

Sabit GPS istasyonları zaman serileri analizi ile TUTGA hızlarının iyileştirilmesi

Ali İhsan KURT*, **Rasim DENİZ**

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Kampanya tipi GPS gözlemleri kullanıcıya elindeki alıcı sayısından daha fazla sayıda noktada gözlem yapma imkânı vererek ölçü bölgesinin daha yüksek konumsal çözünürlükle izlenmesine olanak sağlamaktadır. Diğer taraftan, kampanya tipi veriler zamansal olarak seyrekler ve küçük sıklıkları tespit edemeyecek kadar yetersizdirler. Sabit GPS noktasında toplanan sürekli GPS verileri ile yer kabuğu hareketlerine yönelik kinematik modelleme çalışmalarını gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada; sabit GPS istasyonları zaman serileri analizi ile hesaplanan periyodik etkilerin TUTGA hızlarına düzeltme olarak getirilerek daha gerçekçi hıza ulaşılması için bir yaklaşım önerilmiştir. Verileri herkese açık 6 sabit GPS istasyonundan elde edilen veriler GAMIT-GLOBK yazılımı ile değerlendirilerek zaman serileri analizine hazır hale getirilmiştir. EBOK analizi ile seçilen istasyonlara ait en uygun modelin Beyaz Gürültü ve Kırpışma Gürültüsünün birleşimi olduğu görülmüştür. Zaman serileri içindeki anlamlı sinyallerin frekanslarını ve genliklerini istasyon bazında hesaplamak amacıyla GPS zaman serilerine, boşluklu veriler için oldukça uygun bir yöntem olan Lomb-Scargle algoritması uygulanmıştır. Tüm istasyonlarda ortak olarak senelik ve altı aylık etkilerin baskın olduğu tespit edilmiştir. Böylece, TUTGA hızlarına düzeltme olarak getirilecek periyodik etkilerin hangilerinin modelleneneğine karar verilmiştir. Senelik ve altı aylık etkilerin, TUTGA hızlarına nasıl ilave edilebileceğine dair bir algoritma geliştirilerek, hız alanının iyileştirilmesi için bir yöntem önerilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara ilişkin bir değerlendirme yapılarak, Türkiye genelinde ve bölgesel olarak nasıl uygulanabileceğine ilişkin yatay ve düşey hızlar için bir değerlendirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sabit GPS, zaman serileri analizi, spektral analiz, TUTGA.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ali İhsan KURT. alihsan.kurt@hgk.mil.tr; Tel: (312) 595 22 31.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Sabit GPS istasyonları zaman serileri analizinden yararlanarak kampanya tipi GPS ölçülerinin hızlarının iyileştirilmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 27.02.2009 tarihinde dergiye ulaşıp, 25.03.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Improving TNFGN velocities via utilizing time series analysis of continuous GPS stations

Extended abstract

Campaign type GPS measurements provide higher resolution spatial monitoring of region by supplying to the observer more station than of his receiver number. On the other hand, campaign type measurements return baseline measurements with very coarse temporal sampling. This may not be a major problem for studying only slow, steady interseismic deformations, but changes in this behavior which occur over timescales less than the separation in observations will be missed by field campaigns. It is possible to make geodetic and geodynamic calculations, carry out kinematic modeling of crustal movements via using continuous GPS measurements obtained from CGPS stations. In this study, an algorithm is investigated to receive more accurate velocity field and improve velocity obtained from campaign type GPS measurements by adding corrections to the velocities via utilizing time series analysis of continuous GPS stations. Another important usage of velocities is the densification of geodetic networks. According to the Big Scale Mapping Guide, velocities of C1 and C2 points are produced using TNFGN velocities via interpolating at related sites. Thus, obtaining accurate and reliable velocities at networks like TNFGN becomes essential. In the event that TNFGN velocities are evaluated from campaign type measurements, it is more than normal to encounter errors at densification networks due to error propagation rule. Public data of Ankara, İstanbul, Trabzon, Mersin, Gebze and Antalya stations is used as test measurements. 13 ITRF stations are included to the processes for realization of datum in ITRF2000. GPS processes were done by GAMIT-GLOBK software and time series are created in ITRF2000. Also, outliers were removed at this stage. Pope test was applied to the time series and they became ready to time series analysis. Time series of related stations are prepared by completing the GPS process until the beginning of the year 2006 that constitutes the scope of this study.

As with many other geophysical phenomena, noise in GPS position time series can be described as a power law process. Maximum Likelihood Estimation (MLE) was applied to investigate stochastic noise properties of GPS time series. Time series were tested by different noise models and a combination

of white noise+flicker noise was found best describing model. In case only white noise model used, in other words using solely Least Squares Adjustment, uncertainties would be underestimated 7 times at north and east component and 8 times at up component.

Missing values cause gaps in what otherwise would be evenly sampled data, and an even sampling may sometimes be impossible in the first place, for technical reasons. When Fourier analysis is used, and some data points are missing, they have to be provided in a more or less arbitrary way. The Lomb-Scargle algorithm has several computational advantages over more common approaches, such as Fourier analysis, including direct treatment of missing values and an estimate of a false discovery rate. Lomb-Scargle algorithm which is suitable for unequally spaced time series was applied to investigate the amplitudes and frequencies of dominant signals on a station by station basis. Seasonal signals are a potentially important part of the error budget for continuous GPS sites. Annual and semi-annual signals were determined dominant common to all sites. Thus, these periodical signals were chosen to be brought as corrections to TNFGN velocity field.

An algorithm is suggested on how to apply annual and semi-annual effects in order to improve both deformation measurements and TNFGN velocities. Firstly, annual and semi-annual quantities derived from spectral analysis of all three components of continuous GPS stations, are interpolated at selected grid points. Periodic effects related to north and east component found inadequate for modeling throughout Turkey. Instead, it is proposed to use the horizontal periodic effects in an area of 10-20 km around the CGPS station. Annual and semi-annual periodics of vertical component are found convenient for interpolating at grid points. After obtaining the measurement epochs of TNFGN sites, corrections are computed at those related epochs. Finally, after adding corrections to coordinates, new velocities are obtained. New velocities are found consistent with the velocities that are derived from a complete time series analysis. An assessment is given to evaluate the results obtained from this study on how to apply both locally and in the vicinity of Turkey for horizontal and vertical velocity fields.

