

GPS Zaman Serilerindeki Gürültü Karakteristiklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma

Hüseyin Duman^{1,*}, D. Uğur Şanlı¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul.

Özet

GPS zaman serilerindeki gürültü karakteristikleri birçok araştırmacı tarafından ele alınmış ve genellikle beyaz gürültü, tam sayı spektral indisli gürültü (kırpışma ve rastgele yürüyüş gürültüsü), kesirli spektral indisli gürültüsü veya bunların kombinasyonlarından oluştuğu varsayılmıştır. Zaman serilerindeki gürültü karakteristiklerinin bölgesel ağlarda farklılık gösterebileceği literatürde yer bulmuştur. Bu bağlamda NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından hassas nokta konumlama esaslarına göre çözülmüş ISTA, SVRT, TUBI ve YSST zaman serilerindeki uygun gürültü karakteristiğinin belirlenmesi, hız ve duyarlılıklarının hesaplanması amaçlanmıştır. İlk aşamada, JPL tarafından tanımlanan zaman serilerindeki kırılmalarda hesaba katılarak uyumsuz ölçüler ayıklanmıştır. En Büyük Olabilirlik İlkesine (EBOK) göre yalnızca beyaz gürültü ve beyaz gürültünün kırpışma, rastgele yürüyüş gürültüsü ve kesirli spektral indisli gürültü kombinasyonlarının ele alındığı modeller ile zaman serileri analiz edilmiştir. Bu analiz işlemi modelde yıllık ve yarıyıllık etkilerde dâhil edilmiştir. En büyük olabilirlik değeri logaritmasının maksimum olduğu model zaman serileri için uygun model olduğu ilkesine göre uygulamadaki zaman serilerinin beyaz gürültü ve kesirli spektral indisli gürültü kombinasyonu ile temsil edildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca uygun model ile kestirilen hızların standart hataları yalnızca beyaz gürültü ile kestirilenlerden yaklaşık 10 kat daha yüksek değerler çıkmıştır.

Anahtar Sözcükler

GPS Zaman Serisi, PPP, Gürültü Karakteristiği

Abstract

The noise characteristics in the GPS time series have been studied by many researchers, and are usually assumed to be white noise, integer spectral-indexed noise (flicker and random walk), power law, or combinations of these. That the noise characteristics in the time series might differ in regional networks has gained a place in the literature. In this context, it is aimed to determine a proper noise model, velocity and standard deviations of ISTA, SVRT, TUBI and YSST time series performed in precise point positioning mode by NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). In the first step, outliers in the time series were removed by introducing the offset values defined by JPL into the time series. The time series were analyzed with using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) by using only white noise and the combinations among white noise, flicker, random walk, and power law noise. In the analysis process, annual and semi-annual effects were introduced to the model. The model which has maximum log likelihood value was selected as a proper noise model that is represented by the combination of white noise and power law noise in this practice. Furthermore, when rate standard errors estimated from the proper model are compared to those of the only white noise, the former ones have higher by a factor of nearly 10.

Keywords

GPS Time Series, PPP, Noise Characteristics

1. Giriş

GPS teknolojisi günümüzde jeodinamik amaçlı çalışmalar için oldukça uygun ve sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yeryüzünün davranışlarını öğrenebilmek ve modelleyebilmek için nokta konumunun ne kadar yer değiştirdiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yer değiştirmeler GPS koordinat zaman serileri kullanılarak hesaplanabilmektedir. GPS zaman serileri farklı kaynaklı etkilerden dolayı yarım günlükten yıllara kadar değişen periyodik sinyallerin olduğu ifade edilmiştir (Blewitt ve Lavallée 2002). Bu periyodik sinyallerin hesaba katılmaması durumunda yer değiştirme miktarlarının belirlenmesinde hatalar oluşabileceği ve jeodinamik çalışmalarda yanlış yorumların üretilebileceği ifade edilmiştir (Blewitt ve Lavallée 2002, Şanlı 2002).

