-07	0.000000000000E+00	-1.51828078566E-007	0.000000000000E+000
6	6	9.67616121092E-09	-2.37192006935E-07	9.70435574886E-009	-2.37883140422E-007
7	7	1.09185148045E-09	2.44415707993E-08	1.09509071820E-009	2.45140825468E-008
8	8	-1.24092493016E-07	1.20533165603E-07	-1.24465828881E-007	1.20895793128E-007
9	9	-4.77475386132E-08	9.66412847714E-08	-4.78928040597E-008	9.69353028462E-008
10	10	1.00538634409E-07	-2.40148449520E-08	1.00847320252E-007	-2.40885782259E-008
20	20	4.01448327968E-09	-1.20450644785E-08	4.02735733169E-009	-1.20836918125E-008
36	36	4.60146465720E-09	-5.94245336314E-09	4.61652963141E-009	-5.96190866994E-009
60	60	4.23068069789E-09	3.92983780545E-10	4.24468053840E-009	3.94284211998E-010
120	120	-4.56798788660E-10	-1.59135018852E-09	-4.58322790469E-010	-1.59665935445E-009
180	180	-4.06572704272E-10	-5.87726119822E-10	-4.07932878222E-010	-5.89692335825E-010
240	240	-2.30780589856E-10	-4.60857985599E-11	-2.31553725785E-010	-4.62401901694E-011
300	300	-5.02336888312E-11	-1.01275530680E-10	-5.04021161973E-011	-1.01615095050E-010
360	360	-4.47516389678E-25	-8.30224945525E-11	-4.49017689867E-025	-8.33010132608E-011

Elipsoidal harmonik gösterim, yukarıdakilerin yanı sıra referans elipsoidinin dış merkezliğinin de bilinmesini gerektirir. Bu uygulamada WGS84 elipsoidine ilişkin $\varepsilon = 521854.008423 \text{ m}$ değeri kullanılmıştır. Küresel harmonik katsayılarından elipsoidal harmonik katsayılara dönüşüm (25) bağıntısıyla yapılır. Bunun için öncelikle b hesaplanmalıdır. b , EGM96 jeopotansiyel modeli için belirlenen ekvatorial yarıçap a ve doğrusal dışmerkezlik ε ile tanımlı elipsoidin küçük yarıksenidir. İkinci tür Legendre fonksiyonlarının hesabı için (28) ve (29) bağıntıları kullanılmıştır. Bu yoğun bir hesap işlemi gerektirdiği için uygun bir yazılım dilinin seçilmesi önemlidir. Bu nedenle algoritmalar Microsoft Visual C++ 6'da hazırlanmıştır. Küre ve elipsoit harmoniklerine ilişkin katsayıların bazıları Tablo 1'de verilmiştir.

5. SONUÇ

Yeryuvarının dış çekim potansiyeli Laplace denkleminin çözümünü veren harmonik fonksiyonlar yardımıyla gösterilebilir. Bu çalışmada günümüze değin yaygın bir kullanıma sahip küresel harmoniklere seçenек olarak elipsoidal harmonikler tanıtılmıştır. Yeryuvarının çekim alanının belirlenmesi probleminde çözüm, Laplace denklemi ve sınır değer problemlerinin yeryuvarının geometrisine en uygun referans yüzeye göre oluşturulmasıyla başlar. Küre ya da elipsoit olmak üzere iki seçenек vardır.

Çeken kitlelerin dışında çekim potansiyelinin harmonik olduğu gerçeği göz önüne alınırsa hesap yüzeyi kitleleri kuşatmalıdır. Yeryuvarının ekvatorial yarıçapına eşit bir küre tüm kitleleri kuşatmasına karşın kutuplardaki basıklık göz ardı edilmiş olur. Bu nedenle geometrik referans yüzeyi olarak da kullanılan dönelel elipsoit, yeryuvarının çekim potansiyelinin gösteriminde de referans yüzeyi olarak kullanılabilir.

Elipsoidal harmonik açınının matematiksel temeli oldukça eski olmasına karşın, sayısal değerlendirmedeki güçlükler nedeniyle uygulamaya geçirilişi yenidir. Özellikle ikinci tür Legendre fonksiyonu yoğun bir hesap işlemi gerektirmektedir. Ancak son zamanlardaki bilgisayar olanaklarının genişlemesi ve matematiksel kurama ilişkin yeni yaklaşımlar ile bu sorun önemli ölçüde aşılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Gleason, D.M., Comparing Ellipsoidal Corrections to the Transformation between the Geopotential's Spherical and Ellipsoidal Spectrums, *Manuscripta Geodetica*, 13: 114-129, 1988.
- Heiskanen, W. ve Moritz, Fiziksel Jeodezi, (Ç: Onur GÜRKAN), Karadeniz Üniversitesi Basımevi, Trabzon, 1984.
- Hobson, E.W., *The Theory of Spherical and Ellipsoidal Harmonics*, Cambridge University Press, 1931.
- Jekeli, C., The Exact Transformation Between Ellipsoidal and Spherical Harmonic Expansions, *Manuscripta Geodetica*, 13: 106-113, 1988.
- Lemoine, F.G., D.E. Smith, L. Kunz, R. Smith, E.C. Pavlis, N.K. Pavlis, S.M. Kolosko, D.S. Chinn, M.H. Torrence, R.G. Williamson, C.M. Cox, K.E. Rachlin, Y.M. Wang, S.C. Kenyon, R. Salman, R. Trimmer, R.H. Rapp, R.S. Nerem, The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model. In: *Proc of International Symposium on Gravity Geoid and Marine Geodesy*, Vol. 117, Springer Verlag, 1996.
- Martinez, Z., Boundary-Value Problems for Gravimetric Determination of a Precise Geoid, *Lecture Notes in Earth Sciences*, 73, Springer, Berlin, 1998.
- Moon P. Ve Spencer, D.E., *Field Theory Handbook*, Springer, New York, 1971.
- Pavlis, N.K., Development and Applications of Geopotential Models, 101-147, International School for the Determination and Use of the Geoid, *Lecture Notes*, International Geoid Service, 1997.
- Rapp, R.H., Global Models for the 1 cm Geoid Present Status and Term Prospects, 273-311, *Geodetic Boundary Value Problems in View of the One Centimeter Geoid*, *Lecture Notes in Earth Sciences*, 65, F. Sanso ve R. Rummel (Derl.), Springer, Berlin, 1997.
- Sigl, R., *Einführung in die Potentialtheorie*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1973.
- Sona, G., Numerical Problems in the Computation of Ellipsoidal Harmonics, *Journal of Geodesy*, 70: 117-126, 1995.
- Thong, N.C. ve Grafarend, E.W., A Spheroidal Harmonic Model of the Terrestrial Gravitational Field, *Manuscripta Geodetica*, 14: 285-304, 1989.
- Vaniček, P. ve Krakiwsky, E., *Geodesy: The Concepts*, Second Edition, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1986.

Yu, J. ve Cao, H., Elliptical Harmonic Series and the Original Stokes Problem with the Boundary of the Reference Ellipsoid, Journal of Geodesy, 70: 431-439, 1996.

YAYIN VE IGS HASSAS EFEMERİSLERİNİN BİR GPS TEST AĞINDA KARŞILAŞTIRILMASI VE İNCELENMESİ

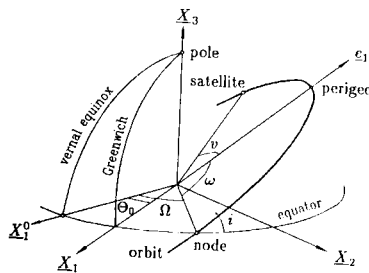
Metin SOYCAN, Arzu SOYCAN

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü,
Ölçme Tekniği Anabilim Dalı, Barbaros Bulvarı Beşiktaş-Yıldız/İSTANBUL
e-mail: soycan@yildiz.edu.tr, topbas@yildiz.edu.tr

Özet: Bilindiği gibi, pratikte kullanılan yayın efemerisi olup, bu efemeris 5 kontrol istasyonundan elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle, ilgili GPS haftasına bağlı olarak referans alınan yörüngedeki uydu bilgileri ile oluşturulmaktadır. Pratikte bir çok GPS uygulamasında yayın efemerisinin sağladığı duyarlık yeterli olmaktadır. Oysa yüksek duyarlık gerektiren mühendislik ve jeodezik uygulamalarda, söz konusu yüksek duyarlığa erişebilmek için bir çok parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Bunlardan birisi de uydu yörünge bilgilerinin iyileştirilmesidir. IGS tüm yeryüzüne dağılmış yaklaşık 300 noktada kesintisiz 24 saat boyunca 30sn aralıklarla yapılan gözlemlerin değerlendirilmesi ile haftalık hassas efemerisler belirlenmektedir. Bu efemerislere internet aracılığı ile ulaşılabilmek ve pratikte kullanılabilirlik mümkündür. Bu çalışma kapsamında oluşturulan 8 nokta ve bu noktaların birbirleriyle oluşturduğu 22 baz vektöründen oluşan test ağı 3-6 saat süreli oturumlar ile ölçülmüş ve hem yayın efemerisi hem de IGS hassas efemerisi ile kullanılarak değerlendirilmiş ve baz vektörleri çözülmüş, her iki çözüm arasındaki farklar irdelenerek yorumlanmış ve hassas efemerisin nokta konumları üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

Jeodezik ölçme teknikleri arasında, günümüzde en yaygın olan GPS ölçme tekniği, bilindiği gibi uzay, kullanıcı ve kontrol birimi olarak üç ana birimden oluşmaktadır. Uzay birimi içerisinde yer alan uyduların, hareketleri ve konumları yani yörüngeleri, yer izleme istasyonlarından yapılan ölçülerle belirlenmekte ve uydu konum bilgilerinin bulunduğu efemeris verileri oluşturulmaktadır. Uydu hareketleri Kepler yasaları ile ifade edilmekte ve uydu konumu Şekil 1'de verilen 6 Kepler yörünge parametresi ile tanımlanmaktadır [Aydın, Ö vd., 2001].



- Ω : Yükselen düğüm noktasının rektasansiyonu
- i : Yörünge eğimi
- w : Perige noktasının yüksekliği
- a : Elipsin büyük yarı eksenini
- e : Yörünge eksantrisitesi
- f : Gerçek anamoli

Şekil 1: Kepler yörünge parametreleri

Yeryüzündeki herhangi bir noktanın konumunun belirlenmesinde, içerisinde uydu yörünge bilgilerinin bulunduğu efemeris verileri kullanılmaktadır. Efemeris verileri, kepler yörünge bilgileri ile birlikte uyduların anlık konumlarını ifade etmektedir. Bilinen uydu koordinatları ve taşıyıcı faz, pseudorange ve doppler verileri ile uydu alıcı uzaklıklarının belirlenmesi ile nokta koordinatları hesaplanabilmektedir. Yukarıda da değinildiği gibi, uydu koordinatları efemeris bilgileri içerisinde yer almakta ve GPS ile ölçülen baz vektörü ve nokta konum doğrulukları, büyük ölçüde efemeris, yani uydu koordinatlarının doğruluğuna bağlı olarak değişmektedir. Jeodezik amaçlı GPS ölçmeleri rölatif konum belirleme ilkesine göre yapılmakta ve konumu bilinen nokta ile konumu belirlenecek nokta arasındaki b baz vektörü ölçülmektedir. Uydu koordinatlarının doğruluğu ile ölçülen baz vektörü doğruluğu arasındaki ilişki;

$$\frac{\sigma_r}{r} = \frac{\sigma_b}{b} \quad (1)$$

eşitliği ile tanımlanabilir [Remondi ve Hoffman-Wellenhof, 1989]. Burada;

σ_r :Uydu konum hatası

σ_b :Ölçülen bazın hatası

r :Uydu ile alıcı arasındaki uzaklık

b :Ölçülen bazın uzunluğunu ifade etmektedir.

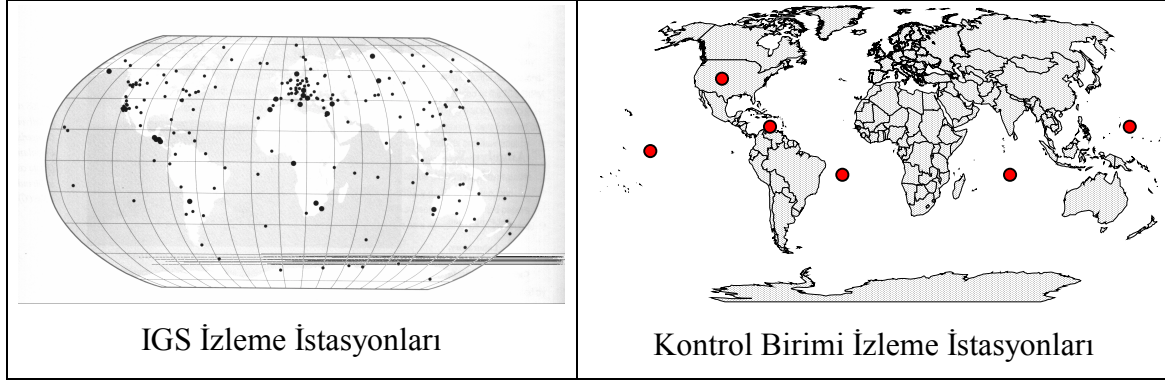
Pratikte kullanılan efemeris, GPS'in kontrol birimini oluşturan 6 noktadan yapılan ölçülerle elde edilen yayın efemerisidir. Yayın efemerisi, bir çok uygulamada yeterli doğruluğu sağlarken; yüksek duyarlık gerektiren uygulamalar için yeterli olmayabilmektedir. Böyle durumlarda, yayın efemerisi yerine, daha fazla kontrol noktası kullanılarak oluşturulan IGS hassas efemerisleri kullanılabilir. Bu çalışmada, yayın ve hassas efemerislerin sunmuş olduğu doğrulukların araştırılması için duyarlı konumları ITRF94 sisteminde bilinen nirengi noktalarında 6-10 saat aralığında değişen GPS ölçüleri yapılarak, yayın ve IGS hassas efemeris kullanılarak ayrı ayrı değerlendirilmeler yapılmış elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. GPS UYDU EFEMERİSLERİ

2.1 Yayın Efemerisi

Bilindiği gibi GPS kontrol birimi izleme ve kontrol istasyonlarından oluşmaktadır. Bu istasyonlar tüm GPS uydularından pseudorange, doppler ve taşıyıcı faz gibi izleme ölçümü yapmaktadır. Bu dataların değerlendirilmesi, ilgili GPS haftasına bağlı olarak referans alınan yörüngedeki uydu bilgileri ile yapılmaktadır. Referans yörüngesiyle, 12-24 saatlik son izleme dataları kullanılarak birtakım algoritmalarla yörünge belirlenebilir. Yörüngelerin daha sonraki konumları ekstrapolasyon ile tespit edilmektedir. Ekstrapolasyon birkaç gün için yapılabilmesine rağmen, esas alınan günlük prediksyondur. 24 saati aşan bir yayın yörünge her saat için ekstrapole edilmiş yay kullanılarak tanımlanmaktadır. 6 istasyonda toplanan verilerden uyduların zamana

bağlı olarak koordinatlarının prediksyonu yapılmaktadır. Kullanıcı birim broadcast efemerise navigasyon mesajından ulaşabilir. GPS alıcıları saniyede 50 bit olacak şekilde broadcast mesajı toplar. Bu mesaj uyduların yörüngeleri, saatleri ve durumları hakkında bilgi vermektedir[Hoffman-Wellenhof, vd., 1997].



Şekil 2: IGS ve kontrol birimi izleme istasyonları

2.2 IGS Hassas Efemerisi

IGS(International GPS Service for geodynamics) 1989 yılında GPS ürünleri ile jeodezik ve jeofizik araştırmalara destek olmak, dünya çapında kurulan global bir GPS ağı ile bir takım çalışmaları kolaylaştırmak ve GPS uygulamaları için söz konusu çalışmaları standartlaştırmak amacıyla kurulmuş bir kuruluştur. Tüm yeryüzüne dağılmış ve sayıları 2002 yılı itibarıyla 295 olan jeodezik standartlara sahip sürekli izleme istasyonuna sahiptir. İzleme istasyonlarından elde edilen veriler 3 global veri merkezinde ve 6 bölgesel veri merkezinde arşivlenmektedir. 8 ayrı analiz merkezinde, söz konusu veriler düzenli olarak değerlendirilmekte ve merkez analiz koordinatörüne gönderilmekte, burada irdelenerek kullanıcılara yayınlanmaktadır.IGS global izleme istasyonlarından elde ettiği verileri;

- Yüksek doğruluklu GPS uydu efemerisleri
- Yer dönme parametreleri
- IGS izleme istasyonları koordinatları ve bu noktalara ait hız vektörleri
- GPS uydu ve IGS izleme istasyonlarına ilişkin saat bilgileri
- Zenit gecikmeleri

oluşturmak için kullanılmaktadır. IGS tarafından oluşturulan hassas yörüngeler üç farklı tipte olup bunlar, IGS sonuç(IGS final), IGS hızlı(IGS rapid), IGS Kestirim(IGS Predicted/IGS Ultra Rapid) olarak sıralanabilir. Bu farklı yörünge tiplerine ilişkin doğruluk ve diğer bilgiler tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1:IGS yörünge ürünleri

GPS UYDU EFEMERİSİ	DOĞRULUK	ELDE ETME SÜRESİ	GÜNCELLEME	ÖRNEKLEME ARALIĞI
Yayın Efemerisi	~260cm	Anlık		Günlük
Kestirim(Ultra Hızlı)	~25cm	Anlık	Günde iki kere	15 dakika
Hızlı	5cm	17 saat	Günde bir kere	15 dakika
Sonuç	<5cm	~13 gün	Haftada bir kere	15 dakika

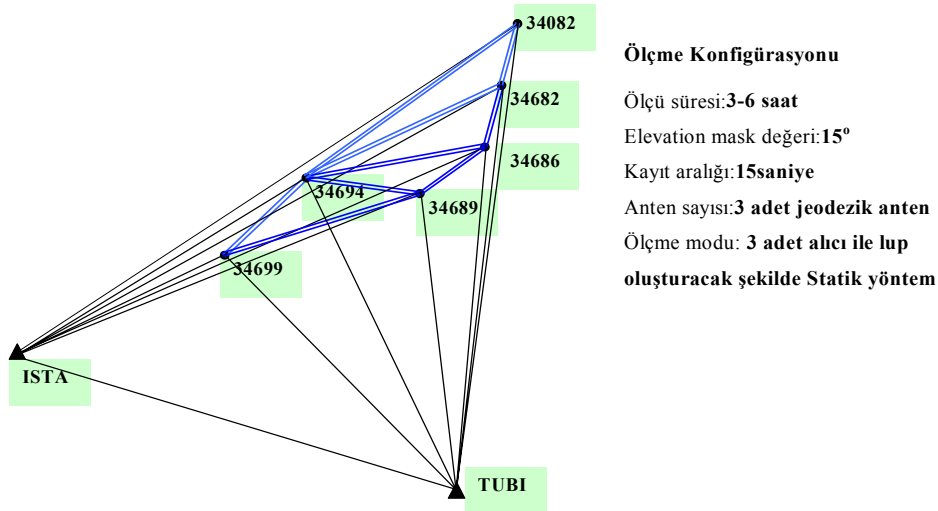
IGS hassas yörünge oluşturmak için şekil 2’de gösterilen izleme istasyonlarından elde edilen verileri kullanmakta ve analiz edildikten sonra efemeris bilgileri SP3 (Standart Product 3) adı verilen bir ASCII dosya formatında oluşturulmaktadır[<http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/sp3.txt>]. IGS’in efemeris bilgilerine bir çok Web sitesinden ulaşılabilir. Bunlardan bazıları;

- <http://igsb.jpl.nasa.gov>
 - <http://igs.ifag.de>
 - <http://lox.ucsd.edu>
 - <http://igs.ensg.ign.fr>
 - <http://geo.tudelft.nl/>
 - <http://geodaf.mt.asi.it/>
- olarak sıralanabilir.

