

## Deprem sonrası rahatlama evresi modelleme stratejilerinin GPS zaman serileri hata karakteri ve deterministik büyüklüklere etkisi

Hüseyin Duman<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye.

**Öz:** Deprem meydana gelmesi ile yeryüzünde ani yer değiştirmeler (kosismik yer değiştirme) ve akabinde deprem sonrası rahatlama evresi süreçleri yaşanır. Deprem sonrası rahatlama evresi, yer kabuğunun düşük viskoziteli katmanında ve üst mantoda biriken gerininin gevşemesi sürecidir. Zamana bağımlı doğrusal olmayan bu geçiş sürecinin yeryüzündeki etkileri Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS) ile izlenebilmekte ve GPS zaman serileri ile matematiksel olarak üstel fonksiyonlarla modellenmektedir. Modellenemeyen deprem sonrası rahatlama evresi matematiksel modelin diğer parametrelerini etkilemektedir. Bu çalışmada, deprem sonrası rahatlama evresi deprem öncesi ve sonrası ölçülerin hem bütünlük hem de ayrı ayrı değerlendirilmesinin GPS zaman serileri hata karakterine, hız ve kosismik yer değiştirmelere etkileri irdelenmiştir. Deprem sonrası rahatlama zamanı Nelder-Mead yakınsama algoritması ile optimize edilmiş, bu değerler ve ek deterministik büyüklükler ile GPS hata zaman serileri beyaz gürültü (BG) + kırışma gürültüsü (KG), BG+KG+rasgele yürüyüş gürültüsü (RYG) ve BG+güç-yasası gürültüsü (GYG) stokastik model kombinasyonları ile analiz edilmiştir. Bütünlük analiz edilen zaman serileri, RYG ya da spektral indeks değeri ortalama -1.25'lere yaklaşan GYG gürültü modelleri ile temsil edilebilmektedir. Aksine, ayrı ayrı analizlerden birleştirilen GPS hata zaman serilerinin tümü BG+KG modeli ile karakterize edilmektedir. Hem kalite ölçütleri hem de GPS hata zaman serilerinin görsel irdemeleri, ayrı ayrı analiz edilmelerinin doğru bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Buna göre bütünlük analiz, hız bileşeninde 0.52 mm/yıl'a kadar yanlış kestirime, hız standart sapmalarında %94'e kadar aşırı tahmin edilmesine ve kosismik yer değiştirmelerde 8 cm'ye kadar farklılıklara sebep olabilmektedir.

**Anahtar Sözcükler:** Post-sismik rahatlama, Viskoelastik rahatlama, Gürültü analizi, GPS zaman serileri, Kosismik atım

### Effect of modelling strategies for post-seismic relaxation on error characteristics of GPS time series and deterministic parameters

**Abstract:** With occurrence of an earthquake, an instant displacement on the Earth's surface (so-called co-seismic displacement) and subsequently a post-seismic relaxation could be experienced. The post-seismic relaxation is a process that is a stress relaxation in the crust's low viscosity layers and in the upper mantle. Effects of this time-dependent non-linear transient events on Earth's surface can be monitored by Global Positioning System (GPS) and can be modelled deterministically through an exponential function using GPS time series. The post-seismic relaxation, which is not (can not be) modelled, affects other parameters in the mathematical model. In this study, the post-seismic relaxation effects on GPS time series error characteristics, velocity, and co-seismic displacements were examined by analyzing pre- and post-earthquake observations series both jointly and separately. The post-seismic relaxation time were optimized by Nelder-Mead simplex algorithm, and GPS error time series were analyzed using these optimized relaxation times and additional deterministic parameters with stochastic model combinations of white noise (WN)+flicker noise (FN), WN+FN+random-walk noise (RWN), WN+power-law noise (PL). The time series jointly analyzed can be characterized by RWN or PL in which spectral index is about to -1.25. On the contrary, all the separately analyzed time series is characterized by the WN+FN model combination. Both quality measures and visual inspections of GPS error time series demonstrates that the separately analyzing is a correct approach. Accordingly, the joint analysis can result in biased velocity estimates up to 0.52 mm/year, overestimation of velocity uncertainties up to %94 and co-seismic displacements differences up to 8 cm.