Zhang vd. (1997), Langbein ve Johnson (1997), Mao vd. (1999), Williams vd. (2004), Beavan (2005), Amiri-Simkooei vd. (2007) ve Santamaría-Gómez vd. (2011) gibi birçok araştırmacı tarafından GPS zaman serilerinin zamandan bağımsız beyaz gürültü (BG) ile zamana bağımlı tam sayı spektral indisli kırpışma (KG) ve rastgele yürüyüş gürültüsünü (RYG) içerdiği vurgulanmıştır. Güney Kaliforniya'da yer alan 10 adet sürekli GPS ağının 19 aylık verisini analiz eden Zhang vd. (1997) en uygun modelin beyaz ve kırpışma gürültüsü kombinasyonunun olduğu sonucuna varmıştır. Global ağ üzerinde 3 yıllık veri analizinin yapıldığı (Mao vd. 1999) çalışmasında da uygun gürültü modeli için benzer sonuç elde edilmiştir. Williams vd. (2004) benzer durumları ele aldığında global olarak benzer şekilde BG ve KG gürültüsünü uygun model olarak belirlemiş fakat bölgesel ölçekte spektral indisin farklı etkilerden dolayı daha değişken olduğundan en uygun gürültü modelinin BG ve kesirli spektral indisli gürültüsü olduğu ifade edilmiştir. Langbein (2008) Kaliforniya ve Nevada'daki 236 adet SGPS noktasına ait zaman serileri için korelasyonlu (zamana bağımlı) gürültü modellerini tekrar değerlendirmiş ve zaman serilerinin yaklaşık olarak yarısının ya KG ya da RYG ile kalan yarısının ise ya KG, RYG ve kesirli spektral indisli gürültüsü kombinasyonu ile ya da farklı karışık gürültü modelleri ile temsil edildiğini ileri sürmüştür. Son zamanlarda ise

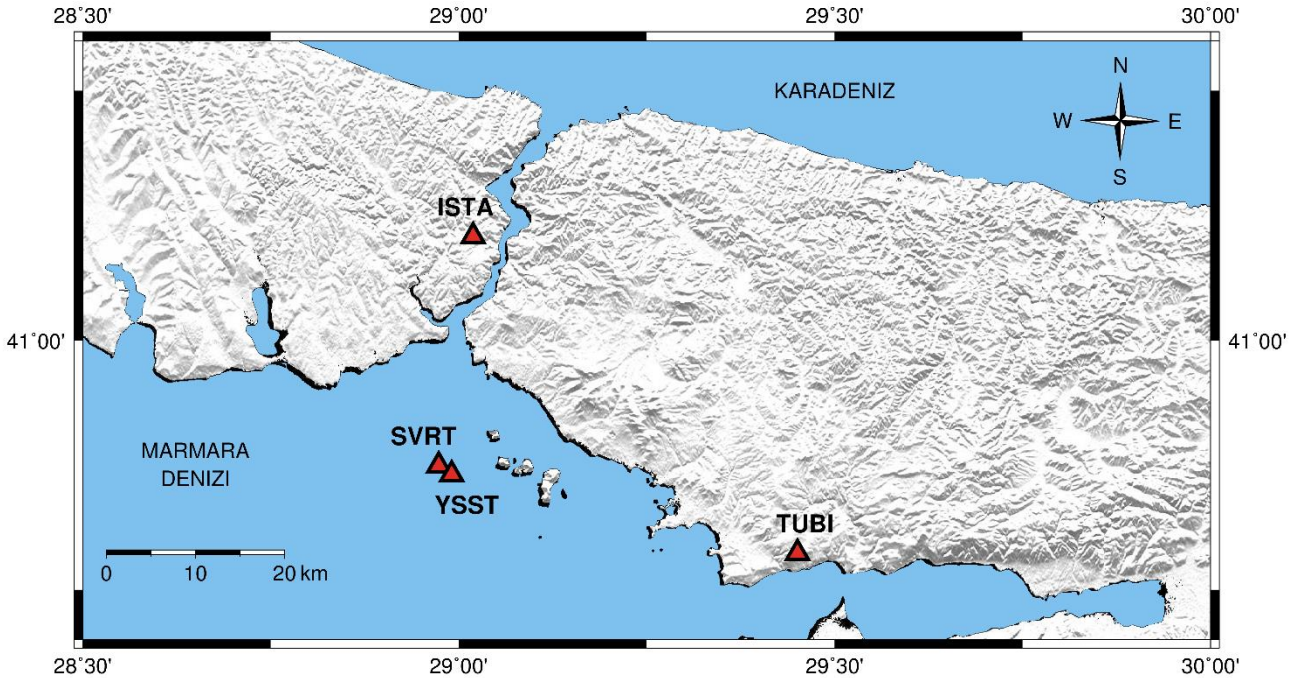
* Sorumlu Yazar E-posta: hduman@yildiz.edu.tr (Hüseyin Duman)