3. YAYIN VE IGS HASSAS EFEMERİSLERİNİN BİR GPS TEST AĞINDA KARŞILAŞTIRIMASI

3.1 Test Bölgesi ve Kullanılan Donanım ve Yazılım Hakkında Bilgi

Test bölgesinde Ashtech Z-Surveyor isimli 3 adet GPS alıcısı ve ayrıca ISTA ve TUBI sabit GPS noktalarına ilişkin veriler kullanılmıştır. GPS ölçülerinin değerlendirilmesi Ashtech firmasına ait Winprism yazılımı ile yapılmıştır. Test bölgesi şekilde görüldüğü gibi, ITRF94 ve ED50 koordinatları bilinen 6 İGNA(İstanbul GPS Nirengi Ağı) noktası kullanılmıştır[İGNA Teknik Rapor]. 6 IGNA noktasının birbirleri ile ve ISTA ve TUBI sabit GPS noktaları ile oluşturduğu toplam 22 adet baz vektörü 3-6 saatlik eşzamanlı GPS gözlemleri ile, hem yayın efemerisi kullanılarak hem de IGS sonuç efemerisi kullanılarak hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

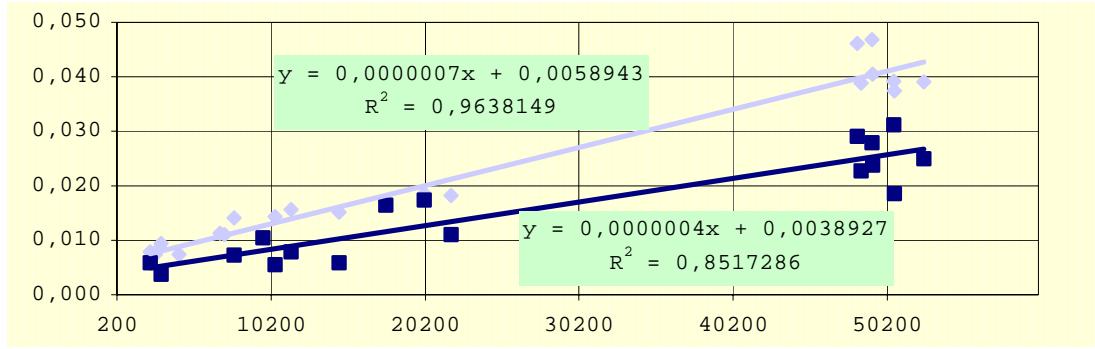


Şekil 3: Test ağı

Her iki efemeris verisi ile hesaplanan baz vektörleri ayrı ayrı değerlendirilerek, baz vektörü ölçme doğrulukları hesaplanmıştır. Test ağı ISTA sabit GPS noktası sabit olmak üzere, minimum sabitle zorlamasız dengeleme yaklaşımına göre dengelenmiş, dengelenmiş ölçüler, düzeltmeler, dengelenmiş koordinatlar belirlenerek karşılaştırılmıştır.

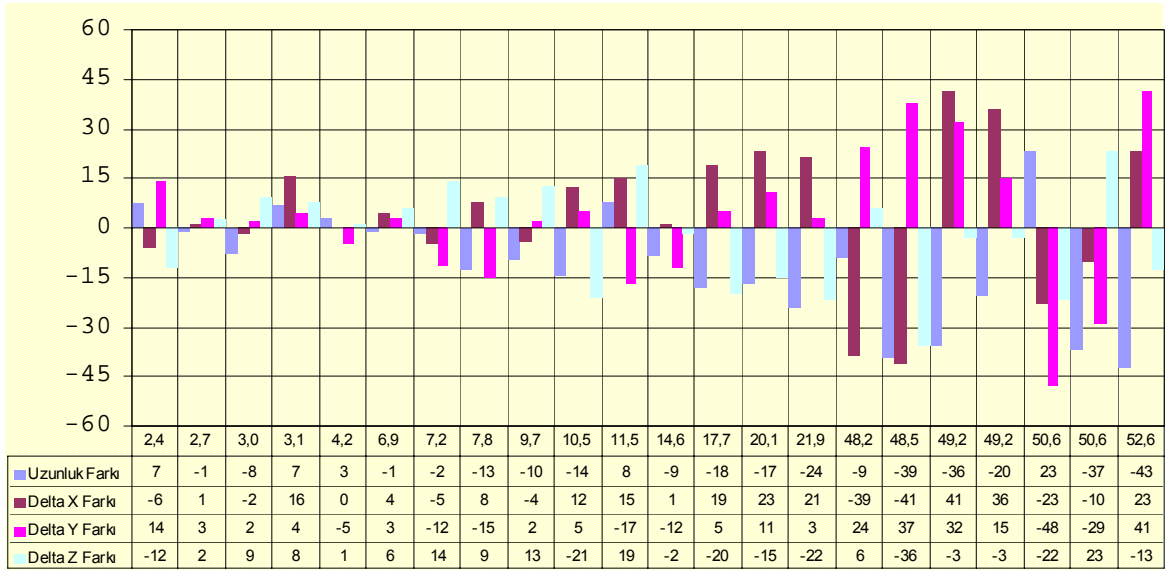
Tablo 2: Yayın ve IGS efemerisi ile bulunan baz vektörleri bileşenleri ve standart sapmaları

NO	NO	YAYIN		IGS		NO	NO	YAYIN		IGS	
		Baz Bileşenleri	S.sapm	Baz Bileşenleri	S.sapm			Baz Bileşenleri	S.sapm	Baz Bileşenleri	S.sapm
ISTA	TUBI	2487,037	0,019	2487,047	0,012	682	994	7152,157	0,007	7152,161	0,009
		43015,592	0,026	43015,621	0,010			-4917,750	0,006	-4917,752	0,002
		-26603,943	0,019	-26603,966	0,010			-4271,707	0,005	-4271,720	0,005
ISTA	382	-16212,620	0,014	-16212,641	0,006	686	4689	2348,787	0,007	2348,771	0,002
		10502,335	0,006	10502,332	0,007			-1367,607	0,006	-1367,611	0,003
		10246,344	0,010	10246,366	0,006			-1441,563	0,002	-1441,571	0,001
ISTA	682	-14661,333	0,011	-14661,356	0,010	686	994	5110,842	0,009	5110,847	0,006
		10870,851	0,012	10870,840	0,011			-4320,616	0,005	-4320,604	0,006
		8509,883	0,009	8509,898	0,009			-2607,584	0,004	-2607,598	0,004
ISTA	686	-12620,032	0,009	-12620,051	0,010	4689	994	2762,059	0,003	2762,059	0,003
		10273,660	0,011	10273,655	0,007			-2952,956	0,006	-2952,951	0,002
		6845,761	0,009	6845,781	0,011			-1166,003	0,003	-1166,004	0,004
ISTA	4689	-10271,270	0,010	-10271,271	0,003	4689	699	4985,394	0,006	4985,390	0,005
		8906,019	0,009	8906,031	0,004			-3666,388	0,009	-3666,391	0,008
		5404,180	0,007	5404,182	0,003			-3035,762	0,003	-3035,768	0,006
ISTA	994	-7509,176	0,010	-7509,188	0,005	994	699	2223,307	0,001	2223,309	0,002
		5953,075	0,009	5953,070	0,002			-713,419	0,006	-713,421	0,001
		4238,162	0,005	4238,183	0,001			-1869,745	0,006	-1869,754	0,001
ISTA	699	-5285,863	0,009	-5285,871	0,006	682	686	2041,330	0,002	2041,329	0,001
		5239,634	0,009	5239,649	0,004			-597,162	0,001	-597,165	0,005
		2368,440	0,006	2368,431	0,001			-1664,114	0,007	-1664,116	0,006
TUBI	382	-18699,643	0,027	-18699,666	0,012	TUBI	994	-9996,162	0,018	-9996,198	0,014
		-32513,227	0,019	-32513,268	0,016			-37062,529	0,023	-37062,544	0,012
		36850,352	0,021	36850,365	0,015			30842,137	0,028	30842,140	0,015
TUBI	682	-17148,417	0,031	-17148,394	0,019	TUBI	699	-7772,965	0,031	-7772,926	0,020
		-32144,850	0,016	-32144,802	0,016			-37775,952	0,021	-37775,976	0,018
		35113,849	0,018	35113,871	0,019			28972,392	0,027	28972,386	0,011
TUBI	686	-15107,032	0,028	-15107,073	0,019	382	682	1551,286	0,004	1551,292	0,003
		-32741,931	0,033	-32741,963	0,015			368,494	0,006	368,480	0,001
		33449,750	0,018	33449,753	0,014			-1736,475	0,003	-1736,463	0,005
TUBI	4689	-12758,377	0,022	-12758,336	0,002	382	994	8703,437	0,009	8703,422	0,004
		-34109,553	0,020	-34109,590	0,015			-4549,287	0,008	-4549,270	0,003
		32008,135	0,025	32008,171	0,017			-6008,181	0,010	-6008,200	0,006



Şekil 4: Baz uzunluğu ölçme doğruluğunun doğrusal regresyonla araştırılması

Yayın ve IGS efemerisi kullanılarak belirlenen baz vektörlerinin ölçme doğruluklarının belirlenebilmesi için; baz uzunluğu ve standart sapma değerine bağlı olarak oluşturulan veri kümesi, doğrusal regresyon ile irdelenmiştir[Soycan ve Topbaş,2002](Şekil4). Buna göre, yayın efemerisi kullanıldığında 5.8mm+0.7ppm, IGS efemerisi kullanıldığında 3.9mm+0.4ppm’lik ölçme doğruluğu elde edildiği görülmüştür. Her iki efemeris ile değerlendirilen baz vektörü uzunlukları ve bileşenleri arasındaki farklar grafik olarak şekil 5’de gösterilmiştir. Söz konusu farkların istatistiksel değerlendirmesi ise tablo3’de verilmiştir.



Şekil 5: Yayın ve IGS efemeris ile bulunan baz uzunlukları ve bileşenleri arasındaki farkların grafik gösterimi

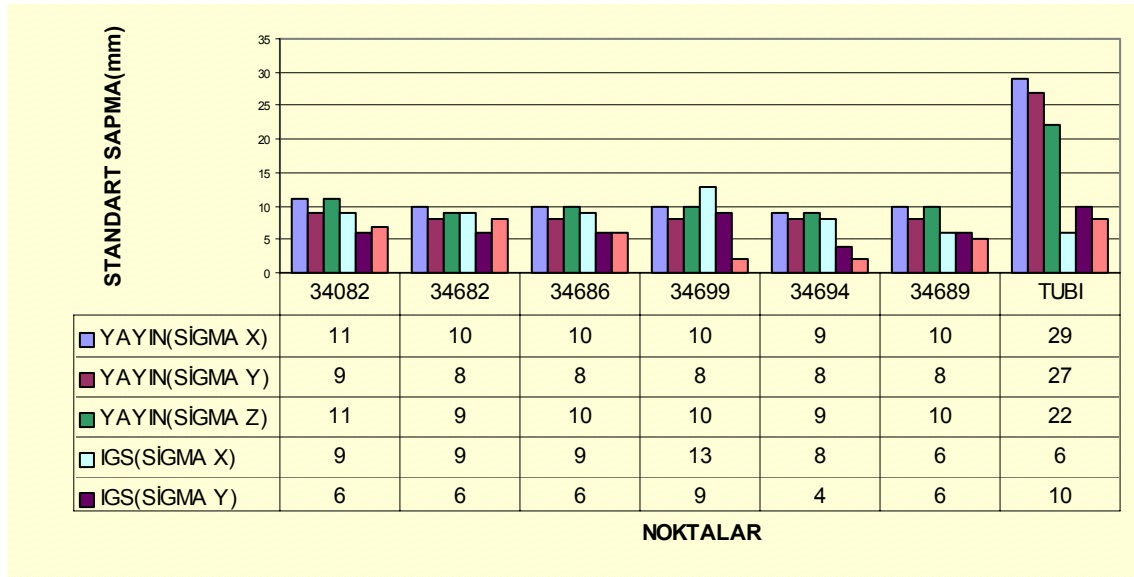
Tablo3: Yayın ve IGS efemerisleri kullanılarak bulunan baz uzunlukları ve bileşenleri arasındaki farkların istatistiksel değerlendirmesi

	Uzunluk Farkı	Delta X Farkı	Delta Y Farkı	Delta Z Farkı
Max.	23mm	41mm	41mm	23mm
Min.	-43mm	-39mm	-48mm	-36mm
Ort.	-11.5mm	4.1mm	2.9mm	-2.9mm
RMS	20.2mm	20.8mm	20.5mm	15.4mm

Her iki efemeris kullanılarak bulunan baz vektörlerinin dengelemesiyle elde edilen X,Y,Z dik koordinatlar, standart sapmaları ve aralarındaki farklar hesaplanarak irdelenmiştir.

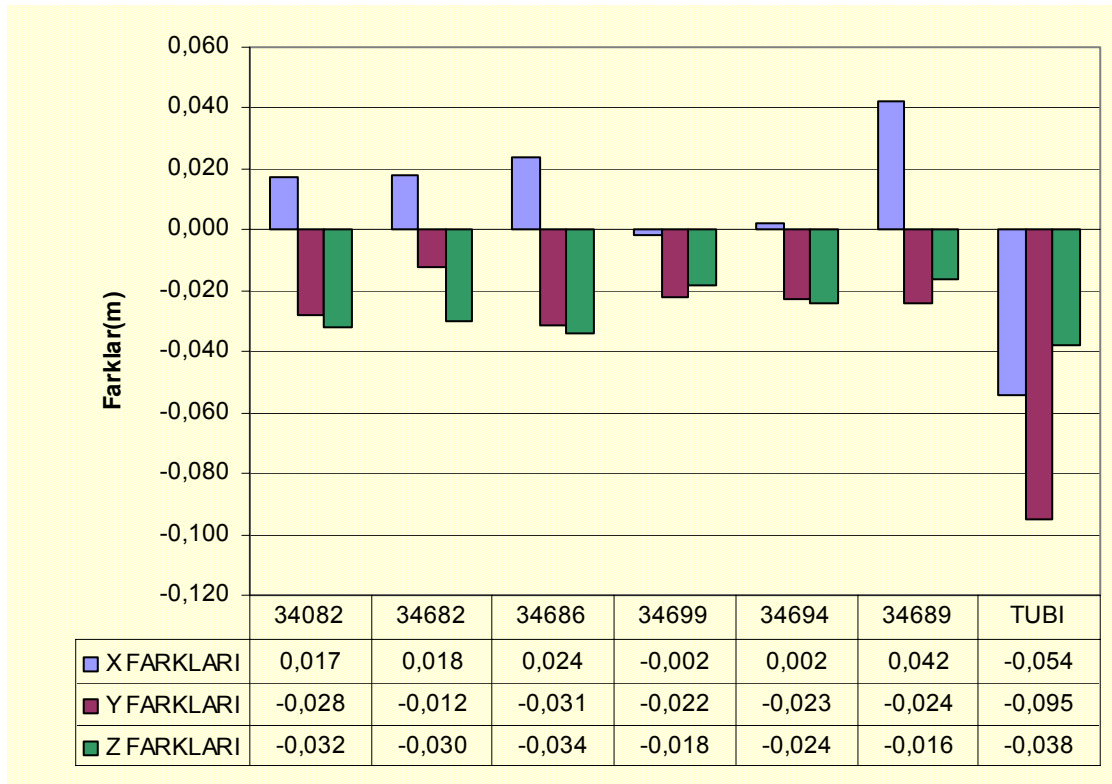
Tablo 4: Yayın ve IGS efemeris kullanılan baz vektörleri dengelenmesinden sonra elde edilen nokta koordinatları, standart sapmaları ve aralarındaki farklar

		X	σ_x	Y	σ_y	Z	σ_z
34082	YAYIN	4192617,749	11	2345352,541	9	4181513,525	11
	IGS	4192617,732	9	2345352,569	6	4181513,557	7
	FARK	0,017		-0,028		-0,032	
34682	YAYIN	4194169,037	10	2345721,035	8	4179777,052	9
	IGS	4194169,019	9	2345721,047	6	4179777,082	8
	FARK	0,018		-0,012		-0,030	
34686	YAYIN	4196210,347	10	2345123,843	8	4178112,915	10
	IGS	4196210,323	9	2345123,874	6	4178112,949	6
	FARK	0,024		-0,031		-0,034	
34699	YAYIN	4203544,497	10	2340089,854	8	4173635,596	10
	IGS	4203544,499	13	2340089,876	9	4173635,614	2
	FARK	-0,002		-0,022		-0,018	
34694	YAYIN	4201321,191	9	2340803,274	8	4175505,343	9
	IGS	4201321,189	8	2340803,297	4	4175505,367	2
	FARK	0,002		-0,023		-0,024	
34689	YAYIN	4198559,135	10	2343756,234	8	4176671,351	10
	IGS	4198559,093	6	2343756,258	6	4176671,367	5
	FARK	0,042		-0,024		-0,016	
TUBI	YAYIN	4211317,376	29	2377865,762	27	4144663,189	22
	IGS	4211317,430	6	2377865,857	10	4144663,227	8
	FARK	-0,054		-0,095		-0,038	



Şekil 6: Yayın ve IGS efemeris kullanılarak çözülen baz vektörü bileşenleri dengelemesi ile bulunan X,Y,Z koordinatlarının standart sapmalarının grafik gösterimi

Yayın efemerisi yerine IGS efemerisi kullanılması, baz bileşenlerinde olduğu gibi, nokta koordinatlarının standart sapmalarını da etkilemektedir. Özellikle, test ağında diğer noktalara en uzak nokta olan TUBI noktasının koordinatlarının standart sapması IGS efemeris kullanılmasıyla büyük ölçüde düşmektedir(Şekil 6).