Keywords: Continuous GPS, time series analysis, spectral analysis, TNFGN.

Giriş

GPS ile yüzey hareketlerinin belirlenmesinde hesaplanan ve kullanılan temel parametre, noktaların tektonik hızıdır. GPS hızlarını etkileyen en önemli iki parametre ise periyodik etkilerin bağlı olduğu koordinat referans sistemi ve verilerin zamana bağlı hata özellikleridir. GPS nokta koordinatları fiziksel olarak, atmosfer, gel-git, kabuk hareketi, yeraltı su kaynaklarının hareketi vb. birçok olaydan etkilenir. Bu etkiler eğer uygun bir modelleme ile düzeltme olarak getirilmez ise hata olarak koordinatları etkiler.

Jeodezik GPS ölçmeleri zaman içindeki yer değiştirmeleri belirlemek için, kısa dönemlerle fakat periyodik olarak tekrarlanan kampanya tipi gözlemler şeklinde yapılabileceği gibi; uzun bir zaman aralığında yer hareketlerini sürekli gözlemlemek için tasarlanan bir ağ şeklinde de yapılabilmektedir.

Kampanya tipi gözlemler kullanıcıya elindeki alıcı sayısından daha fazla sayıda noktada gözlem yapma imkânı vererek ölçü bölgesinin daha yüksek konumsal çözünürlükle izlenmesine olanak sağlamaktadır. Diğer taraftan, kampanya tipi veriler zamansal olarak seyrekler ve doğrusal olmayan yer hareketlerini veya her yeni kampanya gözleminde oluşabilecek küçük sıçramaları tespit edemeyecek kadar yetersizdirler. Bu noktada sabit GPS istasyonları uzun süreli olarak kesintisiz nokta konumlarını sağlayarak bu tür problemlerin üstesinden gelebilmektedirler. Kısacası kampanya tipi ölçülerle bölgesel deformasyon hakkında daha yüksek çözünürlüklü fakat düşük frekansta bilgi toplarken, sabit GPS istasyonlarından elde edilen verilerle düşük çözünürlüklü fakat yüksek frekansta veri sağlanmaktadır. Sabit GPS istasyonları veri analizleri ile kampanya tipi ölçülerin geliştirilmesi yaklaşımı, yüzey deformasyonları ve doğrusal tektonik hızın daha doğru ve gerçekçi hesaplanmasını sağlayacaktır.

Hızların bir diğer önemli kullanımı, jeodezik amaçlı ağ sıklaştırmalarıdır. Dinamik jeodezik ağ yönteminde noktaların koordinatları ile birlikte hızları da belirlenir ve kullanılır. Büyük

Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Yönetmeliğine göre, TUTGA'ya dayalı nokta sıklaştırmalarında, C1 ve C2 derece noktaların hızları TUTGA noktalarının hızlarına bağlı olarak hesaplanmakta ve kullanılmaktadır. Farklı zamanlarda gerçekleştirilecek nokta sıklaştırma çalışmalarında, zaman birliği sağlamak için koordinatlar hızlarla bir t_0 referans epokuna ötelenirler. Bu hızlarla herhangi bir ölçme epokundaki (t) hızların birbirleriyle uyumu önemlidir. GPS gibi yüksek doğruluklu konumların elde edildiği jeodezik ağlarda, her türlü dönüşümde kullanılacak gerçek ve güvenilir hızların hesaplanması bu nedenle önem kazanmıştır. TUTGA ve buna bağlı nokta hızlarının kampanya çözümlerinden hesaplanması durumunda, yukarıda bahsedilen hatalar burada da söz konusu olmaktadır.

GPS veri değerlendirmeleri GAMIT-GLOBK yazılımı ile yapılmıştır. Öncelikle günlük çözümler oluşturulmuş ve daha sonra yine aynı yazılımla, global IGS istasyonlarından yararlanarak ITRF2000'de zaman serileri üretilmiştir. Bu aşamada yapılan diğer bir çalışma, zaman serileri içerisinden uyuşumsuz ve kaba hatalı ölçülerin ayıklanması olmuştur. MATLAB ortamında hazırlanan yazılımla, En Küçük Kareler Dengelemesi kullanılarak dengeleme sonrası artıklara Pope Kaba Hata testi uygulanmıştır. Uyuşumsuz ölçü olarak tespit edilen veriler zaman serilerinden çıkarılarak analize hazır hale getirilmiştir.

GPS zaman serilerinin stokastik gürültü özelliklerini araştırmak amacıyla; En Büyük Olabilirlik Analizi (EBOK) uygulanmıştır. EBOK analizinin başlıca amaçlarından birisi, tektonik hızın hatasının kestiriminde gerçekçi yaklaşımda bulunmaktır. Çünkü yalnızca beyaz gürültünün kabul edildiği ve diğer faktörlerin ihmal edildiği bir modelde, tektonik hızın belirsizliğinin daha küçük hesaplanarak yanlış bir kestirimde bulunma olasılığı bulunmaktadır.

Diğer yandan serilerin, zamana bağlı olmayan durağan süreçler (beyaz gürültü) ve zamana bağlı durağan olmayan (renkli) süreçlerden hangi ölçüde etkilendikleri ve en uygun gürültü modeli belirlenmiştir.

Boşluklu verilerin spektral analizi için bu amaca uygunluğu Langbein ve Johnson (1997), Zhang ve diğerleri (1997) ve Mao ve diğerleri (1999)'da da ifade edilen Lomb-Scargle algoritması kullanılmıştır. Zaman serileri içindeki anlamlı sinyallerin frekanslarını ve genliklerini istasyon bazında hesaplamak amacıyla GPS zaman serilerine Lomb-Scargle algoritması uygulanmıştır. Böylece, kampanya tipi GPS ölçü hızlarına düzeltme olarak getirilecek periyodik etkilerin hangilerinin modelleneneğine karar verilmiştir.

Senelik ve altı aylık etkilerin, TUTGA hızlarına nasıl ilave edilebileceğine dair bir yöntem önerilmiştir. Bunun için öncelikle tüm sabit GPS istasyonlarının her üç bileşeni için hesaplanan senelik ve altı aylık etkiler, enterpolasyonla grid noktaları için belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara ilişkin bir değerlendirme yapılarak, Türkiye genelinde ve bölgesel olarak nasıl uygulanabileceğine ilişkin yatay ve düşey hızlar için bir değerlendirme örneği geliştirilmiştir ve önerilmektedir.