Santamaria-Gómez vd. (2011) global dağılmış 275 adet SGPS noktası zaman serileri için 27 farklı gürültü kombinasyonu modelini ele alarak korelasyonlu gürültünün KG ile temsil edildiği ve bu gürültü modelinin zaman serisinin uzunluğuna ve büyük ölçüde zaman periyoduna bağımlı olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, Nistor ve Buda (2016) Karayip denizi bölgesinde iki adet 7.5 yıllık zaman serisi uzunluğuna sahip GPS istasyonları için gürültü analizi yapmış ve en uygun gürültü modelinin BG ve kesirli spektral indisli gürültü ile karakterize edildiği sonucuna varmıştır. Özlem vd. (2006) yaptığı çalışma da Avrupa Deniz Seviyesi Araştırma Altyapısı (ESEAS-RI) projesi kapsamında sürekli gözlem yapan 5 yıllık zaman serisine sahip noktalar analiz edilmiştir. Bu çalışma da farklı gürültü modellerinin yanı sıra doğrusal, sadece yıllık etkilerin dâhil edildiği ve spektral analiz sonucu anlamlı bulunan etkilerin dâhil edildiği üç farklı matematik model arasında uygun olanın belirlenmesi amaçlanmıştır.

Global ağlardan ziyade bölgesel ağlardaki gürültü karakteristiklerinin farklılık gösterebileceği vurgulanmıştır (Williams vd. 2004). Bu bağlamda İstanbul çevresinde 4 adet SGPS noktasının gürültü karakteristiği belirlenmeye çalışılmıştır. Birçok çalışmada ele alındığı gibi yalnızca BG, BG/KG, BG/RYG ve BG/kesirli spektral indisli gürültü kombinasyonları ele alınarak genel anlamda bölge için temsil edilen uygun gürültü modelinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Yöntem

Yeryüzü dinamiklerinin anlaşılabilmesinde değerli bilgiler üretmek adına hız kestiriminde gürültü modellerinin hesaba katılması gerekmektedir (Santamaria-Gómez vd. 2011). GPS zaman serilerindeki uygun gürültü modellerinin bölgesel ağlarda farklılıklar gösterebileceği bir önceki bölümde ifade edilmiştir. Bu bağlamda yapılan uygulamada İstanbul bölgesinde yer alan ISTA, SVRT, TUBI ve YSST noktaları zaman serilerinden faydalanılmıştır (Şekil 1). İlgili zaman serileri NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/usrs/mbh/point/> adresinde arşivlenmiştir. ISTA, SVRT, TUBI ve YSST noktalarının zaman seri uzunlukları sırasıyla 17.2, 4.5, 18.8 ve 3 yıl, zaman serilerindeki boşluklar ise sırasıyla %8.95, %54.65, %4.76 ve %32.74'tür. Noktalara ait tüm günlük gözlem verileri JPL tarafından hassas nokta konumlandırma esaslarına göre yapılmıştır (Zumberge vd. 1997).



Şekil 1: Çalışmada kullanılan sürekli GPS noktaları

Zaman serilerinin farklı gürültü modelleri kullanarak uygun modelin belirlenmesinde, hız ve duyarlılıklarının hesaplanmasında HECTOR v1.6 yazılımı kullanılmıştır (Bos vd. 2013). İlk işlem adımı, zaman serileri içerisindeki uyumsuz ölçülerin ayıklanmasını kapsamaktadır. Veriler için doğrusal fonksiyon en küçük kareler ilkesine göre kestirilerek birim ağırlıklı standart sapmanın üç katından büyük düzeltme değerine sahip ölçü uyumsuz olarak işaretlenir ve veri kümesinden atılırlar. Trend analizinde yazılım zaman serilerindeki gürültü karakteristiklerinin belirlenmesi için En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK: Maximum Likelihood Estimation - MLE) ilkesini esas almaktadır. Bu yöntem genellikle zaman serilerindeki beyaz ve tamsayı spektral indisli gürültü miktarlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Langbein ve Johnson 1997, Mao vd. 1999, Williams vd. 2004, Zhang vd. 1997). EBOK kullanarak gürültü miktarlarının kestirilmesinde kullanılan olabilirlik fonksiyonu:

$$l(x, C) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} (\det C)^{0.5}} \exp(-0.5 \hat{v}^T C^{-1} \hat{v}) \quad (1)$$