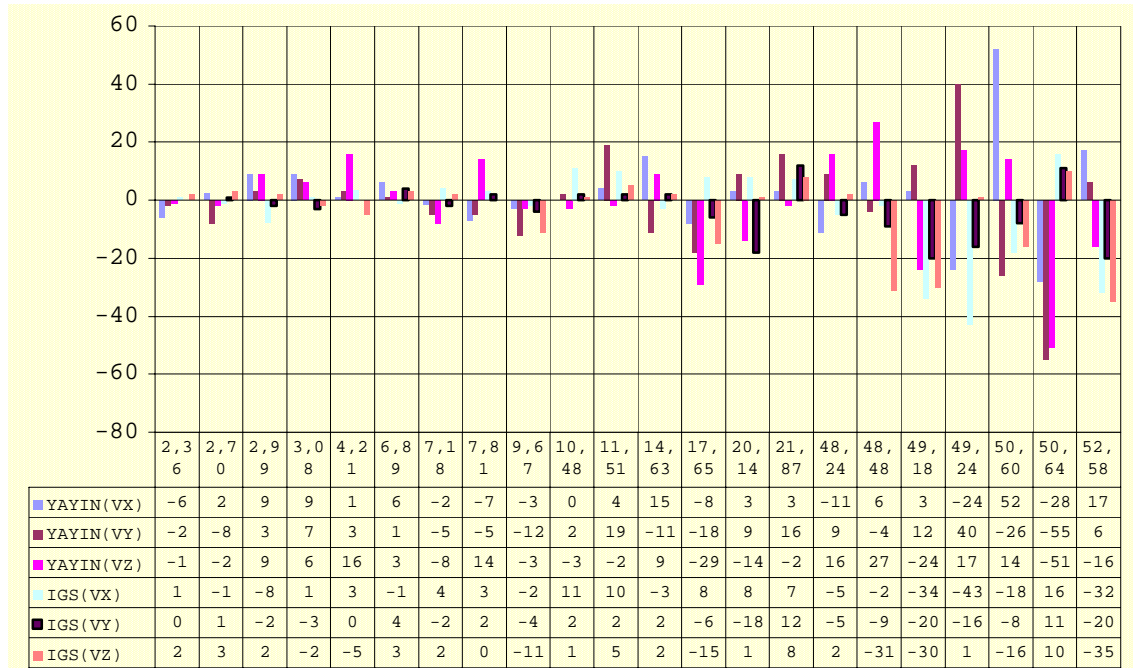


Şekil 7: Yayın ve IGS efemeris ile çözülen baz vektörü bileşenlerinden bulunan X,Y,Z koordinatları arasındaki farklar

Tablo:5 Yayın ve IGS efemeris ile çözülen baz vektörü bileşenlerinden bulunan X,Y,Z koordinatları arasındaki farkların istatistiksel değerlendirmesi

	X Farkı(m)	Y Farkı(m)	Z Farkı(m)
Max.	0,018	-0,012	-0,018
Min.	-0,054	-0,095	-0,038
Ort.	0,007	-0,034	-0,027
RMS	0,029	0,042	0,028

Baz vektörü uzunluğu, bileşenleri, nokta konumları ve standart sapmalarının yanı sıra, test ağıının dengelenmesinde baz vektörlerine getirilecek düzeltmelerde incelenmiş ve IGS efemeris kullanıldığında düzeltmelerin yayın efemerisi kullanılarak hesaplanan düzeltmelere göre daha küçük olduğu görülmüştür. Her iki efemeris kullanılarak elde edilen düzeltmeler grafik olarak Şekil 8'de, bu düzeltmelerin istatistiksel değerlendirmeleri ise tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 8: Yayın ve IGS efemeris ile çözülen baz vektörü bileşenlerine getirilen düzeltmelerin karşılaştırılması

Tablo 6: Yayın ve IGS efemeris ile çözülen baz vektörü bileşenlerine getirilen düzeltmelerin istatistiksel değerlendirmesi

	V _X (mm)	V _Y (mm)	V _Z (mm)	V _X (mm)	V _Y (mm)	V _Z (mm)
Max.	52	40	27	16	12	10
Min.	-28	-55	-51	-43	-20	-35
Ort.	2	-1	-1	-4	-4	-5
RMS	15	18	17	15	9	13

4. SONUÇLAR

Yukarıdaki incelemeler sonunda, yayın efemerisi yerine IGS efemerisinin kullanılmasının GPS ölçme sonuçları üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu görülmüştür. Yayın efemerisi ile $5.8\text{mm}+0.7\text{ppm}$, IGS efemerisi kullanıldığında $3.9\text{mm}+0.4\text{ppm}$ 'lik baz vektörü ölçme doğruluğu elde edilmiştir. Burada, özellikle uzunluğa bağımlı parametre olan 0.3ppm 'lik fark önemlidir. 0.3ppm parametresi 35km 'nin üzerindeki bir uzunlukta 1cm 'nin üzerinde bir değişime yol açmaktadır. Benzer şekilde, nokta konum hataları yayın efemerisinde X,Y,Z yönlerinde sırasıyla 14mm , 13mm , 12mm RMS değerlerine sahipken, IGS efemerisinin kullanılmasıyla bu değerler X,Y,Z yönlerinde sırasıyla, 9mm , 7mm , 6mm 'ye kadar düşmektedir. Baz vektörü bileşenlerine getirilen düzeltmelerin RMS'lerinin incelenmesi sonucu, yayın efemerisi kullanılan çözümde, baz bileşenleri RMS değerleri, X,Y,Z yönlerinde sırasıyla 15mm , 18mm , 17mm , IGS efemerisi kullanılan çözümde, X,Y,Z yönlerinde sırasıyla 15mm , 9mm , 13mm 'lik RMS değerleri elde edilmektedir. Yukarıda belirtilen büyüklükler, özellikle yüksek duyarlılık gerektiren çalışmalarda, göz ardı edilebilecek cinsten büyüklükler değildir. Bu bakımdan, bu tip çalışmalarda, yayın efemerisi yerine Web aracılığıyla kolayca elde edilebilen IGS sonuç efemerisinin kullanılmasında büyük fayda vardır.

5. KAYNAKLAR

- Aydın, Ö., Soycan, M., Topbaş, A., Pırtı, A., Determination of Satellite Orbits and Use of IGS Precise Orbits in Practice, 4. Turkish-German Geodetic Days, Berlin,2001
- Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., GPS Theory and Practice", New York,1997
- <http://igsceb.jpl.nasa.gov>
- İGNA(İstanbul GPS Nirengi Ağı), Teknik rapor, İ.T.Ü Jeodezi Anabilim Dalı, 1999
- Remondi, B.W and B.Hofmann-Wellenhof ., GPS Broadcast Orbits Versus Precise Orbits, G.P.S an Overview Symposium, Edinburgh,1989
- Soycan M.,Topbaş S.A., Examination of repeability of GPS baselines and determination of the optimum measurement time EGS XXVII General Assembly, Nice,2002

LOKAL ALANLARDA JEOİT ONDÜLASYONLARININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Cevat İNAL, Bayram TURGUT, Cemal Özer YİĞİT

Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği
Bölümü, 42031 Kampüs KONYA, email: cevat@selcuk.edu.tr

Özet : *Günümüzde, jeodezik çalışmalarda, GPS(Global Positioning System) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak GPS ile belirlenen yükseklikler elipsoidal yükseklikler olup, pratik haritacılıkta kullanılan yüksekliklerden farklıdır. Bu nedenle GPS ile belirlenen elipsoidal yüksekliklerin, pratik haritacılıkta kullanılan, ortometrik yüksekliğe dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşüm farklı şekillerde yapılabilir. Bu çalışmada ~ 400 km² lik bir alanda GPS/Nivelman kombinasyonu ile belirlenmiş jeoit yüksekliklerinden yararlanarak, 4 modelleme tekniği ve 14 alt varyasyon kullanılarak dönüşüm yapılmıştır.*

Çalışma alanında elipsoidal ve ortometrik yüksekliği bilinen 74 nokta bulunmaktadır. Bu noktaların, uygun dağılımda bulunan, 21 tanesi dayanak noktası olarak seçilmiş ve 53 nokta ise enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

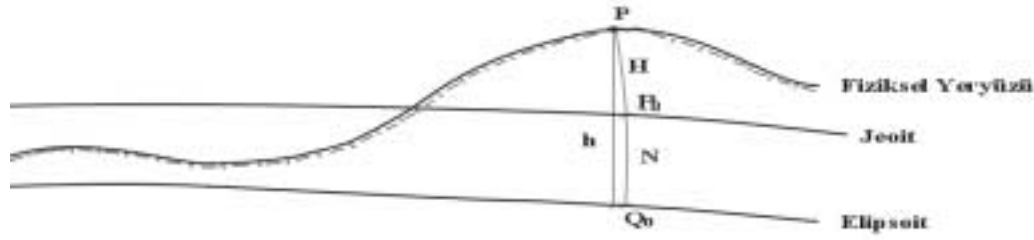
1. GİRİŞ

Günümüzde GPS ile, referans sistemi olan WGS-84(World Geodetic System-84) de, üç boyutlu konum belirlenebilmekte ve çok duyarlı sonuçlar elde edilmektedir. Elde edilen konum ve yükseklik değerlerinin kullanılması için ülke koordinat ve kot sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. Çünkü GPS'in kendine özgü bir referans sistemi vardır. Bunun nedeni uluslararası Jeodezi ve Jeofizik Birliği(IUGG) nin, bu sistemin tüm dünyada ortak kullanımının sağlanması amacıyla fiziksel yeryüzü, referans yüzeyi elipsoit ve eş potansiyelli yüzey jeoit gibi yer biçimleri arasında bir ilişkinin kurulabilmesi gerekliliğinden kaynaklanmaktadır[Akçin,1998].

GPS ile belirlenen elipsoidal yükseklik ile nivelman ile belirlenen ortometrik yükseklik arasında;

$$H = h - N \quad (1)$$

İlişkisi vardır[Liddle,1989]. Burada H; Ortometrik yükseklik, h; elipsoidal yükseklik, N; jeoit ondülasyonudur(Şekil 1).



Şekil 1: Elipsoidal yükseklik(h), ortometrik yükseklik(H) ve jeoit Ondülasyonu(N) arasındaki ilişki

Görüldüğü gibi ortometrik yüksekliklerin hesabı için jeoit ondülasyonunun bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada dayanak noktalarına bağlı olarak farklı enterpolasyon yöntemleriyle jeoit ondülasyonlarının belirlenmesine çalışılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. JEOİT ONDÜLASYONLARININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİ

Jeoit ondülasyonlarını belirleme teknikleri içerisinde en yaygın olarak kullanılanı, bölgede elipsoidal ve ortometrik yüksekliği bilinen ve bölgeyi en iyi temsil eden noktalardan yararlanarak, analitik bir yüzey geçirmektir. Yüzey geçirilmesi ile elde edilen matematiksel model, GPS ölçüsü yapılan noktalardaki jeoit ondülasyonlarının başka bir deyişle ortometrik yüksekliklerin belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntem astrojeodezik yöntemle benzer. Her iki yöntemde de en yüksek hassasiyet, jeoidin düzgün olduğu alanlarda bulunan birbirine çok yakın istasyonlar arasında yapılan uygulamalarda elde edilir [King ve diğ., 1985].

Belirli bir ortogonal koordinat sisteminde, uygun dağılımda x, y koordinatları bilinen herhangi bir noktadaki jeoit ondülasyonu hesaplanabilir. Problemin çözülmesinde farklı ve çok çeşitli enterpolasyon yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemlerin bir bölümünde dayanak noktalarındaki yükseklikler hatasız kabul edilir, bir kısmında belirli bir dengeleme ya da düzensiz hataların filtrelemesi yapılır. Duruma göre o bölge için seçilmiş olan enterpolasyon yöntemi ne kadar uygunsa, jeoit ondülasyonunun hesaplanan değeri ile gerçek değeri arasındaki fark o denli küçük olur. Matematiksel olarak $E\{N_{hesap}\} = N_{gerçek}$ olması istenir. Pratikte bunun gerçekleşmesi zordur.

Enterpolasyon problemlerinin çözümünde;

- Noktasal enterpolasyon
- Tüm bölgeyi kapsayan tek bir fonksiyonla enterpolasyon,
- Yerel olarak tanımlanmış parça parça fonksiyonlarla enterpolasyon

olmak üzere üç yaklaşım vardır [Güler, 1978].

Noktasal enterpolasyonda noktayı çevreleyen tanımlı bir daire, kare veya elips içine düşen dayanak noktalarına göre çözüm üretilir.

Tüm bölgeyi kapsayan tek bir fonksiyonla enterpolasyonda, tüm dayanak noktaları bir fonksiyon içerisinde kullanılır.

Yerel olarak tanımlanmış parça parça enterpolasyonda ise, jeoit yüzeyi daha çok parçalara bölünmektedir. Bunun nedeni, jeoit yüzeyinin arazi yüzeyine bağlı olarak tüm alan içerisinde homojen bir yapı göstermemesinden kaynaklanır[Akçin,1998].

Lokal alanlarda, yeterli hassasiyeti sağlayan, jeoit ondülasyonlarının belirlenmesinde kullanılan enterpolasyon yöntemleriyle ilgili araştırmalar Avrupa ve Amerika’da devam etmektedir. Bu çalışmada ağırlıklı aritmetik ortalama ile enterpolasyon, polinomlarla enterpolasyon, multiküadratik enterpolasyon ve Kriging yöntemleriyle enterpolasyon kullanılmıştır.

2.1 Ağırlıklı Aritmetik Ortalama İle Enterpolasyon

Noktasal enterpolasyon metodları arasında en yaygın ve en sık kullanılanıdır. Belli bir bölgede, jeoit ondülasyonu GPS/Nivelman ile belirlenmiş n sayıda dayanak noktası olduğunu varsayalım. Bu durumda diğer noktadaki jeoit ondülasyonu;

$$P_i = \frac{1}{D^k} \quad (2)$$

olmak üzere;

$$N = \frac{\sum_{i=0}^n N_i P_i}{\sum_{i=0}^n P_i} \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır[Zhan-Ji, 1998]. D_i ; Jeoit ondülasyonu belirlenecek nokta ile i dayanak noktası arasındaki uzunluk, k ise tamsayıdır. Bu yöntemde akla gelebilecek ilk soru k'nın seçimidir. k değeri büyüdükçe yeni noktadaki jeoit ondülasyonu, komşu noktaların jeoit ondülasyonundan daha fazla etkilenir. Başka bir deyişle, ağırlıklı aritmetik ortalama ile enterpolasyon , en yakın komşuluklu enterpolasyon problemine dönüşür. Ondülasyon değerlerinde ani değişimler söz konusu ise k'nın etkisi daha fazladır.

2.2 Polinomlarla Enterpolasyon

Polinomlarla enterpolasyon tekniği yüzey modellemede en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu tekniğin amacı çalışılan bölgenin tek bir fonksiyonla ifade edilmesidir. Bu amaçla dayanak noktalarının x_i, y_i koordinatları ve N_i jeoit ondülasyonundan yararlanarak fonksiyon katsayıları belirlenir. Yüzey genellikle iki değişkenli yüksek dereceden polinomlarla tanımlanır.

Ortogonal polinomlarla enterpolasyonda;

$$N(x, y) = \sum_{k=0}^n \sum_{\substack{j=k-i \\ i=0}}^k a_{ij} x^i y^j \quad (4)$$

Ortogonal olmayan polinomlarla enterpolasyonda ise,

$$N(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \quad (5)$$

eşitliklerinden yararlanılır. Burada;

a_{ij} : Polinomun bilinmeyen katsayıları

x, y : Noktaların düzlem koordinatları

n : Yüzeyin derecesi (1,2,3)

dir.

Dayanak noktası sayısı bilinmeyen sayısından fazla ise a_{ij} katsayıları en küçük kareler yöntemine göre dengeleme ile hesaplanır. A ; Katsayılar matrisi, $L^T = [N_1 \ N_2 \ \dots \ N_n]$ olmak üzere,

$$N = A^T A$$

$$n = A^T l \quad (6)$$

$$x = N^{-1} n$$

eşitlikleri yazılabilir. Ortogonal polinomlarla enterpolasyonda yüzeyin derecesine bağlı olarak;

$$N(x, y) = a_0 + a_1 y + a_2 x \quad (n=1) \quad (7)$$

$$N(x, y) = a_0 + a_1 y + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 \quad (n=2) \quad (8)$$

$$N(x, y) = a_0 + a_1 y + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + a_6 x^3 + a_7 x^2 y + a_8 x y^2 + a_9 y^3 \quad (n=3) \quad (9)$$

fonksiyonları yazılır. Bu yöntemle enterpolasyonda yüzeyin derecesi 1 ise en az 3, yüzeyin derecesi 2 ise en az 6, yüzeyin derecesi 3 ise en az 10 dayanak noktası gereklidir.