GPS verilerinden doğrusal tektonik hızın hesaplanması

Harita Genel Komutanlığı tarafından oluşturulan TUTGA noktalarında yapılan GPS ölçüleri BERNESE V4.0 ve GLOBK V10.03 yazılımları ile değerlendirilmiştir. GPS oturumlarındaki ölçülerin değerlendirilmesi ve yıllık çözümler BERNESE V4.0 yazılımı, bu çözümlerin birleştirilmesi, nokta koordinat ve hızlarının hesaplanması ise GLOBK V10.03 yazılımı ile yapılmıştır. TUTGA'yı ITRF referans sisteminde tanımlamak amacıyla Türkiye ve yakın çevresinde Avrupa ve Asya'da uygun dağılımdaki dokuz IGS noktası hesaplamalara dâhil edilmiştir (TUTGA 99A).

Doğrusal tektonik hız, levhaların birbirine göre hareketi ile oluşan yatay ve düşey koordinat farklılıklarının zaman (yıl) ile orantılanmasından oluşmaktadır. Ayrıca bölgesel olarak yapılan bir deformasyon çalışmasında, levha hareketlerinden farklı olarak ölçülen (kayma, çökme vb.) koordinatlar arasındaki farkların zamanla orantılanmasından, deformasyon hızı belirlen-

mektedir. Genel olarak GPS veri değerlendirme yazılımlarında koordinatları etkileyen bazı fiziksel etkiler otomatik olarak veya seçime bağlı olarak verilmektedir. Örneğin; atmosferik modeller, yer dönme parametreleri, gel-git modelleri (yer, kutup, okyanus, atmosfer), yörünge denklemleri için radyasyon modeli, okyanus yüklemesi ve atmosferik yükleme.

Yukarıdaki etkiler GPS veri değerlendirme aşamasında modellendiği takdirde, belirlenen koordinatlar arasındaki farklar hız olarak karşımıza çıkmaktadır. Eğer herhangi bir fiziksel etki değerlendirme aşamasında model ile düzeltilmezse, koordinatların ve dolayısıyla da hızın içine hata olarak dâhil olmaktadır.

Henüz modellenmemiş olan bazı periyodik etkiler, zaman serileri analizi ile tespit edilebilmektedir. Bu etkilerin kampanya tipi ölçülerle oluşturulan hızlara düzeltme olarak getirilerek daha gerçek ve güvenilir hızlara ulaşılması, bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

Tektonik hız vektörü, yatay ve düşey olmak üzere iki düzlemde belirlenmektedir. Her iki bileşen için de iki epok arasındaki koordinat farkları zamanla ölçeklendirilerek doğrusal hız elde edilmektedir. Genel bir kabul olarak GPS hızları mm/yıl olarak ifade edilmektedir.

$$V = \frac{X(t_2) - X(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

V: Doğrusal hız (mm/yıl), t1, t2: Ölçü epokları (yıl), X(t1), X(t2): İlgili epoklardaki koordinat değerleri (mm)

Yatay hız vektörü, sırasıyla kuzey-güney ve doğu-batı bileşenleri hesaplandıktan sonra bunların bileşkesi alınarak hesaplanmaktadır. Düşey hız ise, yönü yukarı veya aşağı olacak şekilde tek bir doğrultu üzerinde belirlenmektedir.

GPS zaman serilerinin gürültü özellikleri

Yüzey deformasyonları veya gerinim birikimlerinin hesaplanması için yapılan jeodezik ölçüle-

rin kullanıldığı jeofiziksel çalışmalar, sadece ilgili parametrelerin doğru tahminini değil aynı zamanda bu parametrelerin hatalarının da doğru tahmin edilmesini gerektirmektedir (Mao v.d., 1999).

Birçok jeofiziksel olayda olduğu gibi GPS hataları “Güç Yasası” (Power Law) süreciyle tanımlanabilmektedir (Agnew, 1992) veya zamana bağlı olarak aşağıdaki güç spektrumuna sahiptirler:

$$P_x(f) = P_0 (f / f_0)^\kappa \quad (2)$$

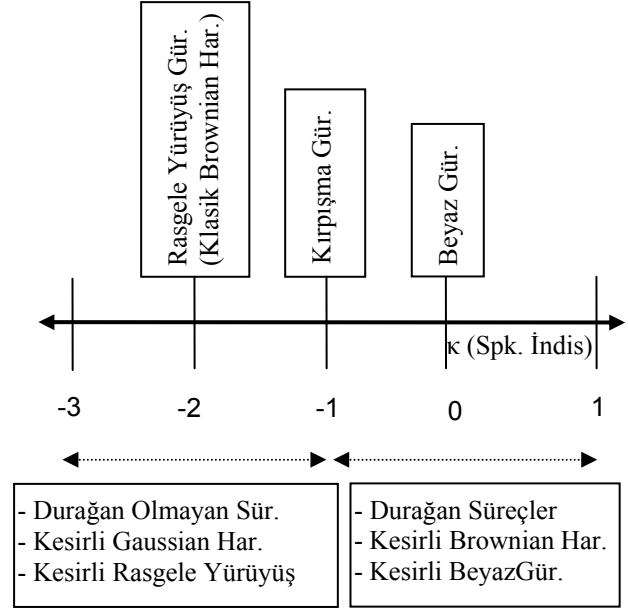
f : Frekans

P_0, f_0 : Normalizasyon sabitleri

κ : Spektral indeks

Tabiat olayları ile meydana gelen süreçler yüksek frekanslarla karşılaştırıldığında, düşük frekanslarda daha çok gürültü oranına sahiptirler ve $-3 < \kappa < -1$ aralığında değişen negatif indis değerlerine sahiptirler. Bu şekildeki $\kappa = -2$ spektral indekse sahip durağan süreçler, klasik Brownian hareketi de (veya rastgele yürüyüş) dahil olmak üzere, “Kesirli Brownian Hareketleri” olarak adlandırılırlar. Beyaz gürültünün (white noise, $\kappa = 0$) özel bir halini de içeren ve $-1 < \kappa < 1$ spektral indeks aralığında yer alan durağan süreçler “Kesirli Gaussian Süreçleri” olarak adlandırılırlar. “Kırpışma Gürültüsü” (flicker noise) olarak adlandırılan $\kappa = -1$ özel spektrum durumuna sahip süreçler genel olarak, güneş lekeleri değişimi, yerin kendi eksenindeki düzensizlikleri, yer altı suları ve atomik saatlerin ölçtüğü zamandaki hataları kapsayan geniş kapsamlı dinamik süreçler içerisinde gözlenmektedir (Mandelbrot, 1983). Zaman serilerindeki gürültülerin spektral indeks eksenindeki yerleri Şekil 1’de verilmiştir.