şeklinde. Burada, N ölçü sayısını, \det matris determinantını, C gürültü olduğu varsayılan verinin kovaryans matrisini, \hat{v} aynı kovaryans matrisini kullanarak ağırlıklı en küçük kareler yöntemine göre düzeltmeler vektörünü temsil etmektedir. Zaman serilerini karakterize eden en uygun gürültü modeli olabirlik fonksiyonu logaritma değerinin en büyük olduğu modele karşılık gelmektedir ve bu değer En Büyük Olabilirlik (EBO) olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik (1)'de verilen olabirlik fonksiyonunun her iki tarafının doğal logaritması,

$$EBO = \ln[l(x, C)] = 0.5[N \ln(2\pi) + \ln(\det C) + \hat{v}^T C^{-1} \hat{v}] \quad (2)$$

eşitliği ile ifade edilebilmektedir. HECTOR v1.6 yazılımında kullanılan matematik modeller Bos vd. (2013) tarafından detaylandırılmıştır.

Hız kestiriminde kullanılan matematik model, eğim (hız değeri), sabit terim, yıllık ve yarıyıllık etkileri temsil eden sinüzoidal terimler, anten değişimleri veya depremlerden kaynaklanan ani yer değiştirmeleri temsil eden kırılma parametrelerinden oluşmaktadır. Uygulama da kırılma değerleri NASA JPL tarafından tanımlanan ani yer değiştirme zamanları değiştirilmiş jülyen zamanı (Modified Julian Date – MJD) cinsinden girdi dosyaları içerisinde tanımlanmıştır. Kestirimler sonucunda belirlenen en uygun gürültü modelinden üretilen hız standart hataları yalnızca beyaz gürültü kullanarak üretilenler ile oransal olarak karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular

Gürültü karakteristiklerinin belirlenmesi nokta hız kestiriminde oldukça önemli bir yere sahiptir. Bölgesel ağlara göre bu karakteristiklerin değişken olabileceği üzere İstanbul bölgesinde farklı zaman periyotlarına sahip 4 adet sürekli GPS zaman serileri kullanılmıştır. Uygulama da Amiri-Simkooei vd. (2008), Santamaría-Gómez vd. (2011), Bos vd. (2008), Langbein (2012), Williams (2003), Wang vd. (2012) ve Nistor ve Buda (2016) çalışmalarında olduğu gibi yalnızca BG, BG ve tamsayı spektral indisli gürültü (KG ve RYG) ve kesirli spektral indis gürültüsü kombinasyonları ele alınmıştır. EBO değeri logaritmasının maksimum olduğu model zaman serilerini temsil eden model olarak kabul edilmiştir. Öngörülen gürültü kombinasyonları için EBO değerlerinin logaritması ve kestirilen kesirli spektral indis değerleri Tablo 1'de listelenmiştir. Zaman serilerini temsil eden uygun gürültü modellerine ait EBO değerleri kalın ve altı çizili karakterlerle tabloda vurgulanmıştır.

Tablo 1: Model kombinasyonları için hesaplanan EBO değerleri logaritması. Tabloda BG: Beyaz Gürültü, KG: Kırpışma Gürültüsü, RYG: Rasgele Yürüyüş Gürültüsünü temsil etmektedir.

Nokta		BG	BG + KG	BG + RYG	BG + Kesirli Spektral İndis	Spektral İndis
ISTA	Doğu	-11316.8	<u>-10004.6</u>	-10103.7	-10005.6	-0.9593
	Kuzey	-10898.9	-9890.7	-10003.7	<u>-9889.4</u>	-0.8765
	Yükseklik	-17283.8	-16433.1	-16635.6	<u>-16404.5</u>	-0.7389
SVRT	Doğu	-1404.0	-1337.7	-1357.7	<u>-1335.7</u>	-0.6391
	Kuzey	-1422.8	<u>-1352.7</u>	-1364.3	-1353.2	-0.8898
	Yükseklik	-2203.6	-2163.2	-2193.3	<u>-2154.9</u>	-0.5491
TUBI	Doğu	-12928.6	<u>-11223.5</u>	-11228.1	-11226.0	-0.9953
	Kuzey	-12460.4	<u>-11612.6</u>	-11668.0	-11614.2	-0.9774
	Yükseklik	-20367.2	-19490.8	-19688.5	<u>-19459.5</u>	-0.6845
YSST	Doğu	-1442.2	-1380.2	-1401.2	<u>-1376.4</u>	-0.5733
	Kuzey	-1426.7	-1372.7	-1392.3	<u>-1368.6</u>	-0.5781
	Yükseklik	-2282.4	-2214.5	-2234.9	<u>-2211.0</u>	-0.5923