Ortogonal olmayan polinomlarla enterpolasyonda ise yüzeyin derecesine bağlı olarak ;

$$N(x, y) = a_0 + a_1 y + a_2 x + a_3 xy \quad (n=1) \quad (10)$$

$$N(x, y) = a_0 + a_1 y + a_2 x + a_3 xy + a_4 y^2 + a_5 xy^2 + a_6 x^2 + a_7 x^2 y + a_8 x^2 y^2 \quad (n=2) \quad (11)$$

$$N(x, y) = a_0 + a_1 y + a_2 x + a_3 xy + a_4 y^2 + a_5 xy^2 + a_6 x^2 + a_7 xy^2 + a_8 x^2 y^2 + a_9 y^3 + a_{10} xy^3 +$$

$$a_{11}x^2y^3 + a_{12}x^3 + a_{13}x^3y + a_{14}x^3y^2 + a_{15}x^3y^3 \quad (n=3) \quad (12)$$

fonksiyonları yazılır. Ortogonal olmayan polinomlarla enterpolasyonda yüzeyin derecesi 1 ise en az 4, yüzeyin derecesi 2 ise en az 9, yüzeyin derecesi 3 ise en az 16 dayanak noktası gereklidir[İnal,1996].

Polinomlarla enterpolasyonda polinomun derecesinin artması elde edilecek doğruluğun artacağı anlamına gelmez. Derecenin artmasıyla yüzeyde gereksiz salınımlar oluşur. Yüzeyde oluşan ani inip çıkmalar gerçeğe uygun olmayan yükseklik değişimlerine neden olur.

2.3 Multiküadratik Enterpolasyon

Bu güne kadar çeşitli jeodezik ve fotogrametrik problemlerin çözümünde kullanılan yöntem Hardy(1971) tarafından önerilmiştir. Bu enterpolasyon tekniğinin amacı çalışma alanında bilinen tüm dayanak noktaları kullanılarak tek bir fonksiyon ile yüzeyi tanımlamaktır. Analitik bir çözümlene tekniğidir. Tekniğin uygulanabilmesi için önce bir trend yüzey geçirilir. Trend yüzeyi olarak birinci ya da ikinci dereceden polinom kullanmak uygundur[Leberl,1973].

Multiküadratik enterpolasyon tekniğinde, bir noktadaki jeoit ondülasyonu bu noktanın x,y düzlem koordinatları kullanılarak;

$$N(x, y) = N_{trend} + \sum_{i=1}^n C_i [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + \delta^2]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

eşitliği ile hesaplanır.(13) eşitliğinde;

n : dayanak noktalarının sayısı

C_i : dayanak noktalarının bilinen N (x,y) değerlerinden yararlanarak hesaplanan katsayılar

δ : geometrik parametredir.

δ değerinin büyüklüğü konusunda bir çok araştırma yapılmıştır[Fogel ve Tinny,1996]

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2]}{n(n-1)} \quad (14)$$

C_i katsayılarını hesaplamak için aşağıdaki yol izlenir.

$$C_1.a_{11} + C_2.a_{12} + \dots + C_n.a_{1n} = \Delta N_1$$

$$C_1.a_{21} + C_2.a_{22} + \dots + C_n.a_{2n} = \Delta N_2 \quad (15)$$

.....

$$C_1.a_{n1} + C_2.a_{n2} + \dots + C_n.a_{nn} = \Delta N_n$$

Matris gösterimi ile bilinmeyen C_i katsayıları ;

$$C_j = A^{-1} \Delta N \quad (16)$$

olur.(15) eşitliğindeki a_{ij} katsayıları dayanak noktalarının koordinatlarından yararlanarak;

$$a_{ij} = [(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + \delta^2]^{1/2} \quad (17)$$

eşitliği hesaplanır. ΔN_i ; i noktasında geçirilen trend yüzeyi ile ondülasyon değeri arasındaki farktır. Multiküadratik yöntemin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir[Uluğtekin,1994].

- Dayanak noktaları homojen dağılmamış olsalar bile yüzey modellemesinin sonuçları çok az etkilenmektedir.
- Dayanak noktalarının hesaplanan noktaya olan mesafesinin artması durumunda yüzey modellemesine olan katkısında o oranda azalmaktadır.
- Dayanak noktaları için hiçbir çakışırma artığı kalmamaktadır.

2.4 Kriging Enterpolasyon Yöntemi

Kriging enterpolasyon yöntemi, maden cevherlerinin daha kesin biçimde kestirilmesi amacıyla bu tekniği geliştiren D.G.Krige isimli Güney Afrikalı bir maden mühendisinden adını almaktadır. Bu enterpolasyon yöntemi iki boyutlu ve üç boyutlu olarak kullanılabilir.

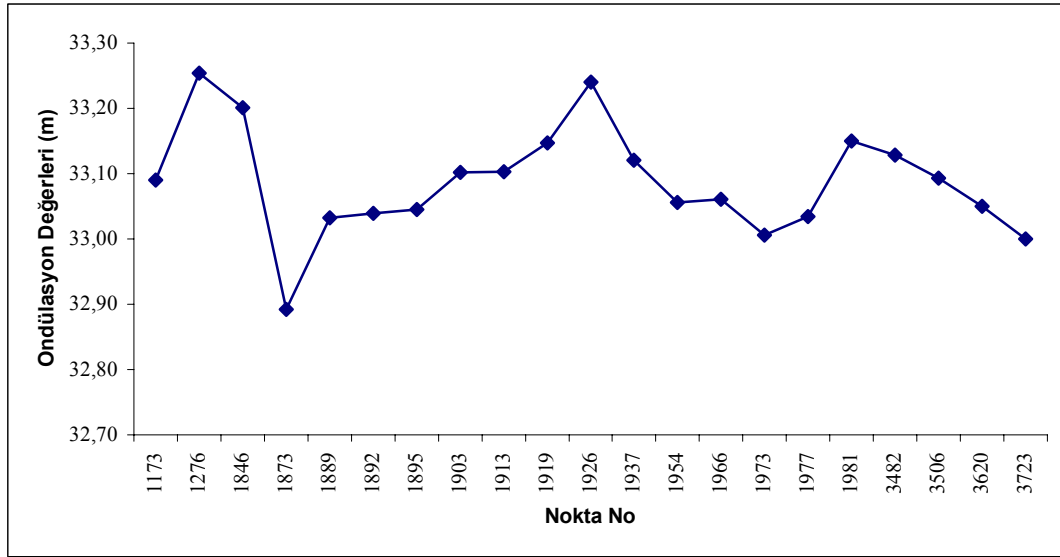
Kriging enterpolasyon yöntemi bilinen yakın noktalardan alınan verileri kullanarak diğer noktalardaki verilerin optimum değerlerini kestiren bir enterpolasyon metodudur. Kriging daha önceden tanımlanmış bir kovaryans modelinden hesap varyansını minimize eden lineer regresyon setidir. Kriging enterpolasyon yönteminde bir bölgede enterpole edilecek olan parametrelerin bölgesel bir değişken olduğu kabul edilir. Birbirine yakın noktalardaki veri değerlerinin daha korelasyonlu olması için bölgesel değişken konumsal olarak sürekli bir çeşitlilik gösterir.

Kriging enterpolasyon yöntemi, ağırlıklı ortalama yöntemine benzer bir şekilde bilinmeyen bölgeler için enterpolasyon değerlerinde en yakın dayanak noktalarından daha fazla etkilenmeyi sağlayan bir ağırlık modeli kullanır. Kriging enterpolasyon yöntemi simple kriging, ordinary kriging ve universal kriging olarak üç gruba ayrılabilir. Her bir kriging yöntemi matematiksel algoritma ve hesaplama tekniği açısından farklılıklar gösterir. Detaylı bilgi için [Nielsen,1997] ye bakılabilir.

3. SAYISAL UYGULAMA

Çalışma alanındaki noktalar Ankara/Gölbaşı jeodezik ağına aittir. Ölçüler K-MAP Mühendislik Müşavirlik Ticaret ve Taahhüt Ltd.Şti. tarafından yapılmıştır.Çalışma alanı kuzey-güney yönünde ~26 km, doğu-batı yönünde ~17 km dir. Bölge içinde Gauss –Krüger projeksiyon koordinatları ve jeoit ondülasyonu bilinen 74 nokta bulunmaktadır. Jeoit ondülasyonları $N_{min} = 32.860$ m ile $N_{maks} = 33.254$ m arasındadır. Uygun

dağılımdaki 21 nokta dayanak noktası olarak alınmıştır. Dayanak noktalarındaki jeoit ondülasyonu Şekil 2 de verilmektedir.



Şekil 2: Dayanak noktalarındaki jeoit ondülasyonları

Çalışma alanında dayanak noktaları dışında kalan 53 noktadaki jeoit ondülasyonları farklı enterpolasyon yöntemleri ile hesaplanmıştır. Kriging yöntemi ile hesaplamalarda [Golden software, 1995] kullanılmıştır. Hesaplanan jeoit ondülasyonları ile GPS/Nivelman ile belirlenen ondülasyonlar arasındaki fark (ϵ) Tablo 1 de verilmektedir.

Tablo 1' deki farklar kullanılarak her enterpolasyon yöntemi için standart sapma;

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \epsilon \epsilon}{n}} \quad (18)$$

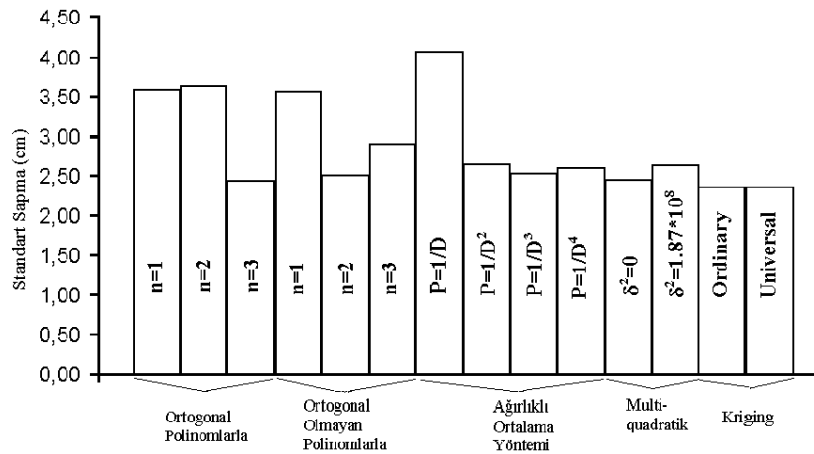
eşitliği ile hesaplanmıştır (Tablo 2). Hesaplanan standart sapmalar grafik olarak Şekil 3 de gösterilmiştir.

Tablo 1: Enterpolasyon yöntemleriyle hesaplanan jeoit ondülasyonları ile GPS/Nivelman ile belirlenen jeoit ondülasyonları arasındaki farklar (cm)

Nokta No	Ortogonal polinom			Ortogonal olmayan polinom			Ters Uzaklıklı Ağırlıklı Ortalama				Multiküadratik		Kriging	
	1.der.	2.der.	3.der.	1.der.	2.der.	3.der.	1/D	1/D ²	1/D ³	1/D ⁴	$\delta^2=0$	$\delta^2=1,87 \cdot 10^8$	Ordinary	Universal
1872	-9,3	-9,4	-5,9	-9,0	-4,7	-4,9	-12,6	-4,7	-3,4	-3,2	-5,5	-6,2	-5,3	-5,2
1882	-3,8	0,6	-3,2	-3,8	-4,9	-8,6	-9,7	-7,3	-6,4	-6,2	-5,6	-4,9	-4,2	-3,8
1883	2,9	6,9	3,5	2,9	1,8	-1,0	-2,6	-0,3	0,4	0,6	1,2	1,3	2,3	2,6
1884	-2,7	1,0	-2,0	-2,7	-3,6	-5,7	-7,7	-5,5	-4,9	-4,8	-4,3	-4,5	-3,4	-3,2
1885	-2,5	0,8	-1,7	-2,5	-3,2	-4,8	-7,2	-5,0	-4,3	-4,1	-3,9	-4,5	-3,3	-3,3
1890	-2,3	0,1	-2,3	-2,5	-3,4	-3,1	-4,6	-3,2	-2,9	-2,9	-3,1	-2,9	-3,0	-3,0
1891	0,0	2,1	-0,2	-0,1	-1,0	-0,4	-2,0	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5	-0,2	-0,4	-0,4
1893	1,8	2,7	0,9	1,6	1,0	1,8	0,6	1,8	2,0	2,0	1,7	1,9	1,8	1,8
1894	1,4	1,5	-0,2	1,1	0,6	1,6	0,3	1,4	1,5	1,5	1,5	1,7	1,6	1,6
1896	0,3	-0,8	-1,3	0,0	0,0	0,1	-0,1	1,2	1,3	1,3	0,5	-0,3	0,4	0,3
1897	-0,1	-1,5	-1,0	-0,4	-0,2	-0,6	-0,5	0,8	1,2	1,4	-0,1	-1,6	-0,3	-0,4
1898	2,4	0,7	2,1	2,2	2,6	1,7	2,3	3,2	3,5	3,6	2,1	0,3	1,9	1,8
1899	3,4	1,6	3,3	3,2	3,7	2,6	3,3	4,1	4,1	3,9	3,0	1,2	2,8	2,7
1900	1,3	-0,7	1,7	1,1	1,7	0,3	1,3	1,3	0,5	-0,2	0,5	-1,1	0,4	0,3
1901	2,0	0,2	2,9	1,8	2,7	1,0	2,0	1,4	0,4	-0,2	1,1	-0,3	1,0	0,9
1902	2,0	-0,1	3,1	1,8	2,8	1,0	1,9	0,7	0,1	0,0	0,9	0,0	0,8	0,8
1904	-1,5	-3,8	0,2	-1,7	-0,4	-2,2	-0,9	-2,0	-2,3	-2,4	-2,3	-2,1	-2,3	-2,4
1905	3,3	0,9	5,2	3,2	4,5	2,8	4,6	4,0	3,3	3,1	3,0	3,5	3,0	2,9
1906	-1,5	-3,8	0,6	-1,6	-0,1	-1,7	0,2	-0,1	-0,6	-0,9	-1,2	-0,4	-1,2	-1,3
1907	-3,5	-5,5	-1,2	-3,6	-1,8	-3,5	-1,7	-1,9	-2,2	-2,5	-2,7	-1,9	-2,8	-2,8
1908	-7,3	-9,4	-5,1	-7,4	-5,7	-7,1	-5,2	-5,5	-5,7	-6,0	-6,2	-5,3	-6,3	-6,3
1909	-5,5	-7,4	-3,1	-5,6	-3,7	-4,8	-3,2	-3,6	-3,8	-4,0	-3,8	-2,9	-3,8	-3,9
1910	-7,1	-9,0	-4,7	-7,2	-5,3	-6,3	-4,6	-5,1	-5,3	-5,4	-5,2	-4,4	-5,3	-5,3
1911	-6,4	-8,1	-4,0	-6,4	-4,5	-5,3	-3,8	-4,2	-4,4	-4,4	-4,2	-3,6	-4,2	-4,3
1912	-3,8	-5,4	-1,4	-3,8	-1,8	-2,5	-1,2	-1,6	-1,6	-1,6	-1,4	-1,0	-1,4	-1,5
1914	-1,7	-2,8	0,8	-1,7	0,5	0,4	1,4	1,2	1,3	1,4	1,0	0,9	0,7	0,8
1915	-1,5	-2,4	1,0	-1,5	0,7	0,8	1,8	1,3	1,6	1,8	1,0	0,8	0,7	0,7
1916	-4,0	-4,7	-1,6	-3,9	-2,0	-1,4	-0,6	-1,9	-2,2	-2,3	-1,9	-2,3	-2,3	-2,3
1917	2,8	2,2	5,0	2,8	4,6	5,5	6,2	4,3	3,6	3,4	4,3	3,7	3,9	4,0
1918	-4,2	-4,3	-1,9	-4,1	-2,3	-1,0	-1,2	-3,1	-3,3	-3,3	-2,9	-3,3	-3,1	-3,1
1920	-0,5	-0,7	1,4	-0,4	0,8	2,2	3,2	1,3	1,2	1,2	0,2	-0,9	-0,2	-0,1
1921	-0,8	-1,6	0,3	-0,7	-0,5	0,9	3,4	1,1	0,9	1,1	-0,9	-2,6	-1,5	-1,4
1922	1,7	0,2	2,1	1,8	1,0	2,4	6,0	2,9	1,9	2,0	0,9	-1,2	0,1	0,3
1923	1,7	-1,0	0,5	1,8	-0,8	0,3	5,6	0,3	-2,3	-3,4	-0,5	-2,6	-1,3	-1,1
1924	4,9	1,5	2,6	5,0	1,2	2,0	8,1	1,7	-0,2	-0,7	1,7	0,0	1,0	1,2
1925	5,1	0,7	1,5	5,3	0,0	0,7	5,8	0,2	-0,3	-0,3	0,8	-0,1	0,5	0,5
1927	-2,3	-1,4	0,5	-2,2	0,5	1,9	0,9	-1,1	-1,4	-1,5	0,1	0,4	-0,1	-0,1
1928	-3,0	-1,8	-0,1	-2,9	0,3	1,5	0,4	-1,3	-2,1	-2,4	0,4	0,9	-0,1	0,0
1956	2,1	0,5	-1,6	2,1	-0,5	1,4	0,2	1,5	1,9	2,0	0,5	0,4	1,3	1,4
1974	1,2	0,5	-0,5	1,3	-1,6	1,2	-2,0	0,8	1,4	1,5	0,8	1,4	0,8	0,7
1975	1,0	-0,4	-1,1	1,1	-2,7	0,1	-3,1	-0,9	-0,5	-0,6	-0,5	0,2	-0,5	-0,6
1976	2,6	0,3	0,1	2,7	-2,1	0,3	-2,0	-0,7	-0,8	-0,9	-0,1	0,3	-0,2	-0,2
1979	-2,1	3,2	3,7	-2,1	0,0	-1,3	2,2	0,1	-0,5	-0,6	-0,9	-3,6	-0,3	-0,6
2000	-2,7	2,3	2,3	-2,7	-0,2	-1,2	1,6	-0,2	-0,7	-0,9	-1,0	-2,2	-0,8	-1,0
2001	-2,6	2,9	3,2	-2,6	-0,2	-1,4	2,0	0,0	-0,6	-0,8	-1,1	-3,6	-0,6	-0,9
3520	-1,4	-1,9	-0,3	-1,3	-1,1	0,4	3,1	0,7	0,5	0,7	-1,4	-3,3	-2,1	-2,0
3548	8,4	5,1	2,6	8,2	4,1	1,3	7,4	4,0	1,5	0,2	2,8	4,0	2,4	2,5
3564	7,7	3,5	0,0	7,6	1,1	-1,6	4,4	-0,3	-2,6	-3,3	-0,8	-3,0	-1,0	-1,0
3617	-0,5	-0,8	2,3	-0,5	2,8	1,9	2,0	1,8	1,6	1,5	3,3	3,6	2,9	2,9
3619	-3,7	-3,4	-1,2	-3,7	0,0	-1,2	-1,6	-0,1	1,1	1,5	0,7	0,9	0,2	0,3
3650	-1,8	-2,7	0,6	-1,9	0,5	-2,0	-1,0	-1,0	-1,5	-2,0	-0,7	-1,0	-1,3	-1,2
3655	1,9	1,3	0,0	1,9	0,4	3,1	-0,7	1,1	2,0	2,3	2,0	4,2	2,0	2,0
3680	0,6	0,8	2,6	0,5	2,5	0,1	0,1	0,7	0,8	0,8	0,5	-0,5	0,1	0,1