Zhang ve diğerleri (1997) Güney Kaliforniya ağından 19 aylık sabit GPS istasyonu verisini incelediler ve zaman serilerinin, Beyaz ve Kırpışma Gürültüsünün birleşimi (BG+KG) veya $\kappa = -0.4$ indeks değerindeki kesirli bir gürültüye sahip olduğunu buldular. Mao ve diğerleri (1999) 3 yıllık veriye sahip global olarak dağılmış GPS istasyonları verilerini en iyi şekilde



Şekil 1. Zaman serilerindeki gürültülerin spektral indeks eksenindeki yerleri

Beyaz ve Kırpışma Gürültüsünün birleşiminin tanımlayabileceğini gösterdiler. Günlük GPS çözümlerinin analizleri gibi, daha yüksek frekanslı GPS verileri de aynı zamanda Beyaz+Kırpışma gürültüsü sergilemektedir (Nikolaidis, 2002).

GPS verisinin zamana bağlı gürültüsünün içeriğini anlamak, bu verilerden hesaplanan parametrelere gerçekçi yaklaşımlarda bulunabilmek için oldukça önemlidir (Nikolaidis, 2002). Gürültünün sadece Beyaz Gürültüden oluştuğunu varsaymak hız belirsizliklerinin eksik tahmin edilmesine yol açacaktır. Örneğin, Zhang ve diğerleri (1997) sadece Beyaz Gürültü modelinin yerine Beyaz+Kırpışma Gürültüsü modeli kullanıldığı zaman nokta hız belirsizliklerinin 3-6 kat daha büyük olduğu sonucuna vardılar. Aynı şekilde Mao ve diğerleri (1999), korelasyonlu gürültüyü (Kırpışma Gürültüsü) dahil etmedikleri takdirde hız belirsizliklerinin 5-11 kat daha eksik tahmin edileceğini kanıtladılar. Açıkça görüldüğü gibi göz önüne alınan gürültü modeli sonuç hız hatasını oldukça etkilemektedir.

En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK) yöntemi

Zaman serilerindeki Beyaz ve Güç Yasası (Kırpışma, Rastgele Yürüyüş) gürültülerinin miktar-

larını belirleyebilmek için Langbein ve Johnson (1997), Zhang ve diğerleri (1997) ve Mao v.d. (1999) tarafından açıklanan En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK) yöntemi kullanılmıştır. EBOK yöntemi aynı zamanda veriyi en uygun tanımlayan gürültü modelinin belirlenmesini de sağlamaktadır. EBOK yöntemini kullanarak gürültü bileşenlerini kestirmek için olasılık fonksiyonu, veri kovaryans matrisinin dengelenmesiyle maksimize edilmektedir (Williams ve diğerleri 2004).

$$\text{lik}(\hat{v}, C) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} (\det C)^{1/2}} \exp(-0.5 \hat{v}^T C^{-1} \hat{v}) \quad (3)$$

lik: Olabilirlik fonksiyonu, N: Epok sayısı, C: Veri kovaryans matrisi, \hat{v} : Dengeleme sonrası artıklar (orijinal zaman serilerine doğrusal veya doğrusal olmayan bir model uygulandıktan sonra aynı C kovaryans matrisi ile ağırlıklandırılmış en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen)

Zaman serileri modeli genel olarak; serinin x (yatay eksen) eksenini kestiği yer, doğrusal bir eğim (hız) ve yıllık ve altı aylık sinyallere ait sinüzoidal terimlerden oluşmaktadır. Model aynı zamanda yapay veya ko-sismik atılımların sebep olabileceği kayıklıklar ve post-sismik atılımdan kaynaklanabilecek üssel bir fonksiyona ait genlikleri de ihtiva edebilir. "C" kovaryans matrisi; Beyaz Gürültü, Güç Yasası, Birinci Derece Gauss Markov, Özbağlanımlı (autoregressive), Yürüyen Ortalamalı ve Band Geçirgen gibi Gauss olasılıksal (stochastic) modelinin birçok formunu temsil edebilmektedir (Williams v.d., 2004). Bu çalışmada; C kovaryans matrisinin aşağıdaki formülde görüldüğü gibi, Beyaz Gürültü ve Güç Yasası Gürültüsü olmak üzere iki gürültü kaynağının birleşiminden oluştuğu kabul edilmiştir.

$$C = a_w^2 I + b_k^2 J_k \quad (4)$$

a_w : Beyaz gürültü genliği, b_k : Güç Yasası Gürültüsü genliği, I: Birim matris (NxN boyutlu), J_k : κ spektral indisine sahip Güç Yasası Gürültüsünün kovaryans matrisi.

Jeodezik zaman serileri elbette iki gürültü kaynağından daha fazlasını ihtiva edebilirler ve bu ekstra gürültü kaynaklarından bazıları veya hepsi Güç Yasası Gürültüsü olmayabilir. Bu çalışmadaki amaç, daha fazla istasyonda görülebilen gürültü çeşidini ve miktarlarını belirlemeye çalışmak ve kestirilen hızın hatasında daha gerçekçi tahminde bulunmaktır.

En Büyük Olabilirlik Kestirimini Metodunu kullanabilmek için Simon Williams tarafından geliştirilen CATS V3.1.2 (Create and Analyse Time Series) yazılımı kullanılmıştır (Williams, 2005).

Tüm zaman serilerinin üç bileşeni için CATS yazılımı kullanılarak kestirilen spektral indisler, Beyaz Gürültünün yanında Güç Yasası Gürültüsünün varlığını doğrularak, -0.66'dan -1.28'e kadar değişmektedir. Kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için spektral indis ortalamaları sırasıyla -0.96, -0.90 ve -0.99 bulunmuştur. Daha uzun zaman serilerine sahip bu çalışmada, Zhang v.d. (1997), Mao v.d. (1999) ve Williams v.d., (2004)'de olduğu gibi GPS zaman serilerindeki gürültü süreçleri, Beyaz Gürültü+Kırpışma Gürültüsü birleşimi modeli ile yeterli bir biçimde tanımlanabilmektedir.