**Keywords:** Post-seismic relaxation, Viscoelastic relaxation, Noise analysis, GPS time series, Co-seismic displacement

## 1. Giriş

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS – buradan sonra Global Positioning System, GPS olarak ifade edilecektir) marifetiyle günlük koordinatlardan türetilmiş sürekli zaman serileri yeryüzü deformasyonlarının modellenmesi ve yorumlanmasında en sık başvurulan yöntemlerden biridir. GPS zaman serileri iki farklı kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım, deterministik olarak modellenen sistematik değişimlerden, yani fonksiyonel modelden; ikinci kısım ise, gürültü olarak adlandırılan rasgele meydana gelen süreçler yani stokastik modelden oluşmaktadır (Santamaría-Gómez & Ray, 2021). GPS zaman serileri hata teriminin 1990'lı yılların sonlarından itibaren hem zaman hem de mekân korelasyonlu oldukları bilinmektedir (Langbein, 2008, 2017; Langbein & Johnson, 1997; Mao, Harrison, & Dixon, 1999; Wdowinski, Bock, Zhang, Fang, & Genrich, 1997; Zhang vd., 1997). Zaman serileri analizinin ana amacı, jeofiziksel gerçekliği temsil eden deterministik büyüklüklerin gerçekçi/yansız (unbiased) kestirilmesidir. Gürültü modelleri ile zaman serileri analizlerinin ana amacı ise yalnızca deterministik büyüklüklerin gerçekçi/yansız kestirilmesi değil, aynı zamanda standart sapmalarının da gerçekçi belirlenmesidir. Johnson ve Agnew (1995), stokastik süreçler dâhil edilmediği, yani ölçüler arası zaman-mekânsal korelasyonlar hesaba katılmadığı durumda parametre standart sapmalarını oldukça optimistik değerler ile kestirilebileceğini vurgulamıştır.

GPS zaman serileri fonksiyonel modelini oluşturan; hız, periyodik sinyaller, ani yer değiştirmeler ve deprem sonrası rahatlama evresi parametreleri zamana bağımlıdır. Dolayısıyla, bu büyüklüklerin yanlış modellenmeleri ya da modellenmemeleri doğrudan stokastik süreçleri etkileyecektir. Örneğin Williams (2003a), zaman serilerindeki ani yer değiştirmelerin hesaba katılmaması durumunda hız standart sapmasını etkileyebileceği ve hatta stokastik olarak rasgele yürüyüş gürültüsünü (random walk noise, RYG) ortaya çıkarabileceğini vurgulamıştır. Chen, Zhao, Wei ve Liu (2018) deterministik olarak mevsimsel sinyaller, ani yer değiştirmelerin güç-yasası gürültü (power-law noise, GYG) büyüklüğü ve gürültünün rengini temsil eden spektral indeks üzerindeki etkilerini irdelemiştir. Var olan mevsimsel sinyallerin hesaba katılması ölçüler arası korelasyon seviyesini azaltmakta, spektral indeks değerini "0" a yakınlaştırmakta olduğunu vurgulamışlardır. Benzer şekilde, var olan ani yer değiştirmelerin hesaba katılmasının da stokastik süreçleri etkilediği ifade edilmiştir (Chen vd., 2018; Santamaría-Gómez & Ray, 2021).

Hackl, Malservisi, Hugentobler ve Jiang (2013), modellenmeyen geçici olayların (transient events) GPS zaman serileri gürültü karakterlerinin ortaya çıkartılmasını önemli ölçüde etkilediğini, hesaba katılmadıklarında stokastik süreçlerin bir parçası olarak kestirilebileceğini ifade etmiştir. Volkan aktiviteleri (Dzurisin, 2003), fay kırıkları (Hetland & Simons, 2010), deprem sonrası rahatlama evresi (Dogan vd., 2014; Hackl, Malservisi, & Wdowinski, 2009; Hammond, Kreemer, Blewitt, & Plag, 2010) gibi yavaş gelişen süreçler geçici olaylara örnek olarak verilebilir (Dong vd., 2006; Wdowinski vd., 1997). Dogan vd. (2014), 23 Ekim 2011 Van Depremi sonrası rahatlama evresini, odak merkezi civarındaki sürekli ve kampanya GPS istasyonları ile araştırmıştır. Deprem sonrası rahatlama evresi, ölçü zamanının logaritması ile modellenmiş, modelde rahatlama zamanına yer verilmemiştir. Vallianatos ve Sakkas (2021), literatürde genellikle tek bir rahatlama zamanının hesaba katıldığını (Ingleby & Wright, 2017; Marone, Scholtz, & Bilham, 1991; Perfettini & Avouac, 2004), ancak, deprem sonrası rahatlama evresinin birden fazla rahatlama zamanının birleşimi olduğunu vurgulamıştır. Yunanistan, Lefkas 2015 depreminde rahatlama zamanının ise 3.5 – 350 gün arasında değiştiğini ifade etmiştir. Gualandi vd. (2017), GPS ağının bazı noktalarında deprem öncesi ve deprem sonrası deformasyonları bütünlük analiz etmiştir.