Tablo 2: Enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılmasında kullanılan kriterler

Enterpolasyon Yöntemi		Minimum Hata (cm)	Maximum Hata (cm)	Mutlak Ortalama (cm)	Standart sapma (cm)	$\epsilon < \pm 5\text{cm}$ Nokta sayısı
Ortogonal Polinom	1.derece	0,04	9,26	2,88	$\pm 3,58$	45
	2.derece	0,11	9,41	2,62	$\pm 3,62$	44
	3.derece	0,03	5,94	1,92	$\pm 2,44$	49
Ortogonal olmayan Polinom	1.derece	0,02	8,96	2,86	$\pm 3,56$	44
	2.derece	0,03	5,71	1,90	$\pm 2,50$	51
	3.derece	0,06	8,58	2,17	$\pm 2,90$	47
Ters uzaklıklı ağırlıklı ortalama	1/D	0,09	12,55	3,05	$\pm 4,06$	42
	1/D ²	0,02	7,27	2,00	$\pm 2,64$	48
	1/D ³	0,14	6,42	2,02	$\pm 2,53$	50
	1/D ⁴	0,02	6,24	2,10	$\pm 2,59$	50
Multi-kuadratik	$\delta^2=0$	0,13	6,23	1,87	$\pm 2,45$	49
	$\delta^2=1,87 \cdot 10^8$	0,01	6,20	2,08	$\pm 2,63$	50
Kriging	Ordinary	0,06	6,25	1,80	$\pm 2,35$	50
	Universal	0,01	6,34	1,81	$\pm 2,34$	50



Şekil 3: Farklı enterpolasyon yöntemlerine göre hesaplanan standart sapmalar

4. SONUÇ

GPS ile belirlenen elipsoidal yüksekliklerin pratik haritacılıkta kullanılan ortometrik yüksekliğe dönüşümü için 4 enterpolasyon yöntemi ve 14 alt varyasyon kullanılmıştır. Enterpolasyon yöntemleri ile bulunan jeoit ondülasyonları ile GPS/Nivelman ile belirlenen jeoit ondülasyonları arasındaki farklardan standart sapmalar hesaplanmıştır. Hesaplanan standart sapmalar ve farklar dikkate alındığında, çalışma bölgesi için; ortogonal polinomlarla enterpolasyonda 3.derece yüzey, ortogonal olmayan polinomlarla enterpolasyonda 2.derece yüzey, ağırlıklı ortalama ile enterpolasyonda ağırlık $1/D^3$, multikvadratik enterpolasyonda $\delta^2 = 0$, Kriging yöntemiyle enterpolasyonda ise ordinary ve üniversal kriging yöntemleri en iyi sonucu vermektedir.

Çalışma alanında kullanılan enterpolasyon yöntemleri birlikte değerlendirildiğinde, en iyi sonucu ortogonal olmayan polinomda 2.derece yüzeyin verdiği söylenebilir.

5. KAYNAKLAR

- Akçin,H., GPS Ölçülerinden Pratik Yüksekliklerin Elde Edilmesi Üzerine Bir Araştırma,Doktora Tezi,YTÜ,İstanbul, 1998.
- Fogel,D.N.,Tinney,L.R., Image Registration Using Multiquadratic Functions,The Finite Element Method, Bivariate Mapping Polynomials And Thin Plate Spline, Technical Report, SantaBarbara,1996.
- Golden Software, Surfer(Win 32) Version 6.01, Help Menu, Colorado, 1995.
- Güler,A., Sayısal Arazi Modellerinde Interpolasyon Yöntemi , Harita Dergisi, Sayı 85,Ankara, 1978.
- Hardy R.L., Multiquadratic Equation Of Topography And Other Irregular Surface, Journal Of Geophysical Research,Vol.76,No8, 1971.
- İnal,C., Yerel Jeoit Geçirilerek GPS Sonuçlarından Yüksekliklerin Belirlenmesi,S.Ü Müh.Mim.Fak. Dergisi,11.Cilt,2.Sayı,S.15-21,Konya,1996.
- Leberl, F., Interpolation İn A Square Grid DTM, ITC Journal, 1973-75,1973.
- Liddle,D.A., Orthometric Height Determination By GPS. Surveying And Mapping, Vol. 49,No:1,1989.
- Nielsen,A.A., Kriging, Departement Of Mathematical Modelling, Technical University Of Denmark, Denmark, 1997.
- Uluğtekin, N., Sayısallaştırılmış Kadastro Paftalarının Geometrik Niteliğinin Yükseltmesi, İTÜ Dergisi, Cilt 52, Sayı1-2, İstanbul, 1994.
- Zhan-Jı.Y., Precise Determination Of Local Geoid And İts Geophysical Interpretation, Doktora Tezi, Hong Kong Polytechnich University,Hong Kong, 1998.

GPS İLE HAREKET HALİNDEKİ ARAÇLARDAN ELDE EDİLEN GERÇEK ZAMANLI VERİLERİN ORTA ÖLÇEKLİ CBS ÇALIŞMALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİ

Tahsin YOMRALIOĞLU, Selçuk REİS, Recep NİŞANCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri
Mühendisliği Bölümü , 61080 Kampüs TRABZON, email: sreis, rnisanci, tahsin@ktu.edu.tr

Özet: Milenyum çağının yaşandığı günümüzde, kamu kurum ve kuruluşları başta olmak üzere, özel kurum ve kişilerin, konumsal bilgiye olan ihtiyacı, hızla artmaktadır. Bilgiye olan talebin ve çeşitliliğinin artması, konumsal bilginin daha hızlı ve ekonomik olarak toplanmasını gerektirmiştir. Yoğun konumsal bilginin toplanması, sorgulanması ve analiz edilmesi de ancak bir sistem dahilinde yürütülebilir. Bu düşüncelerin sonucunda ortaya çıkan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), yeryüzüyle ilgili bilgilerin düzenlenmesini ve etkin bir biçimde kullanılmasını sağlamaktadır. CBS'nin bileşenlerinin veri toplama aşaması, CBS uygulamalarının %60-80'lik bölümünü oluşturmaktadır. CBS'nin hızla gelişmesine paralel olarak Global Konum Belirleme (Global Positioning System, GPS) sistemlerinde de hızlı gelişmeler olmuştur. Bir çok farklı disiplin, değişik uygulamalarda ve farklı harita altlıklarında kullanılmak üzere konumsal bilgiye ihtiyaç duyarlar. Bu disiplinlerin bilgi ihtiyacı, lokal, bölgesel ve global olmak üzere üç temel ölçekte toplanarak değerlendirilebilir. Bu ölçeklerde toplanacak verilerde, veri kaynakları ve veri kaliteleri test edilmelidir. Ülkemizde kent merkezlerinden kırsal alanlara kadar konumsal bilgi eksikliği belirgin bir şekilde ortadadır. Özellikle, geniş yüzeylere yayılmış kırsal alanlarda altyapı çalışmalarının projelendirilmesi (taşımacılık, telekomünikasyon, elektrik vb.), turizm tesislerinin konum ve güzergahlarının tespiti, doğal afetlere yönelik acil yardım çalışmalarının yürütülmesi ve planlama çalışmaları gibi uygulamalarda konuma dayalı orta ölçekteki verilerin toplanarak karar vericilerin hizmetine sunulması gerekmektedir.

1. GİRİŞ

Bilgi teknolojilerinin hızla geliştiği günümüzde, projelerin geliştirilmesinde; farklı meslek grupları kendi yöntem ve tekniklerini bir araya getirmekte ve sorunun çözümünde optimum yöntemler geliştirmektedir. Son on yıl içinde ortaya çıkan en etkili ve heyecan verici teknik gelişmelerin iki tanesi; Global Konum Belirleme (GPS) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri olgusudur. Konuma dayalı gözlemlerle elde edilen grafik ve grafik olmayan bilgilerin toplanması, saklanması, işlenmesi ve kullanıcıya sunulması işlevlerini bir bütünlük içerisinde gerçekleştiren bir bilgi sistemi olarak tanımlanan CBS'nin en önemli aşamalarından birisi veri toplama aşamasıdır. CBS'nin bileşenlerinin veri toplama aşaması, CBS uygulamalarının %60-80'lik bölümünü oluşturmaktadır (Yomralıoğlu, 2000). Aynı zamanda veri toplama aşamasında verinin hızlı ve ekonomik olarak elde edilmesi de önemlidir. Yüksek duyarlılıktaki konum belirleme çalışmalarında (nirenge, poligon tesisi gibi) kullanılan GPS teknolojisi, bölgesel ölçekte yapılan CBS uygulamalarındaki kullanımı ise çok azdır. GPS alıcıları; konum verisini bilgisayar hafızasına transfer etmek için kayıt yapabilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle GPS sadece konum bilgisini (o anki) vermekle kalmaz, aynı zamanda nerede olduğunu da (geçmişte) söyler. Böylece, GPS; GIS için veri girişi aracı

olarak hizmet edebilir. Gelişen GPS teknolojisiyle dünya yüzeyi bir sayısallaştırıcı masası, GPS alıcısı ise bir tablet vazifesini görmektedir. Bu yaklaşım geleneksel CBS'de veri elde edinimini ters yüz etmiştir. Çünkü veri direkt olarak çevreden elde edilmektedir ve harita giriş dokümanından çok bir çıkış dokümanı haline gelmiştir (Kennedy, 1996).

Bu çalışmada, GPS teknolojisi ile toplanan konumsal bilgilerin orta ölçekli CBS uygulamalarında kullanılabilirliğinin ve CBS ile entegrasyonun değerlendirilmesi yapılacaktır. Bu amaçla Trabzon kentinde seçilen yol güzergahlarından, hareket halindeki araçla ve GPS alıcısı ile veri toplanmıştır. Toplanan veriler bir dizüstü bilgisayar vasıtasıyla gerçek zamanlı olarak izlenmiş ve bilgisayara depolanmıştır. Pilot çalışma olarak seçilen yol güzergahları, yerleşim yoğunluğuna göre; az yapılaşmış, orta yapılaşmış ve yoğun yapılaşmış olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler üzerinde GPS alıcısının topladığı verilerin yol orta ekseninden olan sapmaları incelenmiştir. Bu güzergahlardan elde edilen veriler, Trabzon kenti sayısal halihazır haritası ile karşılaştırılmıştır.

2. BÖLGESEL ÖLÇEKTE KONUMSAL BİLGİ İHTİYACI

Geniş alana yayılmış verilerin toplanması ve organize edilmesi güçtür. Nitekim ülkemizde farklı kurumların ihtiyaç duyduğu küçük ölçekli çalışmalarda (1:25000 ve yukarısı) kullanılan konumsal veri eksikliği, bölgesel ölçekte yapılacak olan CBS çalışmalarını olumsuz yönde etkilemektedir. Ülkemizde bir çok kamu kurumlarının kullanmış olduğu haritalar 1:25000 ölçekli topoğrafik haritalardır. Kurumlar ihtiyaç duyduğu verileri (yol, akarsu, yerleşim alanları, doğal kaynaklar gibi) bu haritalardan temin etmektedir. Ancak bu haritaların ülke bazında güncellenmesi uzun bir zaman sürecinde gerçekleşmektedir. Kurumların ihtiyaç duyduğu, topoğrafik haritada olmayan veriler ise (enerji hatları, trafolar, telefon hatları, idari sınırlar, turistik tesisler, tarihi eserler gibi) ancak araziden direkt olarak toplanarak harita üzerine işlenir. Kurumların topoğrafik haritadan elde ettikleri veriler güncel olmamakta, araziden elde edilen veriler ise yaklaşık konumda olmaktadır. Dolayısıyla bu yöntemle toplanan veriler, her kurumun günlük problemlerinin çözümünde kullanılmakta, geleceğe dönük, farklı kurumların ihtiyaçlarını giderecek şekilde konumsal bilgi üretimi yapılmaktadır. Sonuçta konumsal veriler farklı koordinat sistemlerinde ve standartlarda elde edildiğinden, CBS çalışmaları için yetersiz kalmaktadır.

3. CBS/GPS ENTEGRASYONU

Selective Availability (SA)'nın kaldırılması sonucu bugün tek cihazlı GPS alıcılarında konum duyarlılığı +/-5-15 metre arasında değişmektedir. Özellikle DGPS uygulamalarında konum hassasiyeti metrenin de altına düşürülmüştür. İlk zamanlarda, kullanıcılara özel olarak geliştirilen GPS, sadece bu alanındaki uzman kişiler tarafından kullanılabilirdi. Oysa günümüzde ticari amaçlı uygulamalar için bir cep telefonu kullanımı kadar kolay GPS alıcıları geliştirilmiştir. Ebatları küçültülerek cepte taşınabilmesinin yanında, fiyatları da düşmektedir (100\$-200\$).

GPS teknolojisinde yazılım ve donanım alanında yaşanan bu gelişime paralel bir gelişme de CBS sektöründe yaşanmaktadır. İlk zamanlardaki bilgisayar donanımları

fiziksel olarak geniş hacimli, yazılımlar ise ancak CBS uzmanları tarafından kullanılmaktaydı. Günümdüde bilgisayarlarda masaüstünden, çanta bilgisayarlara ve son olarakta cepler de taşınabilen cep PC'ler kullanıma sunulmuştur. Donanıma paralel olarak CBS yazılım sektörü de daha geniş kullanıcıya hizmet verebilmek için kullanıcıların anlayabileceği, basit fakat farklı meslek disiplinlerine hizmet verebilecek fonksiyona sahip yazılımlar geliştirmişlerdir.

CBS ve GPS disiplinleri önceleri birbirinden ayrı çalışan sistemlerdi. Daha sonra GPS verileri ayrı data ünitelerinde harici olarak toplanarak CBS ortamına aktarılmakta fakat CBS'den GPS bileşenine veri aktarılamıyordu. Bir başka ifadeyle tek taraflı çalışan bir sistemdi. Günümdüde, harici olarak birbirine bağlanan CBS ve GPS sistemleri birbirine entegre olmakta ve hatta aynı cihaz üzerinde her iki sistem çalıştırılabilmektedir (Wadhvani, 2000).

4. UYGULAMA

4.1 Kullanılan Yazılım Ve Donanım

Uygulamada CBS yazılımı olarak ArcPad programı kullanılmıştır. ArcPad ESRI tarafından üretilen, kolay kullanıma sahip, düşük maliyetli ve arazide CBS fonksiyonlarından bir kısmının kullanımına izin veren bir yazılımdır (harita görüntüleme, Zoom in/out/extent ve pan, seçili olan özelliklerin görüntülenmesi, grafik veri özelliklerinin görüntülenmesi, objelere fotoğraf, video, dokümanların bağlanması, alan ve mesafe bilgilerini elde etme, veri girişi). ArcPad ve GPS alıcısının beraber kullanılması ile araziden direkt olarak coğrafı verileri hızlı ve kolay bir şekilde bilgisayar ortamında depolanır. ArcPad yazılımı ESRI shape, raster (MrSID raster format, JPEG, BMP), formatlarını desteklemesi ile birlikte coğrafı koordinat (enlem/boylam), UTM, Gauss-Kruger, Lambert conformal konik gibi harita projeksiyonlarında çözüm vermektedir. Windows CE 2.11, Windows 95/98, NT, ve 2000 işletim sistemlerini destekler.

4.2 Donanım Entegrasyonu

GPS alıcısı olarak Magellan 315 kullanılmıştır. 11 koordinat sistemi ve 72 harita datumunun yanısıra kullanıcı seçimli birer adet harita datumu ve koordinat sistemi tanımlanabilmektedir. 500 adet nokta kaydı, 20 adet rota kaydı yapmak mümkündür (şekil 1). Magellan 315 GPS alıcısının konum belirleme duyarlılığı 3-15 metre arasında değişmektedir. GPS alıcısı seri olarak dizüstü bilgisayara veya cep PC'ye bağlanabilmektedir.



şekil 1: Uygulamada kullanılan donanım sistemi

4.3 Yazılım Entegrasyonu

Donanım olarak GPS alıcısı ve dizüstü bilgisayar seri olarak bağlandıktan sonra, ArcPad yazılımı otomatik olarak GPS alıcısını algılar ve böylece GPS alıcısından direkt olarak veri toplamaya başlar. Magellan 315 GPS alıcısı NMEA protokolü ile veri yollamaktadır. Bundan dolayı ArcPad yazılımında da NMEA protocol modu seçilerek iki sistem arasında ilişki kurulur ve yazılım GPS alıcısına gelen veriyi kendi hafızasına aktarmaya başlar. Bu aşamada GPS alıcısından gelecek olan verilerin, hangi veri yapısında kayıt edileceğinin de belirlenmesi gerekmektedir. Yani nokta, çizgi veya poligon modundan herhangi biri seçilir.