Tektonik doğrusal hızın hatası

En küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanan hız parametrelerinin hataları ve EBOK analizinde tercih edilen model olarak kullanılan Beyaz Gürültü+Kırpışma Gürültüsünün kullanılması ile elde edilen tektonik hızların hatalarının karşılaştırılması Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. EBOK analizi ve EKKY ile bulunan doğrusal hızların hatalarının karşılaştırılması

	Kuzey-Güney σ (\pm mm/yıl)		Doğu-Batı σ (\pm mm/yıl)		Yükseklik σ (\pm mm/yıl)	
	EBOK	EKK	EBOK	EKK	EBOK	EKK
ISTA	0.25	0.03	0.32	0.04	0.90	0.08
TRAB	0.23	0.02	0.29	0.03	0.89	0.07
ANKR	0.27	0.03	0.38	0.04	0.81	0.09
TUBI	0.25	0.03	0.33	0.03	0.93	0.08
MERS	0.52	0.04	0.50	0.06	1.31	0.16
ANTA	0.58	0.12	1.16	0.21	1.91	0.34
ORT.	0.35	0.05	0.50	0.07	1.13	0.14

Bu çalışma kapsamında yapılan EBOK analizleri sonucunda, gürültü modelleri göz önüne alınmadan, yalnızca Beyaz Gürültü olduğu kabul edilerek, diğer bir deyişle yalnızca En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalarda, doğrusal tektonik hız parametresinin hatasının yatayda ortalama 7 kat, düşeyde ise ortalama 8 kat daha küçük kestirileceği bulunmuştur.

Spektral analiz

Lomb-Scargle Algoritması

Sabit GPS istasyonlarındaki arızalar, zaman serilerindeki uyumsuz ölçülerin atılması gibi sebepler sonucunda çoğu durumda boşluksuz veri elde etmek olanaklı değildir. Boşluklu verinin doldurulması ile ilgili çeşitli teknikler mevcuttur. Bunlardan birisi enterpolasyondur. Fakat çoğu enterpolasyon tekniği büyük boşluğu olan verilerde işe yaramamaktadır.

Lomb algoritması, veriye doğrudan sinüs dalgaları uydurarak spektrumu hesaplamak için doğrusal olmayan en küçük kareler tekniğini kullanmaktadır (Mao v.d., 1999). Bu algoritma Lomb (1976) tarafından bulunmuş ve Scargle (1982) tarafından geliştirilmiştir. Bu sebeple günümüzde Lomb-Scargle metodu olarak anılmaktadır.

Scargle (1982), Lomb-Scargle sonuç periodogram değerlerinin eşit dağılımlı veri ile aynı olasılık dağılımına sahip olduğunu ispatlamıştır. Gerek sayısal testlerle gerekse teorik olarak incelendiğinde Fourier Dönüşümü ve Lomb algoritmasının aynı sonuçları verdiği görülmektedir (Scargle, 1982).

Mao v.d. (1999) Lomb algoritmasının performansını test etmek için iki durum oluşturdular. Birinci durumda boşluksuz dağılmış bir veri kümesinin içinden rastgele aralıklarla %30 oranında veriyi çıkardılar. İkinci durumda ise zaman serilerinin içinde %10, %20 ve %30 büyüklükte boşluklar oluşturdular. Her iki test koşulunu da orijinal boşluksuz zaman serisinin spektrumu ile karşılaştırdıklarında ortalama spektral indeks üzerindeki etkinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu gördüler.

Lomb-Scargle algoritması, spektral analizde yoğun olarak kullanılan Fourier Analizi gibi tekniklere göre, boşluklu veriyi analiz edebilmesi ve önemli sinyalleri tespit edebildiği çeşitli hesaplama avantajlarına sahiptir.

Çeşitli nedenlerden dolayı ölçülemeyen epoklar boşluklara sebep olmaktadır ve çoğu zaman tam veri elde etmek mümkün olamamaktadır. Fourier analizinin kullanılması durumunda eğer boşluklu veri varsa, seçilecek bir yöntemle öncelikle boşlukların doldurulması gerekmektedir. Bu noktada daha iyi bir yaklaşım, kayıp veriler ile doğrudan ilgilenen bir algoritma ile sağlanabilmektedir.

Lomb (1976), güç spektrumundaki en yüksek zirvenin olasılık dağılımını bulmaya çalışmıştır. Scargle (1982) Lomb'un çalışmasını genişleterek "Yanlış Bulunmuşluk Oranı (False Discovery Rate)" olarak adlandırılan "Yanlış Alarm Olasılığı"nu ilâve etmiştir. Bu oran, yüksekliği verilen bir noktanın anlamlı olup olmadığının tahmini vermektedir. Scargle, düzgün olarak normalize edildiklerinde Lomb-Scargle periodogramındaki zirve yüksekliklerinin üssel bir olasılık dağılımı izlediklerini ve bunun için en uygun normalizasyon işleminin, güç değerlerinin verinin toplam varyansına bölünmesiyle elde edilebileceğini göstermiştir.

Press ve diğerleri (2002) "Spektrumdaki her zirve ne kadar anlamlıdır?" sorusuna nicel bir miktarın nasıl hesaplanacağını göstermiştir. Bu soruda sıfır hipotezi (Ho), Lomb-Scargle periodogramındaki her bir değer bağımsız bir Gauss rastgele değeridir. Lomb-Scargle periodogram normalizasyonundan dolayı zirve değerleri birim ortalama ile üssel bir dağılım izlerler. İşte bu "Hatalı Bulma Oranı" istatistiğindeki küçük bir değer anlamlı bir periyodik sinyalin mevcudiyetini göstermektedir.

GPS zaman serilerinin Lomb-Scargle yöntemi ile spektral analizi

Bu çalışma kapsamında, Türkiye genelinde dağılmış 6 SGPS istasyonunun zaman serilerindeki etkili sinyalleri ve genlikleri tespit etmek amacıyla Lomb-Scargle algoritması kullanılmış-

tır. Zaman serilerindeki uyuşumsuz ölçüler ve istasyon arızaları gibi sebeplerden dolayı gözlem yapılamayan günlerin olmasından dolayı, tüm istasyonların her üç bileşeninde de veri kayıpları söz konusudur.