Tablo 1 incelendiğinde beyaz gürültünün kırpışma gürültüsü ve kesirli spektral indis gürültüsü kombinasyonlarının sahip olduğu değerler birbirlerine oldukça yakındır. Kırpışma gürültüsü spektral indis değeri -1'e eşittir. Kesirli spektral indis değerleri ise analiz işlemi ile beraber kestirilmiş ve tabloda listelenmiştir. Uygun model olarak BG+KG olarak tabloda vurgulanan değerler için kesirli spektral indislerin -1'e çok yakın değerler olduğu görülmektedir. Bu sebeple kırpışma gürültüsü yerine kesirli spektral indis gürültüsünün uygun model olarak seçilmesi çevresel etkilerin spektral indise olan

etkisi göz önüne alındığında işlem sırasında kestirilmesinin anlamlı olabileceği değerlendirilmektedir. Fakat burada iki model arasındaki farklılık hesaplama süresidir. Kırpışma gürültüsü modelinde spektral indis parametresi sabit olarak değerlendirildiğinden işlem yükü açısından çok daha kısa sürelerde çözüm üretecektir. Uygun modele göre ve zamandan bağımsız yalnızca beyaz gürültü modeline göre kestirilen değerler standart hataları ile listelenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2: Uygun modele göre ve yalnızca BG'ye göre hesaplanan hızlar, standart hataları ve hız hata oranları

Nokta		$V \pm \sigma_v$ [mm/y]		Hız Hata Oranları
		$V_{BG+Kesirli}$ Spektral Indis	V_{BG}	
ISTA	Doğu	24.406 \pm 0.125	24.038 \pm 0.021	6.0
	Kuzey	10.896 \pm 0.108	11.190 \pm 0.020	5.4
	Yükseklik	0.017 \pm 0.298	-0.150 \pm 0.061	4.9
SVRT	Doğu	21.364 \pm 0.335	21.456 \pm 0.108	3.1
	Kuzey	11.970 \pm 0.440	12.353 \pm 0.110	4.0
	Yükseklik	1.886 \pm 0.869	1.641 \pm 0.309	2.8
TUBI	Doğu	20.018 \pm 0.123	19.417 \pm 0.009	13.7
	Kuzey	11.195 \pm 0.110	11.434 \pm 0.009	12.2
	Yükseklik	-0.396 \pm 0.225	-0.508 \pm 0.030	7.5
YSST	Doğu	20.730 \pm 0.250	20.858 \pm 0.073	3.4
	Kuzey	12.673 \pm 0.250	12.711 \pm 0.071	3.5
	Yükseklik	2.442 \pm 0.790	2.885 \pm 0.221	3.6

Tablo 2'ye bakıldığında, her iki model için kestirilen hız değerleri ve bunların standart hatalarının birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Fakat bu hızlara ait standart hatalar arasında yaklaşık 3-14 kat arasında değişen farklılıklar vardır. Bu oransal farklılık Özlem vd. (2006) çalışmasındaki sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

GPS/GNSS teknolojilerinin kullanıldığı jeodinamik çalışmalarda, gerçekçi nokta hızları ve standart sapmaları belirlenmesi oldukça önemli bir rol oynamaktadır. GPS zaman serilerinin zamandan bağımsız BG içerdiğinin yanı sıra zamanla korelasyonlu renkli gürültü içerdiği de birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır. Yapılan uygulamamızda hız değerlerinin kestiriminde yıllık, yarıyıllık etkiler, JPL tarafından tanımlanmış ani yer değiştirmeler modele dâhil edilmiştir. Yöntem olarak ise en büyük olabilirlik kestirim yöntemi ele alınmıştır. Uygulamada zaman serilerini temsil eden en uygun model BG ve kesirli spektral indis gürültüsü olarak belirlenmiş ve bu sonuç yapılan birçok çalışma ile paralellik göstermiş olduğu sonucuna varılmıştır.