4.4 Farklı Özellikteki Yol Güzergahlarının Test Edilmesi

Bu bölümde, bölgesel bazda yapılacak CBS çalışmalarında tek kullanıcı GPS alıcısının sahip olduğu konum duyarlılığının uygulamalarda ne tür verilerin, nasıl toplanacağı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Test alanları iki temel gruba ayrılmıştır. Birincisi, geniş yollar (Devlet Kara Yolları), ikincisi ise yapılaşmış alanlardır. Yapılaşmış alanda kendi arasında üçe ayrılarak incelenmiştir.

4.4.1 Geniş Yollarda (Devlet Kara Yollarında) Yapılan Çalışma

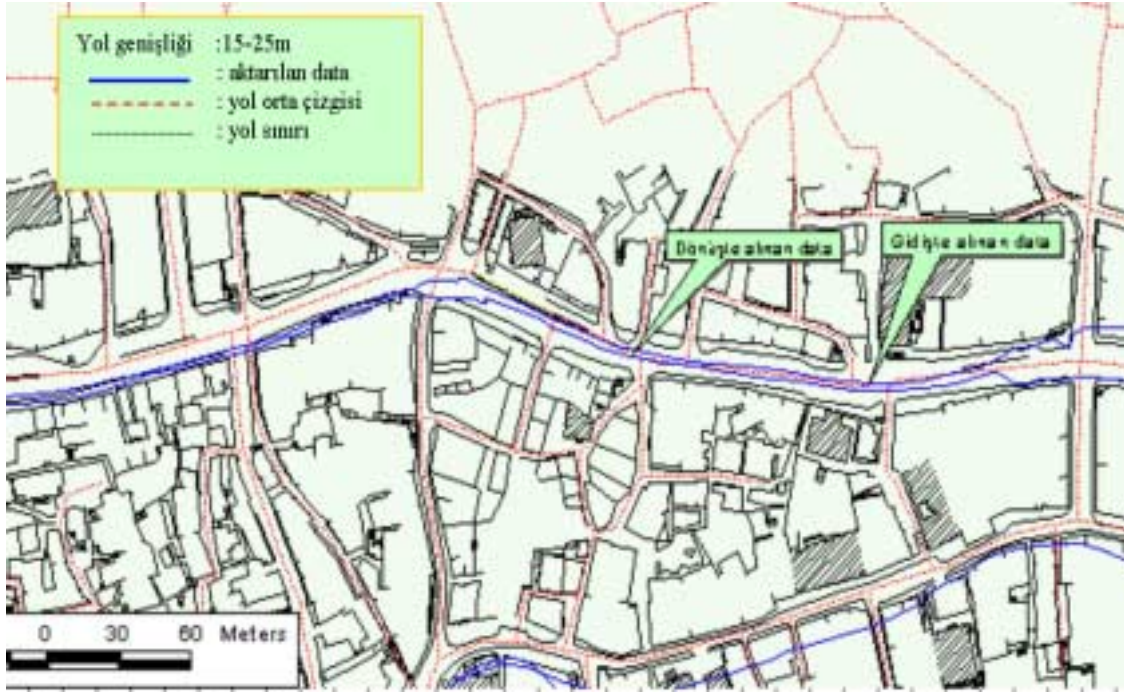
Devlet Kara Yollarında yapılan çalışmada iki güzergah kullanılmıştır. Birinci güzergah olarak: Trabzon Yomra-Akçaabat yol güzergahı, ikinci güzergah olarak: Değirmendere –Maçka yol güzergahı alınmıştır. Trabzon kenti sınırları içinde kalan alanların kontrolü, Trabzon kenti halihazır haritası altlık olarak kullanılarak yapılmıştır. Belediye sınırları dışında kalan kısımlarda ise, 2000 tarihli Landsat ETM+ uydu görüntüsünden sayısallaştırılan yol güzergahı kullanılarak kontrol yapılmıştır. Devlet kara yollarındaki bu kontrol sonucunda, yol güzergahı 1/1000 ölçekli haritadaki yol orta eksenine +/-5-10 metre mesafede kalarak istenilen sonuçları vermiştir.

4.4.2 Yapılaşmış Alanlarda Yapılan Çalışmalar

Yapılaşmış alanlar, yapılaşmanın az yoğun, yoğun ve çok yoğun olduğu alanlar olarak üçe ayrılarak incelenmiştir.

a)Yapılaşmanın Az Yoğun Olduğu Alanlar

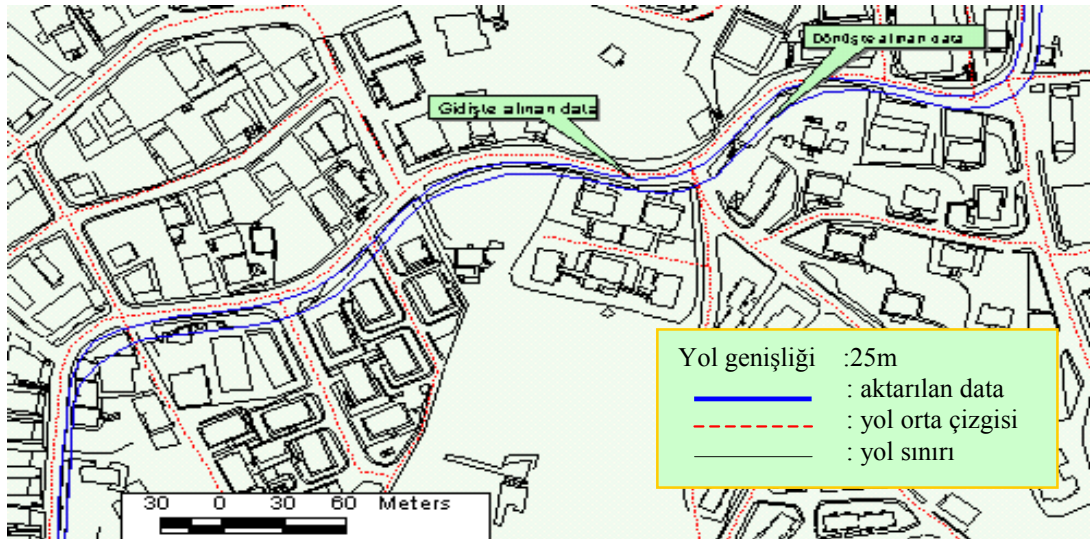
Bu gruba giren güzergahlardaki yolların genişlikleri yaklaşık olarak 25 metredir. Çalışma bölgesi ise Trabzon kent merkezindeki Maraş caddesidir. Şekil 2’de görüleceği gibi, bilgisayara aktarılan datalar genelde yol içine düşmüştür. Ancak yol genişliğinin azaldığı ve bina yüksekliklerinin arttığı yerlerde yolun dışına sapmalar olmuştur. Sapan çizgiler değerlendirildiğinde, uygulamanın istenilen duyarlık içinde olduğu görülecektir. Aktarılan datanın yol orta çizgisine uzaklığı +/-5-15m arasında değişmektedir. Yol dışına taşmaların nedeni olarak, bina yüksekliklerinden dolayı GPS’in sağlıklı sinyal alamaması söylenebilir.



Şekil 2: Yapılaşmanın az yoğun olduğu bölgedeki test sonucu

b)Yapılaşmanın Yoğun Olduğu Alanlar

İkinci gruba giren alanlardaki yol genişlikleri ortalama 15 metredir ve güzergah olarak da Erdoğdu mahallesine giden yol güzergahı seçilmiştir. Şekil 3'den de görüleceği gibi aktarılan dataların, bina yüksekliklerinin arttığı yerlerde yol dışına saptığı, bina yüksekliklerinin azaldığı yerlerde yol içine düştüğu gözlemlenmiştir. Yoldan

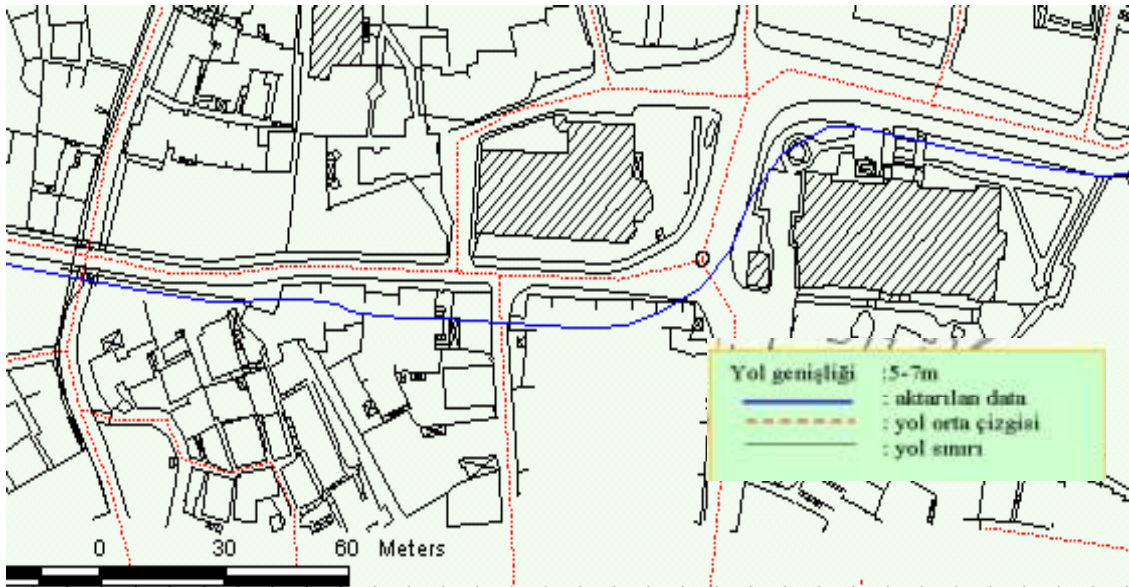


Şekil 3: Yapılaşmanın yoğun olduğu bölgedeki (Soğuksu Caddesi) test sonucu

sapan kısımların yol orta çizgisine mesafesi yaklaşık olarak +/-5-15metre arasındadır. Uydu sayısında belirgin bir düşüş gözlemlenmemiş fakat alınan sinyallerin kalitesinde düşme olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak ta yapılaşmanın yoğunlaşması gösterilebilir.

c)Yapılaşmanın Çok Yoğun Olduğu Alanlar

Çalışma alanı olarak Trabzon İlinin en yoğun sokaklarından biri olan, Uzun Sokak yol güzergahı seçilmiştir. Bu sokağın yol genişliği 5-7 metre arasında değişmektedir. Şekil 4'te görüleceği gibi araziden elde edilen yol güzergahları, halihazır harita verisi üzerinde görünen yol güzergahlarının dışına çıkmıştır. Bunun nedeni Uzun Sokak'ta yol genişliğinin çok az olması (5-7m) ve güzergah boyunca yapılaşmanın yoğun olmasıdır. Genelde güzergah boyunca bina yükseklikleri 4 katlıdır. GPS'in algıladığı uydu sayısı, 4 uydu ve altına düşmüştür. Alınan sinyallerin kalitesinde de belirgin bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bu olumsuzluklara rağmen güzergah boyunca



Şekil 4: Yapılaşmanın çok yoğun olduğu bölgedeki (Uzun Sokak) test sonucu

aktarılan dataların yol orta çizgisine uzaklıkları +/-5-15m arasında değişmiş, bunun dışına çıkmamıştır.

Yapılaşmanın çok yoğun olduğu ikinci bir bölge için bir test uygulaması da Yeni mahallede kooperatif evleri arasında yapılmıştır. Şekil 5'den de görüleceği gibi GPS'den bilgisayara aktarılan data halihazır haritadaki yol güzergahlarından çok fazla sapmıştır. Bunun nedeni olarak binaların bitişik ve yüksekliklerinin fazla olması ile yol genişliğinin oldukça küçük (4m) olmasıdır. Buradaki çalışmada uydu sayısında belirgin bir düşme (2-3 uydu) ve alınan sinyallerin kalitesinin de oldukça kötü olduğu gözlemlenmiştir. Bilgisayara aktarılan dataların, yol orta çizgisine olan uzaklıkları +/-10-15m arasında değişmektedir.



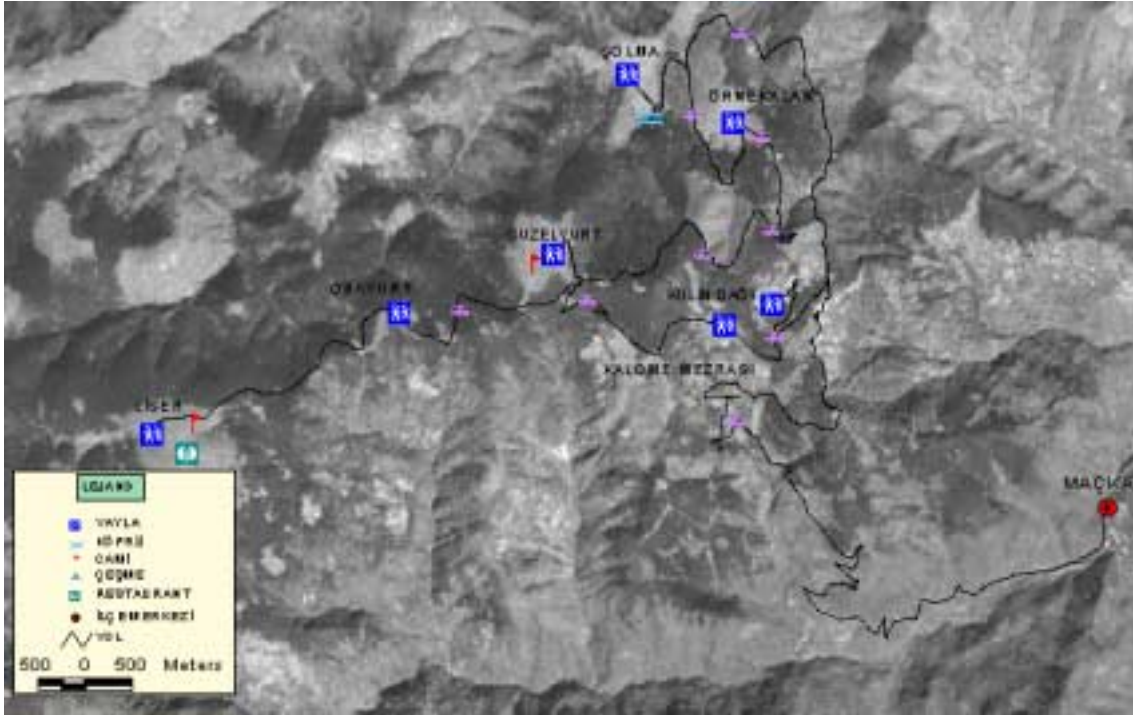
Şekil 5: Yapılaşmanın çok yoğun olduğu bölgede bilgisayara aktarılan data

4.4.3 Uydu Görüntüsü Üzerine Online Yol Verisi Aktarımı

Çalışma bölgesi olarak Trabzon Maçka ilçesinde bulunan rnekealan, Güzelyurt, Kulin, Lişer ve Obayurt yaylaları seçilmiştir. Bu yaylalara giden yollar GPS 315 aleti ve ArcPad programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Yol bilgisinin yanında GPS 315 aletine; yayla merkezleri, yaylada bulunan önemli yerlerin koordinatları ayrıca yol üzerinde bulunan eşme, köprü gibi sanat yapılarının da koordinatları alınmıştır. Test çalışmalarında olduğu gibi ormanlık alanlarda (yoğun bölge) GPS'in algıladığı uydu sayısı (2-4 uydu) ve alınan sinyalin kalitesinde görülür düşüşlerin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak yayla merkezlerinde (açık alan) GPS'in algıladığı uydu sayısı(7-10) ve sinyal kalitesinin çok iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Test alışması esnasında bilgisayara aktarılan yol bilgisi ve çalışma esnasında GPS 315 aletine kaydedilen bilgiler uydu görüntüsü üzerine işlenmiştir (Şekil 6). Uydu görüntüsü incelendiğinde yayla merkezlerinin yerlerine oturduğu grlmüştir. Yol bilgisinin, yapılan yorumlamadan sonra doğruluğu anlaşılmıştır.



Şekil 6: Landsat ETM+ uydu görüntüsü üzerine online GPS veri aktarımı

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

CBS uygulamasında GPS kullanımının büyük bir avantajı da toplanan verinin doğrudan sayısal formda olmasıdır. Bu özellik arazide toplanan verilerin kaba hata olmadan bilgisayar ortamına transfer edilmesine imkan sağlamaktadır. Uygulama bölümlerinden de anlaşılacağı gibi, GPS ile toplanan veriler online veya daha sonradan bilgisayar ortamına aktarılabilir. Aktarılan verilere bakıldığında GPS'in kapalı yerlerde uydu ile bağlantı kuramaması veya sinyallerin zayıf gelmesinden dolayı, yoğun bölgelerde hata miktarı maksimum +/-15-20m civarındadır. Buradan anlaşılacağı gibi 1:500000 ve daha küçük ölçekli uygulamalarda bu sistem kullanılabilir. Yapılaşmanın az yoğun olduğu bölgelerde ve açık arazilerde uygulama iyi sayılabilecek sonuçlar vermiştir (hata miktarı: +/-2-10m). Dolayısıyla bu tür alanlardaki 1:25000 ölçekli harita hassasiyetindeki uygulamalarda tek kullanıcı GPS alıcısı veri toplama aşamasında kullanılabilir. Şehirler arası yollar, ara sokaklar, köy ve orman yolları için El GPS'i ile elde edilen yol güzergah bilgileri, 1/25000 ve daha küçük ölçekli harita hassasiyetinde veri kullanan kurum ve kuruluşlar için ideal bir veridir.

Sistemin açık arazilerde iyi sonuç vermesinden dolayı, haritası olmayan yerlerde yol güzergahlarının belirlenmesi işlemleri yapılabilir. Bu sayede genelde haritası olmayan köy yolları, yayla yolları belirlenebilir. Yol güzergahlarının yanında köy ve yaylalarda bulunan önemli yerlerin koordinatları da (köy/yayla merkezleri, turistik oteller, çeşme, köprü vb. bilgiler) elde edilebilecektir.