Bu çalışmada, Brett Shoelson tarafından MATLAB ortamında hazırlanan “lombscargle.m” yazılımı kullanılmıştır. Yine söz konusu yazılımda, kullanıcı tarafından belirlenebilen bir güven aralığında (%95 olarak seçilmiştir) anlamlı sinyalleri ve ilgili genliklerini sunabilme imkanı mevcuttur. “lombscargle.m” yazılımının internet ortamında serbest dağıtımı yapılmaktadır. Yine bu çalışma kapsamında hazırlanan tüm analiz yazılımlarının MATLAB ortamında hazırlanmış olmasından dolayı, “lombscargle.m” yazılımı oldukça önemli avantajlar sağlamıştır.

Yazılımda bazı değişiklikler yapılmıştır. Örneğin, yazılım frekans-güç spektrum değerlerini boyutsuz olarak, veri uzunluğuna ve varyansına göre değişken bir yapıda, bağlı olarak göstermektedir. Yazılım içinde gerekli düzenlemeler yapılarak frekansa bağlı güç değerlerinin milimetre olarak sergilenmesi sağlanmıştır. Bu şekilde tüm istasyonların birbirleriyle olan karşılaştırmaları daha kolay yapılabilmektedir.

Spektral analiz sonucunda, tüm istasyonların her üç bileşeninde de senelik ve altı aylık etkiler, %95 güven aralığında anlamlı olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen senelik sinyallerin genliklerinin yatayda ortalama 1 mm, düşeyde ise ortalama 3.2 mm olduğu gözlenmektedir. Sonuç olarak tüm istasyonlarda, senelik ve altı aylık sinyallerin kullanılmasına karar verilmiştir.

Sabit GPS istasyonları zaman serileri analizlerinin TUTGA hızlarının iyileştirilmesinde kullanılması

Sabit GPS istasyonlarından elde edilen zaman serilerinin analizi ile baskın olarak bulunan senelik etkiler TUTGA hızlarına düzeltme olarak getirilerek hız alanında bir iyileştirme gerçekleştirilmiştir.

TUTGA hızlarına getirilecek düzeltmeler

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA); GPS teknolojisine dayalı, ITRF (International Terrestrial

Reference Frame) koordinat sisteminde belirli bir zamanda (epok), her noktasında koordinat (X,Y,Z) ve bu koordinatların zamana bağlı değişimleri (hızları V_x , V_y , V_z), ortometrik yükseklikleri (H) ve jeoid yüksekliği (N) bilinen ülke yüzeyine homojen dağılmış yaklaşık 600 noktadan oluşan bir jeodezik ağıdır.

TUTGA noktalarının bazılarında hızlar, ya kısa periyotlu tekrarlı ölçülerden ya da tekrarlı ölçüsü olmayan noktalarda kestirim ile belirlenmiştir.

23 Haziran 2005’de kabul edilen “Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği”ne göre:

- B Derece Ağlar ve Noktalar Uluslararası veya bölgesel ağlara dayalı Ulusal GPS ağı ve noktalarıdır (TUTGA).
- C Derece Ağlar ve Noktalar: B derece ağına sıklaştırılması ile oluşan ağlardır ve aşağıdaki alt dereceli ağ ve noktalardan oluşur:
- C1 Derece Ağlar ve Noktalar: Üst derecedeki ağlara dayalı, baz uzunluğu 15–20 km olan ağ ve noktalarıdır (Ana GPS Ağı ve noktaları: AGA).
- C2 Derece Ağlar ve Noktalar: Üst derecedeki ağlara dayalı, ortalama kenar uzunluğu 5 km olan ağ ve noktalarıdır (Sıklaştırma GPS Ağı ve Noktaları: SGA).
- C3 Derece Ağlar ve Noktalar: Üst derecedeki ağlara dayalı, en büyük baz uzunluğu 3 km olan ağ ve noktalarıdır (Alım için Sıklaştırma Ağı ve Noktaları: ASN).
- C4 Derece Ağlar ve Noktalar: Üst derecedeki ağlara dayalı poligon ağı ve noktaları ile poligon bağlanabilen fotogrametrik noktalarıdır.

Yine aynı yönetmeliğe göre, oluşturulacak C1 ve C2 derece ağ nokta (AGA ve SGA) hızları, TUTGA nokta hızlarından enterpolasyonla hesaplanmaktadır. Bu durumda, TUTGA nokta hızlarındaki hatalar yayılarak söz konusu nokta hızlarını olumsuz olarak etkilemektedir.

Hız hesaplamaları tamamlanmış olan TUTGA nokta hızlarındaki periyodik sinyallerden kaynaklanan hataları anlamak mümkün değildir. Ancak, iki epok ölçü yapılmış olan bir noktada hız belirlenirken hangi epoklardaki ölçülerin

hesaba katıldığı bilgisinden yararlanarak bu etkiler hızlardan çıkarılabilir. İki'den fazla epokta ölçü yapılmış noktalarda ise, ölçü epoklarındaki koordinat bilgileri alınarak, yine ilgili epoklardaki kaydırılmış koordinat bilgilerine düzeltmeler getirilebilir. Dolayısıyla, düzeltilmiş hıza sahip TUTGA noktalarından enterpolasyonla elde edilecek hızlar ile AGA ve SGA noktalarındaki hız belirleme çalışmalarına yönelik sıkıntılar giderilmiş olacaktır.

Senelik etkilerin gridlenmesi

Bu çalışma kapsamında Türkiye'de faaliyet gösteren 6 istasyona ait zaman serileri analizleri yapılarak baskın olarak tespit edilen senelik ve altı aylık sinyallerin genlikleri hesaplanmıştır. Elde edilen genliklerden yararlanarak 1x1 derecelik grid köşe noktalarında genlik değerleri enterpole edilmiştir. Bu gridlerden yararlanarak ilgili TUTGA noktasının veya deformasyon noktasının hızına düzeltme getirilebilir. Senelik etkilerin enterpolasyonu Surfer yazılımı ile Krigging metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

TUTGA hızlarının iyileştirilmesine yönelik uygulama

İki veya daha fazla epok ölçü yapılan TUTGA noktalarının hangi epoklarda ölçü yapıldığı bilgisinin temin edilmesiyle hızlarının incelemesi yapılabilir. Öncelikle, söz konusu epoklardaki senelik etkiler hesaplanır. Örnek olarak İstanbul SGPS istasyonu üzerinde kampanya ölçümü yapılmış ve bu durumda sabit istasyon ve sözde kampanya noktasının aynı etkilere maruz kaldıkları kabul edilecektir. İstanbul SGPS istasyonunun yükseklik bileşenini ele alarak çalışmanın aşamaları aşağıdaki gibi olacaktır.