Zaman seri analizlerinde stokastik kısmın gürültü modelleri kullanarak değerlendirilmesi oldukça önemli bir gelişme sağlamıştır. Bu bağlamda beyaz ve renkli gürültülerin aksine zaman serilerini temsil edebilecek farklı modeller denenmelidir. Daha fazla noktadan oluşan bir ağda analizler yapılarak özellikle spektral indisler dikkatle incelenmelidir. Zaman serilerinin uzunlukları ve zaman serilerindeki boşlukların gürültü karakterlerinin belirlenmesine olan etkileri araştırılmalıdır. Farklı modellerden elde edilen hız farklılıkları istatistiksel test yöntemleri ile denetlenerek, bunların birbirinden anlamlı farkların olup olmadığı belirlenmelidir.

Teşekkür

Çalışmada kullanılan zaman serileri için NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL)'e. şekil çiziminde faydalandığım GMT (The Generic Mapping Tools) yazılımı sağlayıcılarına, gürültü karakteristiklerinin belirlenmesi için zaman seri analizinde kullanılan HECTOR v1.6 yazılımı sağlayıcılarına teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

- Amiri-Simkooei, A. Tiberius, C. ve Teunissen, s.P., (2007). *Assessment of noise in GPS coordinate time series: methodology and results*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/2006JB004913.
- Beavan, J., (2005). *Noise properties of continuous GPS data from concrete pillar geodetic monuments in New Zealand and comparison with data from US deep drilled braced monuments*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/2005JB003642.
- Blewitt, G. ve Lavallée, D., (2002). *Effect of annual signals on geodetic velocity*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/2001JB000570.

- Bos, M. Fernandes, R. Williams, S. ve Bastos, L., (2013). *Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data*, Journal of Geodesy, doi:10.1007/s00190-012-0605-0.
- Bos, M.S. Fernandes, R.M.S. Williams, S.D.P. ve Bastos, L., (2008). *Fast error analysis of continuous GPS observations*, Journal of Geodesy, 10.1007/s00190-007-0165-x.
- Langbein, J. ve Johnson, H., (1997). *Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/96JB02945.
- Langbein, J., (2008). *Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/2007JB005247.
- Langbein, J., (2012). *Estimating rate uncertainty with maximum likelihood: differences between power-law and flicker-random-walk models*, Journal of Geodesy, doi:10.1007/s00190-012-0556-5.
- Mao, A. Harrison, C.G. ve Dixon, T.H., (1999). *Noise in GPS coordinate time series*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/1998JB900033.
- Nistor, S. ve Buda, A.S., (2016). *The Influence of Different Types of Noise on The Velocity Uncertainties in GPS Time Series Analysis*, Acta Geodynamica et Geomaterialia, doi:10.13168/AGG.2016.0021.
- Özlem, S. Demir, C. Simav, M. ve Yıldız, H., (2006). *Sabit GPS İstasyonları Koordinat Zaman Serilerinin Analizi*, Harita Dergisi.
- Santamaría-Gómez, A. Bouin, M.N. Collilieux, X. ve Woeppelmann, G., (2011). *Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/2010JB007701.
- Şanlı, D.U., (2002). *GPS Zaman Serilerinin Analizi ve Türkiye İçin Değerlendirmeler*, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK).
- Wang, W. Zhao, B. Wang, Q. ve Yang, S., (2012). *Noise analysis of continuous GPS coordinate time series for CMONOC*, Advances in Space Research, doi:10.1016/j.asr.2011.11.032.
- Williams, S., (2003). *The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series*, Journal of Geodesy, doi:10.1007/s00190-002-0283-4.
- Williams, S.D. Bock, Y. Fang, P. Jamason, P. Nikolaidis, R.M. Prawirodirdjo, L. Miller, M. ve Johnson, D.J., (2004). *Error analysis of continuous GPS position time series*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/2003JB002741.
- Zhang, J. Bock, Y. Johnson, H. Fang, P. Williams, S. Genrich, J. Wdowinski, S. ve Behr, J., (1997). *Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/97JB01380.
- Zumberge, J. Heflin, M. Jefferson, D. Watkins, M. ve Webb, F.H., (1997). *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, doi:10.1029/96JB03860.