6. KAYNAKLAR

- ESRI, Using ArcPad, Environmental Systems Resarch Institue, Redlands, California, USA, 2000.
- Gün, İ., Magellan 315 El GPS'İ ile ArcPad Yazılımının Entegrasyonu, KTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Bölümü, Bitirme Tezi, Trabzon, 2002.
- Kennedy, M., The Global Positioning System and GIS, AnnArbor Press, Inc., Chelsea, Michjigan, USA, 1996.
- Magellan GPS 315 Kullanım Klavuzu, Geomatics Harita Mühendislik Müşavirlik Ltd. şti. Ankara, 2000
- Yomralıoğlu, T., Coğrafi Bilgi Sistemleri Temel Kavramlar ve Uygulamalar, Seçil Ofset, İstanbul, 2000.
- Wadhvani, A., <http://www.gisdevelopment.net/technology/mobilemapping/techmp005.htm>.

GPS AĞLARINDA DEFORMASYONLARIN STATİK VE KİNEMATİK MODELLERLE BELİRLENMESİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ BİR DEFORMASYON YAZILIM PAKETİ

Temel BAYRAK, Mualla YALÇINKAYA
KTÜ, MMF, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü TRABZON
tbayrak@ktu.edu.tr, mualla@ktu.edu.tr

Özet: Son yıllarda deformasyon ölçmeleri, jeodezinin en önemli uygulama alanlarından biri olmuştur. Hareketlerin izlenmesi çalışmalarında genellikle statik deformasyon modelleri kullanılmaktadır. Zamanın dikkate alınmadığı uygulamalarda statik modeller yeterli olmaktadır. Buna karşılık günümüzde hareketin davranışının da izlenmesini gerektiren mühendislik uygulamaları yapılmaktadır. Bu uygulamalarda, konuma ilave olarak hareketlerin davranışlarını (hız, ivme) zamana bağlı olarak belirleyen kinematik deformasyon modelleri tercih edilmektedir. Günümüzde artık deformasyonların belirlenmesi için gerekli olan periyodik ölçülerin yapılmasında da yaygın olarak GPS alıcıları kullanılmaktadır.

Bütün bu gelişmelerden dolayı bu çalışmada, GPS ağlarında statik ve kinematik deformasyon modelleri kullanılarak hareketlerin belirlenmesi için bir bilgisayar yazılımı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yazılımın ilk aşamasında GPS baz vektörlerinin en küçük kareler yöntemine göre dengelenmesi yapılmaktadır. İkinci aşamasında üç boyutlu statik ve kinematik modellerle deformasyon analizi yapılmaktadır. Statik modelde deformasyon analizinde Teta-Kare (θ^2) Ölçütü yöntemi kullanılmıştır. Hareketleri zamana bağlı bir fonksiyonla belirleyen kinematik deformasyon modelinde Kinematik Tek Nokta Modeli kullanılmıştır ve Kalman-Filtreleme yöntemine göre çözümü yapılmıştır. Bu aşamada statik ve kinematik modellerle hesaplanan hareket parametreleri istatistik olarak test edilmekte ve anlamlı hareket eden noktalar ve hareket parametreleri belirlenmektedir. Yazılımın son aşamasında da istatistik olarak anlamlı bulunan sonuçlar sayısal olarak sunulmaktadır. Yazılım Windows işletim sistemi altında çalışabilen ve mevcut maksimum belleği kullanabilen Microsoft Fortran Visual Workbench v.1.0 derleyicisiyle yapılmıştır. Yazılım Trabzon ili Maçka ilçesi Kutlugün Köyünde devam eden bir heyelanın izlenmesi için kurulan bir mikro deformasyon izleme ağında başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

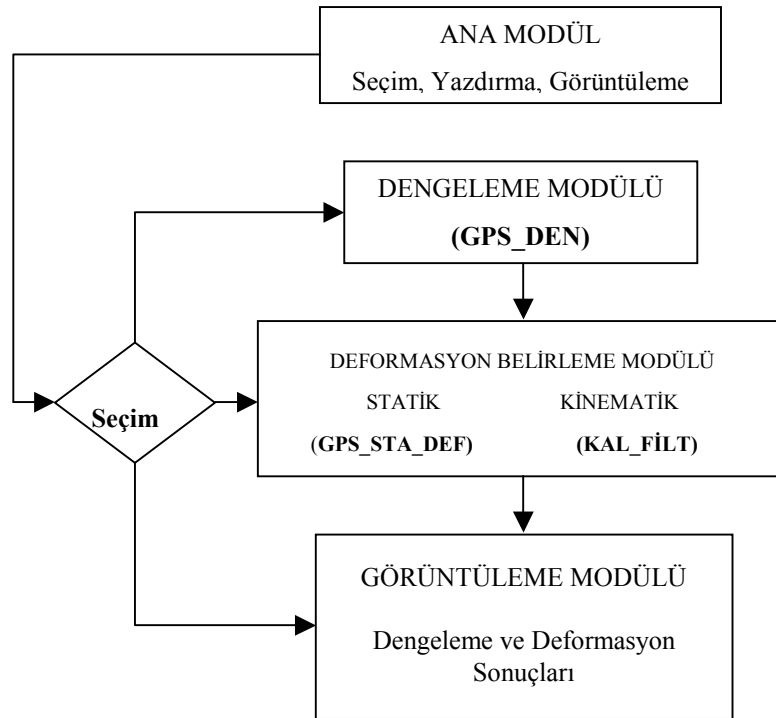
1. GİRİŞ

Gelişen ölçme teknikleri, deformasyon analizinde yeni değerlendirme modellerinin ve yazılımların kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Günümüzde artık mühendislik ölçmelerinin amacı, köprüler, barajlar, kuleler ile heyelanlara ve depremlere maruz kalan kütleler gibi objelerin davranışlarını analiz etmek olmuştur. Bu uygulamalarda, konuma ilave olarak (statik model) hareketlerin davranışlarını (hız, ivme) zamana bağlı olarak belirleyen kinematik deformasyon modelleri tercih edilmektedir. Hareketlerin belirlenmesi ve hareketlerin davranışlarının yorumlanması hareketi izlemekle mümkündür. Son yıllarda deformasyon izleme çalışmalarında GPS klasik ölçme tekniklerinin yerini almıştır.

Bu makalede GPS ile periyodik olarak izlenmiş jeodezik ağlarda deformasyonların statik ve kinematik modellerle belirlenmesine yönelik geliştirilmiş bir yazılım paketi sunulmaktadır. Yazılım Windows işletim sistemi altında çalışabilen Microsoft Fortran Visual Workbench V. 1.0 programlama dilinde yazılmıştır. Bu program yardımıyla deformasyonlar statik ve kinematik olarak belirlenip sonuçların karşılaştırılması yapılabilmektedir.

2. DEFORMASYON YAZILIM PAKETİ

Yazılım paketi, dengeleme, deformasyon belirleme ve görüntüleme olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Genel akış şeması Şekil 1’de verilen paket, deformasyonların izlenmesine yönelik olarak yazılmıştır ve istenilen özelliklere göre geliştirilebilecek esnekliğe sahiptir.



Şekil 1. Yazılım paketinin iş akış şeması

2.1 Dengeleme Modülü

Yazılım paketinin ilk aşaması olan GPS_DEN modülü, en küçük kareler prensibine dayanarak dolaylı ölçüler yöntemine göre GPS deformasyon ağını serbest olarak dengeler. Modül dengeleme işleminde ağ noktalarının yaklaşık koordinatlarını, ölçülen bazları ve GPS faz ve pseudorange gözlemlerinden her kenar için elde edilmiş varyans-kovaryans matrislerini kullanır. GPS_DEN modülü Data-Snooping yöntemine göre korelasyonları dikkate alarak uyuşumsuz ölçüler testini yapabilmektedir ve ağın duyarlık ve güven ölçütlerini hesaplayabilmektedir. Sonuçta dengeli koordinatları ve onlara karşılık gelen varyans-kovaryans matrisini ürün olarak sunabilmektedir. Ayrıca modül statik ve kinematik analizler için gerekli tüm dosyaları hazırlayabilmektedir.

Dengeleme işleminin matematik modeli, uyuşumsuz ölçüler testi ve duyarlık ve güven ölçütlerine ait teorik bilgiler [Öztürk, 1987; Yalçinkaya, 1994; Konak, 1994; Eren, Uzel, 1995; Dilaver 1996; Wolf, 1997]'den elde edilebilir.

Dengeleme modülünün GPS dengelemesine, uyuşumsuz ölçüler testine ve GPS ağı duyarlık ve güven optimizasyonuna ait kısmi sonuçlar sırasıyla Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. GPS dengelemesi modülünde tüm ara işlemler için yazdırmalar mevcuttur. Seçim kullanıcının isteğine bırakılmıştır. Dengeleme modülünde tüm denetim işlemleri, model hipotezi ve uyuşumsuz ölçüler testi yapılmaktadır. Sonuçta uyuşumlu ölçülerle serbest ağ dengelemesi yapılarak veriler hesaplanmaktadır.

```

*** GPS DENGELEME PROGRAMI ***

Ağıdaki Nokta Sayısı = 14
Ağıdaki Ölçü Sayısı =132

Ölçül Standart Sapma = .919 cm

*** DENETİM İŞLEMLERİ ***

          VTPv (cm) =          84.088
          VTPl (cm) =         -84.072
İTPl - dxT * aTPl (cm) =          84.082

NN  DEN.X(m)  nx(cm)  DEN.Y(m)  ny(cm)  DEN.Z(m)  nz(cm)
  1  3710656.8976 .11  3083935.1534 .10  4157810.2912 .12
  2  3710501.7145 .12  3084005.0948 .11  4157907.9609 .12
  3  3710542.0876 .13  3084033.1875 .13  4157788.0150 .13
  4  3710709.5558 .09  3084028.6265 .08  4157648.6582 .10

ÖLÇÜL DEĞER (TANI DENGELEMESİNDEN)  So = .919
SONÖLÇÜL DEĞER (ÜÇ BOY. SER.DEN. DEN)  Ho = .951

TEST BÜYÜKLÜĞÜ  T = 1.071
F-TABLO DEĞERİ ----> F 93, 93, 0.975  q = 1.502

T>q olduğu için ***** MODEL UYUŞMULUDUR *****

```

Şekil 2. GPS dengeleme sonuçları

```

*** UYUŞMUSUZ ÖLÇÜLER TESTİ ***

ÖLÇÜL DEĞER (TANI DENGELEMESİNDEN)  So = .919
SONÖLÇÜL DEĞER (ÜÇ BOY. SER.DEN. DEN)  Ho = 1.257

TEST BÜYÜKLÜĞÜ  T = 1.871
F-TABLO DEĞERİ ----> F, 93, 93, .975  q = 1.502

T>q olduğu için ***** MODEL UYUŞMUSUZDUR *****

Sınır Değer  q = t, 93, .987 = 2.276

16 Kenar (5 - 4 )  2.276  .572  .089  .254
17 Kenar (6 - 10 )  2.276  .269  .808  .145
18 Kenar (6 - 11 )  2.276  .803  1.207  2.467
19 Kenar (6 - 13 )  2.276  .280  .317  .407

TEST DEĞERİNİN AIT OLDUĞU UYUŞMUSUZ KENAR ( 6 - 11 )
BU KENARA AIT TEST DEĞERLERİ --> tx = .803  ty = 1.207  tz =2.467

```

Şekil 3. Uyuşumsuz ölçüler testi sonuçları

```

*** GPS AĞI OPTİMİZASYONU ***

R1 : Redundanz Payı : R1>0.3 ya da R1>0.5 ise ölçüler iyi
Doi : İç Güven Ölçütü : <=6*M1 ya da 8*M1 ise ölçüler iyi
Loi : Dış Güven Ölçütü : <= 6 ya da 10 ise ölçüler iyi

r=n-u+d = 93 <----> 93.00 = iz(OvVP)

R1 Doj 6*Mx Loi
1 KENAR DX( 2 - 1 ) .54 .76 .84 3.71
2 KENAR DX( 2 - 3 ) .56 .87 .98 3.55
3 KENAR DX( 2 - 4 ) .83 .64 .88 1.79

R1 Doj 6*My Loi
1 KENAR DY( 2 - 1 ) .37 .82 .75 5.20
2 KENAR DY( 2 - 3 ) .66 .79 .96 2.90
3 KENAR DY( 2 - 4 ) .76 .62 .80 2.26

R1 Doj 6*Mz Loi
1 KENAR DZ( 2 - 1 ) .54 .82 .90 3.71
2 KENAR DZ( 2 - 3 ) .55 .89 .99 3.62
3 KENAR DZ( 2 - 4 ) .80 .70 .94 2.01

*** HATA ELİPSOİDİNİN ELEMANLARI ***

NN Mx My Mz Np AH BH CH Mp Xdon Ydon Zdon
1 .111 .103 .123 .195 .180 .057 .080 .205 188.887293 97.165177 89.262150
2 .128 .117 .126 .214 .205 .054 .076 .225 191.106136 99.653309 91.112984
3 .134 .134 .139 .235 .218 .062 .098 .247 183.043264 96.431862 83.440850

*** BAĞIL HATA ELİPSOİDİNİN ELEMANLARI ***

KENAR AHB BHB CHB NH Xdon Ydon Zdon
1 ( 2 - 1 ) .226 .061 .093 .252 189.153539 100.176159 89.154998
2 ( 2 - 3 ) .268 .068 .105 .296 187.197866 98.473205 87.291719
3 ( 2 - 4 ) .239 .065 .098 .266 188.553362 99.778993 88.555543

```

Şekil 4. GPS ağı duyarlık ve güven optimizasyonu sonuçları

Modülün duyarlık ve güven optimizasyonu kısmında redundanz payı, iç güven ölçütü, dış güven ölçütü, hata elipsoidinin elemanları ve bağıl hata elipsoidinin elemanları hesaplanarak ağın kalitesi yönündeki bilgiler elde edilmektedir.

2.2 Deformasyon Belirleme Modülü

Deformasyon belirleme modülü, statik (θ^2 -Ölçütü) ve kinematik (tek nokta modeli) deformasyon analizlerini içermektedir.

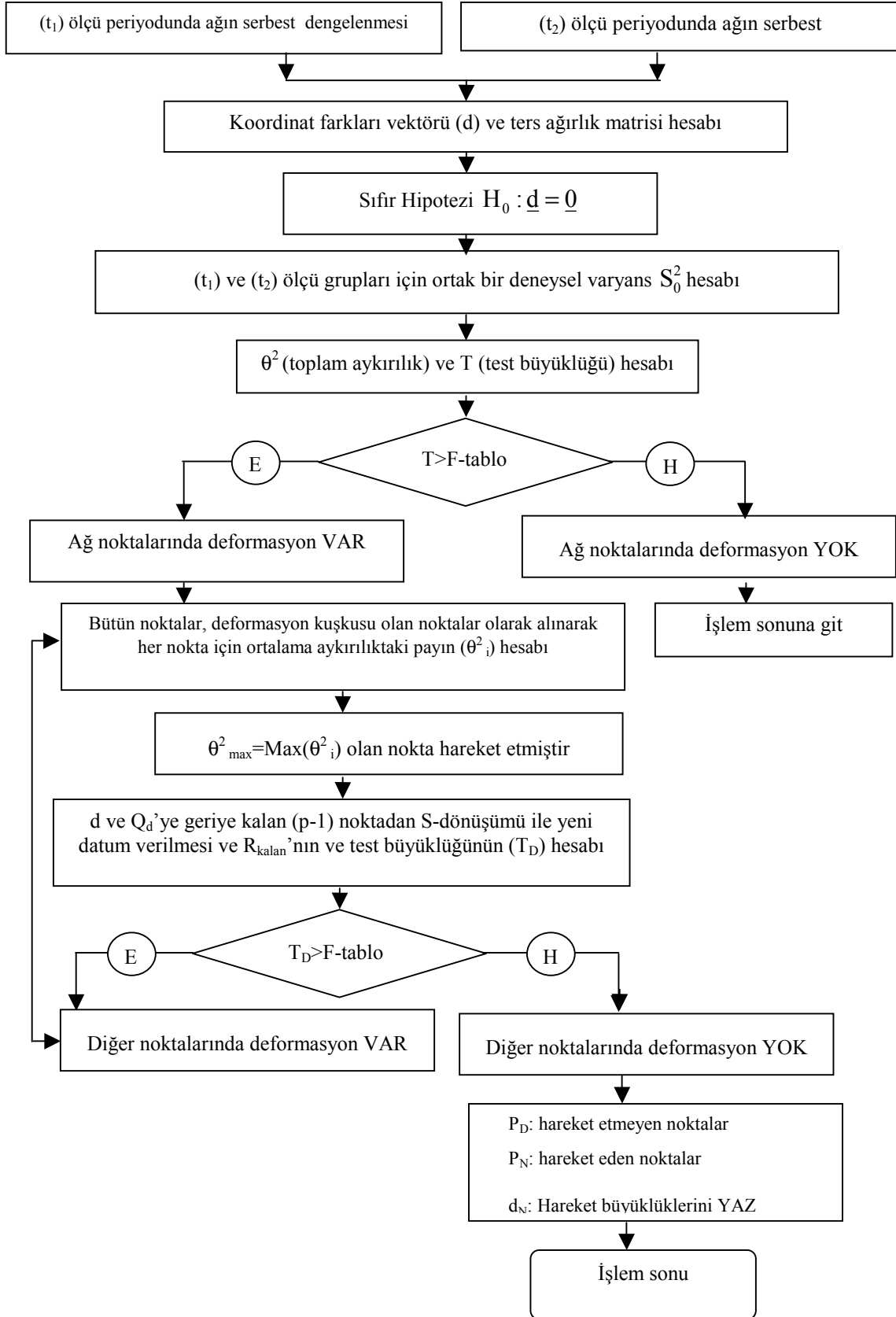
2.2.1 Statik (θ^2 -Ölçütü) Deformasyon Analizi

Statik model, zamanı dikkate almaksızın, bir objenin geometrik reaksiyonları ve yükler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tanımlar. Ölçme periyotları arasındaki koordinatlardaki farklar hem araştırılan objedeki deformasyonu hem de gözlemlerdeki hataları yansıtır. Deformasyon incelemesine konu bölge veya yapının karakteristik noktalarının, deformasyon vektörlerinin zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız olarak belirlenmesi statik modelin konusu içine girer. Statik model deformasyon belirleme amaçlı mühendislik uygulamalarında en çok uygulanan bir deformasyon analizi yoludur.