TUTGA noktasının ölçü epoklarının bulunması:

$$\begin{aligned} t_1 &= 2002.3192 & y_1 &= -3.98 \text{ mm} \\ t_2 &= 2003.6397 & y_2 &= 6.08 \text{ mm} \end{aligned}$$

gerçek ölçü epokları koordinat zaman serisinin içerisinden alınarak kampanya tipi ölçü yada başka bir deyişle TUTGA noktası olarak kabul edilmiştir. Aldığımız bu iki epok koordinatı TUTGA noktasının ölçü epokları ve koordinat-

ları da ilgili epoklara karşılık gelen konum bilgileri olarak kabul edebiliriz. Bu iki noktadan hesaplayacağımız doğrusal hız,

$$V_{\text{ilk}} = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

eşitliğinden hareketle $V_{\text{ilk}}=7.61$ mm/yıl olarak bulunmuştur.

Zaman serileri analizi ile İstanbul sabit GPS istasyonuna ait doğrusal hız -0.803 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu hız, istasyona ait 5 senelik zaman serilerinin, senelik ve altı aylık etkileri de göz önüne alınarak hesaplandığı için gerçeğe en yakın hız olarak değerlendirilmektedir. Yine aynı analiz ile istasyona ait senelik ve altı aylık sinyallerin sinüs ve kosinüs bileşenleri elde edilmiştir.

TUTGA epoklarına düzeltme değerlerinin getirilmesi: Zaman serileri analizi ile hesaplanan senelik ve altı aylık etkileri aşağıdaki formülde yerine koyarak ilgili epoklardaki düzeltme değerleri elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Senelik Etki} &= a \cdot \sin(2\pi ft_i) + b \cdot \cos(2\pi ft_i) \\ \text{Altı Aylık Etki} &= c \cdot \sin(4\pi ft_i) + d \cdot \cos(4\pi ft_i) \end{aligned}$$

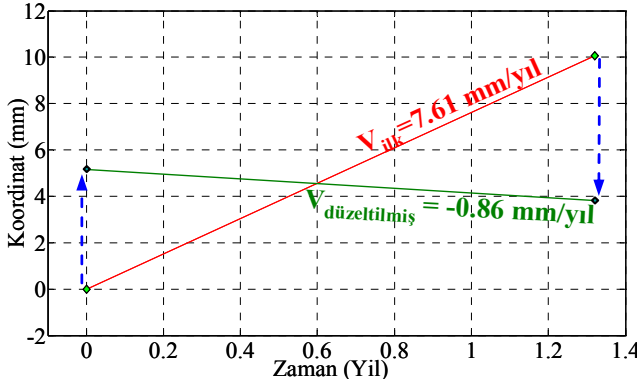
Yukarıdaki eşitliklerde a,b,c ve d parametreleri sırasıyla senelik ve altı aylık etkilerin sinüs ve kosinüs bileşenlerini göstermektedir. t_i değeri ise ilgili epokları temsil etmektedir.

Bu durumda t_1 ve t_2 epoklarındaki senelik ve altı aylık etkilerin bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} t_1 &= 2002.3192 \text{ epokundaki senelik etki} = -3.20 \text{ mm} \\ &\text{ve altı aylık etki} = -1.78 \text{ mm} \\ t_2 &= 2003.6397 \text{ epokundaki senelik etki} = 3.95 \text{ mm} \\ &\text{ve altı aylık etki} = 2.27 \text{ mm} \end{aligned}$$

Hesaplama kolaylığı açısından Şekil 2'deki grafiğin başlangıç epokunu (t_1), koordinat sisteminde sıfır noktasına kaydırmakta bir sakınca yoktur. Bu durumda geliştirilmesi planlanan TUTGA hızı ile aynı konuma dönüşmüş olacaktır. Çünkü elde mevcut olan TUTGA hızının başlangıç ve bitiş koordinat değerleri yoktur.

Yalnızca hız ve epok bilgileri mevcuttur. Eldeki epok bilgilerinin farkını alarak birinci epok sıfırına getirilmiş olur. Bu durumu gösteren grafik Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. TUTGA hızına senelik ve altı aylık etkilerin getirilmesiyle yeni hızın elde edilmesi

TUTGA epoklarında yeni hız hesabının yapılması- Yukarıda elde ettiğimiz senelik ve altı aylık etkileri ilgili epoklardaki koordinat değerlerinden çıkardığımızda;

0 epokundaki yeni koordinat değeri = $0.00 - (-4.98) = 4.98 \text{ mm}$
 1.3205 epokundaki yeni koordinat değeri = $10.06 - (6.22) = 3.84 \text{ mm}$
 olarak bulunur.

$V_{\text{düzeltilmiş}} = (3.84 - 4.98) / 1.3205 = -0.86 \text{ mm/yıl}$ olarak hesaplanır.

Elde edilen yeni hız değerinin düzeltme getirilmeden hesaplanmış hız değerinden (7.61 mm/yıl) oldukça farklı ve noktanın zaman serilerinden hesaplanan hızına (-0.803 mm/yıl) yakın bir değer olduğu açıkça görülmektedir.

Bu şekilde, özellikle iki epok gözlem yapılmış TUTGA hızlarına yapılacak düzeltmelerle hız alanlarının daha gerçekçi bir görünüme kavuşacağı değerlendirilmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, sabit GPS istasyonlarının yüksek frekanslı veri yapısından elde edilen zaman serileri analizi sonuçları ile, kampanya tipi GPS ölçümlerinden hesaplanan tektonik doğrusal hızın iyileştirilebilmesi için bir yaklaşım önerilmiştir. Bu sayede, konumsal olarak seyrek olan sabit

GPS istasyonlarından yararlanarak, konumsal olarak daha sık kampanya noktalarının hızlarına getirilecek düzeltmelerle, daha gerçekçi bir hız alanına ulaşılması hedeflenmiştir.

GPS zaman serileri, çeşitli gürültü modelleri ile test edilerek, test verisi olarak seçilen istasyonlara ait en uygun modelin Beyaz Gürültü ve Kırışma Gürültüsünün birleşimi olduğu görülmüştür. Bu çalışma kapsamında yapılan EBOK analizleri sonucunda, gürültü modelleri gözüne alınmadan, yalnızca Beyaz Gürültü olduğu kabul edilerek, diğer bir deyişle yalnızca En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalarda, doğrusal tektonik hız parametresinin hatasının yatayda ortalama 7 kat, düşeyde ise ortalama 8 kat daha küçük hesaplanacağı bulunmuştur.

Sabit GPS istasyonlarındaki arızalar, zaman serilerindeki uyuşumsuz ölçülerin atılması gibi sebepler sonucunda çoğu durumda boşluksuz veri elde etmek olanaklı değildir. Bu çalışma kapsamında, Türkiye genelinde dağılmış 6 sabit GPS istasyonunun zaman serilerindeki etkili sinyalleri ve genlikleri tespit etmek amacıyla Lomb-Scargle algoritması kullanılmıştır. Bu sayede Fourier Analizi yönteminin bir kısıtlanması olan boşluklu verinin spektral analizi konusunda bu sorunun üstesinden gelinmiştir. Ayrıca, “Spektrumdaki her zirve ne kadar anlamlıdır?” sorusuna nicel bir miktarın nasıl hesaplanacağına dair bir algoritma Lomb-Scargle yöntemi ile gelmektedir. Spektral analiz sonucu hesaplanan binlerce frekans içerisinden, kullanıcının belirleyeceği bir güven aralığında hangi frekansların anlamlı olduğunun tespit edilebilmesi mümkündür.

Lomb-Scargle yöntemi ile yapılan spektral analiz sonucunda %95 güven aralığında, tüm istasyonların her üç bileşeninde de özellikle senelik etkinin yanında, altı aylık etkiler anlamlı olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen senelik sinyallerin genliklerinin yatayda ortalama 1 mm, düşeyde ise ortalama 3.2 mm olduğu gözlenmiş, bu çalışma kapsamında hız alanının iyileştirilmesi uygulaması için, senelik ve altı aylık sinyaller kullanılmıştır.

Bu çalışmada, sabit GPS istasyonlarının zaman serileri analizinden elde edilen periyodik etkileri kullanarak, TUTGA ve dolayısıyla C1, C2 derece ağ noktaları ile kampanya tipi GPS ölçülerinin hızlarının iyileştirilmesine yönelik pratik bir yöntem önerilmiştir. Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliğine göre, C1 ve C2 derece ağ nokta (AGA ve SGA) hızları, TUTGA nokta hızlarından enterpolasyonla hesaplanmaktadır. Bu durumda, çoğunluğunun hızları kampanya ölçümleri ile hesaplanmış TUTGA hızlarının, ilave edilebilecek senelik ve altı aylık etkilerle iyileştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Kampanya tipi GPS ölçümleri ile deformasyon hızı belirleme çalışmalarında, sabit GPS istasyonları zaman serileri analizlerinden elde edilecek etkilerin kullanılmasıyla, daha gerçekçi ve güvenilir deformasyon değerlerine ulaşılabileceği değerlendirilmektedir.

İstasyonların kuzey-güney ve doğu-batı bileşenlerine ait senelik ve altı aylık etkilerin, istasyonların konumsal olarak oldukça dağınık ve sayılarının az olmasından dolayı, gerek yön gerekse şiddet itibarıyla ortak özellikleri tespit edilememiştir. Dolayısıyla bu etkilerin tüm test bölgesinde uygulanabilmesi için daha fazla istasyonun verilerinin analizine ihtiyaç duyulduğu değerlendirilmektedir. Ancak, eğer herhangi bir sabit GPS istasyonunun yaklaşık 10-20 km yakınında GPS ölçüsü yapılması durumunda, yatay yöndeki doğrusal hızın iyileştirilmesi amacıyla ilgili istasyondan elde edilecek mevsimsel etkilerin kullanılmasının uygun sonuçlar vereceği değerlendirilmektedir.

İstasyonlara ait yükseklik bileşenlerinden elde edilen senelik ve altı aylık periyodik etkilerin genliklerinin ve fazlarının yaklaşık olarak ortak özellik taşıdıkları görülmektedir. Dolayısıyla, kampanya tipi bir GPS ölçümünde elde edilecek hızın iyileştirilmesi için, istasyonlardan elde

edilecek etkilerin enterpolasyonu ile uygun sonuçlar bulunacaktır. Elde edilen sonuçlar ile, düşey yöndeki doğrusal hızın iyileştirilmesinde önemli ölçüde katkı sağladığı gözlenmiştir.

Kaynaklar

- Agnew, D.C., (1992). The time-domain behavior of power-law noises, *Geophysical Research Letters*, **19**, 333-336.
- Langbein, J. and Johnson, H., (1997). Correlated errors in geodetic time series: implications for time-dependent deformation, *Journal of Geophysical Research*, **102**, B1, 591-603.
- Lomb, N.R., (1976). Least-Squares frequency analysis of unequally spaced data, *Astrophysics and Space Science*, **39**, 447-462.
- Mao, A., Harrison C.G.A., Dixon, T.H., (1999). Noise In GPS Coordinate Time Series, *Journal of Geophysical Research*, **104**, B2, 2797-2816.
- Mandelbrot, B., (1983). *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman, New York.
- Nikolaidis, R., (2002). Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System, PhD Thesis, University of California, San Diego.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (2002). *Spectral analysis of unevenly sampled data. numerical recipes in C++* (2nd edition), Cambridge University Press.
- Scargle, J.D., (1982). Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, *Astrophysical Journal*, Part 1, **263**, 835-853.
- Williams, S.D.P., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R.M., Prawirodirdjo, L., Miller, M., Johnson, D.J., (2004). Error Analysis of continuous GPS Position Time Series, *Journal of Geophysical Research*, **109**, 2004.
- Williams, S.D.P., (2005). Create and Analyse Time Series: CATS software V3.1.1, Proudman Oceanographic Laboratory, UK.
- Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J., Wdowinski, S., Behr, J., (1997). Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities, *Journal of Geophysical Research*, **102**, B8, 18035-18055.