GPS_STA_DEF programı, θ^2 -Ölçütü yöntemine göre ağ noktalarının iki periyot sonunda elde edilen koordinat farklarını ve onlara ait varyans-kovaryans matrislerini kullanarak ağdaki noktaların sabit ya da hareketli olup olmadıklarını istatistik olarak belirler. Kullanılan yöntem göre ağın herhangi bir noktasında deformasyon olup olmadığını araştırmak için ağın hiçbir noktasında deformasyon yoktur şeklinde bir kabul yapılır. Koordinat farkları ve onlara karşılık gelen varyans-kovaryans matrislerinden bir ortalama aykırılık değeri ve her iki ölçü kümesine ait ortak bir standart sapma hesaplanır. Bu değerlerden test büyüklüğü ve ona karşılık gelen F-tablo değeri hesaplanır. $T > F$ -tablo ise ağ noktalarından birinde ya da birkaçında deformasyon olduğuna karar verilir. Sonraki adımda tüm ağ noktalarına ait ortalama aykırılıklar ve onlara karşılık gelen test büyüklükleri hesaplanır. Ortalama aykırılık değeri maksimum (R_{max}) olan noktada deformasyon olduğuna karar verilir. İlgili nokta, farklar ve onlara karşılık gelen varyans- kovaryans kümesinden atılır. Ağda deformasyon bulunan başka nokta olup olmadığını araştırmak için koordinat farkları ve onlara karşılık gelen varyans-kovaryans matrisine bir S dönüşümü ile geriye kalan noktalardan yararlanarak yeni bir datum verilir. Geriye kalan noktalardan tekrar bir ortalama aykırılık değeri ve ona karşılık gelen F-tablo değeri hesaplanır. $T > F$ -tablo ise ağ noktalarında birinde ya da bir kaçında deformasyon vardır denir ve yukarıdaki işlem adımları tekrarlanır. Bu işlemlere test büyüklüğü tablo değerinden küçük oluncaya kadar devam edilir. Yöntem yinelemelidir. Her defasında bir ağ noktası test edilebilir. Yöntemin sayısal çözümüne ait bir örnek Şekil 5’de gösterilmektedir. Ayrıca yöntemin akış diyagramı Şekil 6’ da verilmektedir. Yazılımdan Şekil 5’de görüldüğü gibi özet bilgiler alınabileceği gibi daha ayrıntılı çıktılarda alınabilir. Konunun teorisi ile ilgili daha açıklayıcı bilgiler [Pelzer, 1971, 1985; Öztürk, 1978, 1992; Koch, 1984; Caspary, 1988; Yalçınkaya, 1994; Tanır 2000]’den elde edilebilir.

NN	Rmax	Test	Sınır	KARAR	dx(cm)	dy(cm)	dz(cm)	DEF.
1	120599.06	2227.64	1.47	T > q	-13.82	16.23	-4.84	Uar
2								Yok
3	5945.23	277.03	1.51	T > q	-1.97	4.41	-6.94	Uar
4	1624.75	101.43	1.56	T > q	2.26	-0.54	1.82	Uar
5	5149.56	287.14	1.49	T > q	-3.44	2.24	-1.01	Uar
6	11.82	5.80	1.99	T > q	-0.33	0.18	-0.16	Uar
7	1211.52	59.01	1.59	T > q	-1.47	2.41	-1.83	Uar
8								Yok
9	1738.75	118.25	1.53	T > q	-3.12	1.03	-1.36	Uar
10								Yok
11	152.99	10.77	1.68	T > q	-1.06	-0.22	-1.22	Uar
12	38.81	6.04	1.84	T > q	-0.08	0.74	-0.34	Uar
13								Yok
14	433.75	18.75	1.63	T > q	-1.10	0.73	0.39	Uar

Şekil 5. Statik deformasyon analiz sonuçları

Şekil 6. θ^2 -Ölçütü ile deformasyon analizi iş akış şeması (Tanır 2000)

2.2.2 Kinematik (Tek Nokta Modeli) Deformasyon Analizi

Kinematik modelin amacı, neden olan güçleri dikkate almaksızın zamana bağlı fonksiyonlar yardımıyla nokta hareketlerinin uygun bir tanımını bulmaktır. Kinematik modelde konu, üzerinde deformasyon incelenecek bölgenin karakteristik noktalarının hareketleri bu hareketlerin hızları ve ivmeleridir. Kinematik deformasyon analizinde, jeodezik ağda zamanla hareket eden noktalar, hareketin büyüklüğü, hareket hızları ve ivmeleri zamana bağlı bir fonksiyonla saptanır. Deformasyon alanında düzgün bir hareket olduğu varsayımı altında yer değiştirme vektörü hız ve ivmenin bir fonksiyonudur Hareket parametrelerinden oluşan durum vektörü, konum ve konumun zamana göre birinci türevi hız, ikinci türevi ivmeden oluşan değişkenlerdir

Bu çalışmada deformasyonların kinematik modelle belirlenmesinde Kinematik Tek Nokta modeli kullanılmıştır. Bu model, Hannover yaklaşımına göre adım adım aşağıdaki şekilde uygulanmıştır.

1. Adım : Her periyot ölçüleri serbest ağ yöntemi ile dengelenmekte ve hesaplanan

x_k : Dengeli koordinatlar vektörü

$(Q_{xx})_k$: Ters ağırlık matrisi

$(s_0^2)_k$: Birim ağırlığın varyansı

değerleri ikinci adımda veri olarak kullanılmaktadır.

2. Adım : Bu adımda hareketler,

$$x_j^{(k)} = x_j^{(0)} \quad (1)$$

şeklinde oluşturulan statik modelle belirlenmektedir. Bu modelin sıfır hipotezi “ $x_0^{(s)}$: **Zamanlar arasında geçen sürede hareket oluşmamıştır**” şeklinde oluşturulmaktadır. Test sonucunda bu hipotez reddedilirse, tüm bölgede hareket olup olmadığına bakılarak hareket varsa diğer adıma geçilmektedir.

3. Adım : (1) bağıntısındaki statik model hız parametreleri ile genişletilerek doğrusal model,

$$x_j^{(k)} = x_j^{(0)} + v_j(t_k - t_0) \quad (2)$$

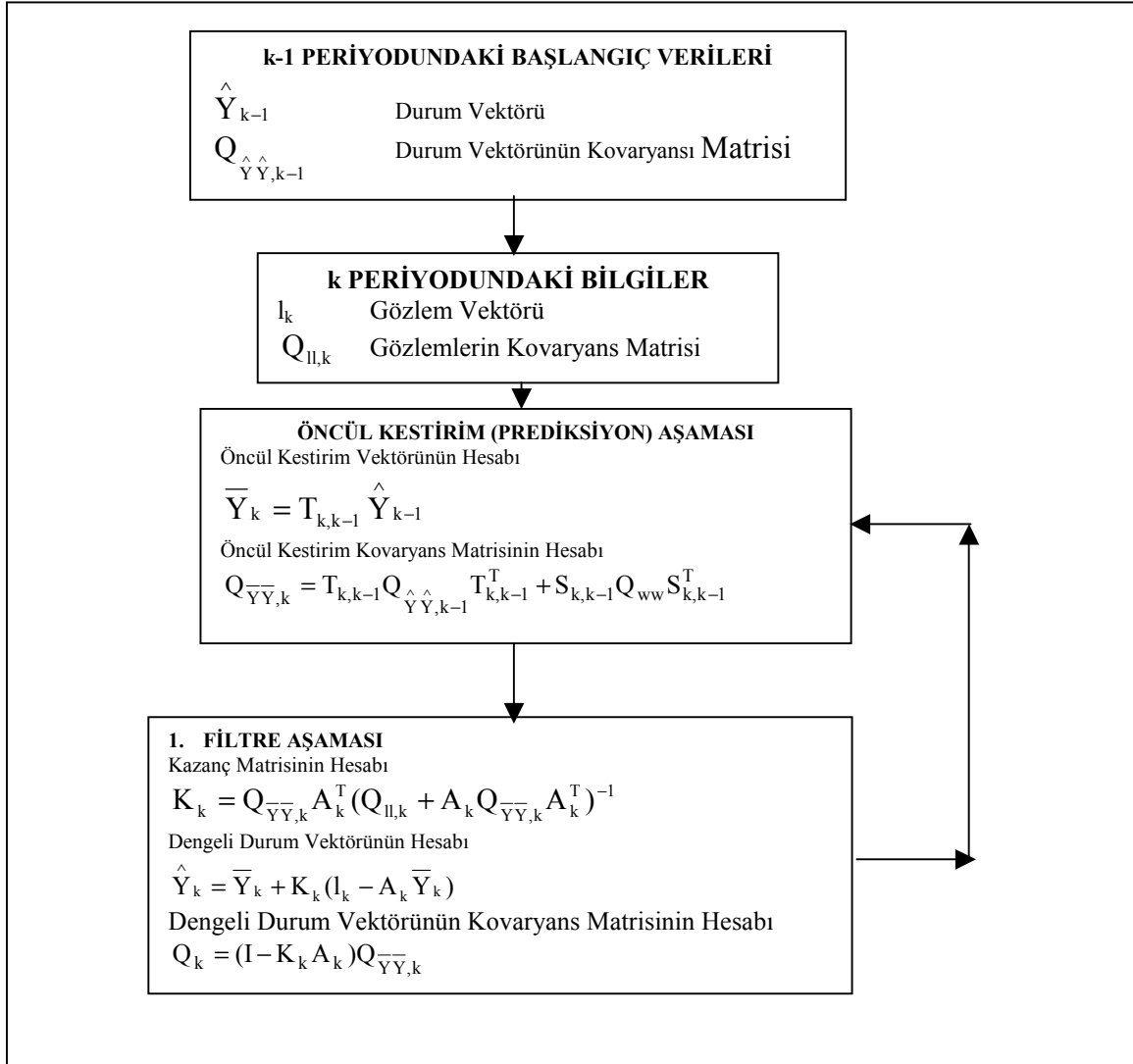
şeklinde oluşturulmaktadır. Doğrusal modelin sıfır hipotezi “ $x_0^{(d)}$: **Tüm noktalarda doğrusal hareket vardır**” biçiminde kurulmaktadır. Eğer test sonucunda bu hipotez reddedilirse daha yüksek dereceli bir hareket modeli olan karesel hareket modeline geçilmektedir.

4. Adım : (2) modeli ivme parametresi ile genişletilerek karesel model,

$$x_j^{(k)} = x_j^{(0)} + v_j(t_k - t_0) + \frac{1}{2} a_j(t_k - t_0)^2 \quad (3)$$

biçiminde oluşturulmaktadır. Bu modelin sıfır hipotezi “ $x_0^{(k)}$: **Tüm noktalarda ivmesel hareket vardır**” biçiminde kurulmuştur. Karesel modelden daha yüksek derecede modele yorumlama hatası yapılabilme olasılığı nedeniyle geçilmemiştir.

Kinematik tek nokta modelinde (3), her noktanın hareket parametrelerinin aynı anda dengeli olarak hesaplanabilmesi için çok sayıda ölçme periyodunda yapılan ölçülere gereksinim vardır. Bu nedenle bu model az sayıda ölçme periyoduna gereksinim duyan Kalman-Filtreleme yöntemi ile çözülmüştür. Konunun teorisi ile ilgili daha açıklayıcı bilgiler [Holdahl, 1979; Holdahl ve Hardh, 1979; Pelzer, 1985, 1986, 1987; Yalçinkaya, 1994, 1996, 2001; Gülal, 1996, 1999; Rossikopoulos, 1998]’den edinilebilir. Kinematik Tek Nokta Modelinin Kalman-Filtreleme tekniği ile çözümünün iş akış şeması Şekil 7’de ve Kalman-Filtreleme ile çözüme ait sonuçlar şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. KALMAN-Filtreleme tekniğinin iş akış şeması (Yalçinkaya 2001)

kinematic - Not Defteri

Dosya Düzen Ara Yardım

*** KINEMATIC DEFORMASYON ANALIZI ***

T > q (+) Anlamli Hareket Var
T < q (-) Yok

NN	Koordinat Bil.(cm)			Test Buyuklukleri			S.Deg.	KARAR
	dx	dy	dz	Tdx	Tdy	Tdz		
1	-16.09	18.46	-6.40	66.71	76.81	26.67	1.98	+
2	0.07	-0.02	-0.53	0.32	0.09	2.40	1.98	-
3	-2.90	5.22	-7.93	11.84	21.67	33.00	1.98	+
4	1.80	-0.27	1.54	7.62	1.15	6.47	1.98	+
5	-4.69	3.20	-2.11	19.56	12.79	8.65	1.98	+
.								
.								
NN	Hiz Bil.(cm / 3Ay)			Test Buyuklukleri			S.Deg.	KARAR
	vx	vy	vz	Tvx	Tvy	Tvz		
1	-1.31	2.25	-0.16	12.49	22.36	1.49	1.98	+
2	0.01	0.00	-0.06	0.34	0.00	1.45	1.98	-
3	-0.95	1.28	-2.26	8.16	11.20	19.66	1.98	+
4	-0.21	-0.39	-0.27	2.06	3.95	2.50	1.98	+
5	-1.17	0.81	-0.60	9.66	6.75	4.62	1.98	+
.								
.								
NN	Ivme Bil.(cm / 3Ay2)			Test Buyuklukleri			S.Deg.	KARAR
	ax	ay	az	Tax	Tay	Taz		
1	0.11	0.05	0.13	4.64	2.09	5.07	1.98	+
2	0.00	0.00	0.00	0.20	0.06	0.39	1.98	-
3	-0.15	0.17	-0.34	5.51	6.27	12.21	1.98	+
4	-0.10	-0.09	-0.11	4.11	3.72	4.17	1.98	+
5	-0.16	0.11	-0.09	5.44	3.88	2.86	1.98	+
.								
.								

Şekil 8. Kinematik deformasyon analiz sonuçları

2.3 Görüntüleme Modülü

Yazılımın bu bölümü dengeleme ve deformasyon analiz sonuçlarının sayısal olarak görüntülenmesini sağlamaktadır. Sonuçların görüntülenmesine ait dosya örnekleri yukarıda verilmiştir. Kullanıcı sonuç dosyalarına ihtiyacına göre yazdırmalar yapabilir. Yazılım bu konuda esnekler.

3. SONUÇLAR

Deformasyon ağlarının değerlendirilmesine yönelik olarak geliştirilen bu yazılım paketi, önce her periyottaki GPS ölçülerini serbest ağ yöntemine göre dengeleyerek, ağın hem statik hem de kinematik tek nokta modeli ile deformasyon analizini yapabilmektedir. Böylece kullanıcı statik ve kinematik model sonuçlarını karşılaştırılabilmektedir. Yazılımda, Statik modelle hareketler, ayırma gücü fazla olan θ^2 -ölçütü yöntemine göre hesaplanmıştır. Kinematik tek nokta modelinde, her noktanın x, y, ve z yönlerindeki hareketi, hareketin hızı ve ivmesi zamana bağlı olarak belirlenebilmektedir. Bu

yazılımda kinematik hareket parametreleri Kalman-Filtreleme yöntemiyle hesaplanmaktadır. Parametrelerin hesabı, genişletilmiş fonksiyonel modelin testine göre adım adım yapılabilmektedir. Böylece ara sonuçların görülebilmesi ve deformasyonun seyrinin izlenmesi olanağı da sağlanabilmektedir.

4. KAYNAKLAR

- Caspary, W.F., 1989. Concepts of Network and Deformation Analysis, Monograph 11, Edited by J.M. Rueger, The University of New South Wales, Australia, 183p.
- Dilaver, A., Jeodezik Ağlarda Kaba Hatalı Ölçüleri Ayıklanması ve Güven Ölçütleri, K.T.Ü. M.M.F., Fakülte Yayın No:1996/2.
- Eren, K., Uzel, T., GPS Ölçmeleri, 1995, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, Yayın No:301.
- Gülal, E., Hoşbaş, R.G., Uzel, T., Kinematik Deformasyon Analizinde Kalman-Filtreleme Tekniği, Y.T.Ü.D., Sayfa 30-37, 1996/3-4.
- Gülal, E., Kalman-Filtreleme Tekniğinin Deformasyon Analizinde Uygulanması, Y.T.Ü.D., 1999/1.
- Holdahl, R.S., Hardh, L.R., Solvability and Multiquadric Analysis as Applied to Investigations of Vertical Crustal Movements, Proceedings of the IUGG Interdisciplinary Symposium, Recent Crustal Movements, Australia, 1979.
- Koch, K.R., Statistical Tests for Detecting Crustal Movements Using Bayesian Inference, NOAA Tech. Rep. NOS NGS 29, pp. 1-6, National Geodetic Survey, Rockville, Md., 1984.
- Konak, H., Yüzey Ağlarının Optimizasyonu, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
- Öztürk, E., Jeodezik Deformasyon Ölçülerinin İrdelenmesi θ^2 -Ölçütü, Harita Dergisi, 85, 1978, 44-52.
- Öztürk, E., Jeodezik ağlarda duyarlık ve Güven Ölçütleri, Türkiye I. Harita ve Teknik Kurultayı, 23-27 Şubat, 1987, Ankara, 641-699.
- Öztürk, E., Şerbetçi, M., Dengeleme Hesabı, Cilt III, K.T.Ü. Basımevi, Trabzon, 1992.
- Pelzer, H., Zur Analyse Geodetischer Deformationsmessungen, DGK, R.C., Nr. 164, Munchen, 1971.
- Pelzer, H., Statische, Kinematische und Dynamische Punktfelder, in: Geodatische Netze in Landes-und Ingenieurvermessung II, PELZER, H., Stuttgart, 1985.
- Pelzer, H., Application of Kalman- and Wiener-Filtering on the Determination of Vertical Movements, The Symposium on Height Determination on Recent Vertical Crustal Movements in Western Europa, Hannover, Determination of Heights and Height Changes, 539-555, 1986.
- Pelzer, H., Deformationsuntersuchungen auf der Basis Kinematischer Bewegungsmodelle, AVN, 94 2, 49-62, 1987.
- Rossikopoulos, D., Fotiou, A., Livieratos, E., Bald, P., A Rigorous Analysis of GPS data to detect Crustal Deformations in The Area of The Ionian Sea, Tectonophysics 294, 1998, 271-280.