Bu çalışmada, deprem sonrası rahatlama evresi iki farklı modelleme stratejisi ile ele alınmıştır: (I) Deprem öncesi ve sonrasında bir bütün olarak tek bir matematik model ile değerlendirilerek, (II) deprem öncesi ve sonrasında bağımsız matematik modeller ile değerlendirilip hata terimleri birleştirilerek, GPS zaman serilerindeki stokastik süreçler irdelenmiştir.

Her iki değerlendirme stratejisinde de deprem sonrası rahatlama zamanı, yakınsama algoritması ile kestirilmiştir. Hem hataların stokastik süreçleri nasıl etkilediği hem de deprem sonrası rahatlama zamanının optimizasyonu çalışmanın özgün değerini temsil etmektedir. Bu bağlamda ilk olarak, gürültü modelleri ile matematik modelin nasıl oluşturulduğuna değinilmiş (bkz. Bölüm 2), kurgulanan stratejiler doğrultusunda analizlerin gerçekleştirilmesi ve bulgular paylaşılmış (bkz. Bölüm 3) ve son bölümde ana sonuçların çerçevesi çizilmiş, önerilerde bulunulmuştur.

## 2. GPS Zaman Serileri Matematik Modeli

### 2.1 Fonksiyonel Model

Tektonik kuvvetler, yerüstü ve yeraltındaki hidrolojik değişimler, yerkabuğunda elastik ya da elastik olmayan deformasyonlara sebep olmaktadır. Yüksek duyarlıklı konum üretebilme kabiliyeti, GPS teknolojisini, ifade edilen deformasyonların modellenip anlaşılması için vazgeçilmez bir araç haline getirmektedir. Bir GPS istasyonundaki yeryüzü deformasyonlarının matematiksel olarak modellenbilmesi için en uygun fonksiyonun belirlenmesi gerekmektedir. Örnek olarak,  $t_i$  zamanında ölçülmüş  $y_i$  ölçüleri için ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) mevsimsel değişimler, gerek yapay (örneğin, anten değişimi) gerekse doğal (örneğin, depremlerden kaynaklı yer değiştirmeler) sebeplerden meydana gelen ani yer değiştirmeler ve deprem sonrası rahatlama evresinin hesaba katıldığı fonksiyon,

$$y_i - e_i = y_0 + rt_i + \sum_{j=1}^q \left( AC_j \cos \frac{2\pi t_i}{T_j} + AS_j \sin \frac{2\pi t_i}{T_j} \right) + \sum_{k=1}^p g_k H(t_i - t_k^{\text{off}}) + \sum_{m=1}^s d_m \left( 1 - \exp \frac{t_i - t_m^{\text{rlx}}}{\tau_m} \right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $e_i$ ,  $i$ 'nci ölçünün hata terimini;  $y_0$ , başlangıç ölçü değerini;  $r$  ise hız (deformasyon oranı ya da trend) bileşenini temsil etmektedir.  $j$ 'nci periyodik etki ( $j = 1, 2, \dots, q$ ), faz kayıklığından bağımsız, doğrusallaştırılmış  $AC_j$  ve  $AS_j$  genlikleri,  $T_j$  salınım periyodu ile temsil edilmektedir (Bogusz & Klos, 2016).  $t_k^{\text{off}}$  zamanında meydana gelen  $g_k$  ( $k = 1, 2, \dots, p$ ) büyüklüğündeki ani yer değiştirmeler  $H(\cdot)$  Heaviside fonksiyonu yardımıyla modellenmektedir. Bu fonksiyon,

$$H(t_i - t_k^{\text{off}}) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } t_i \leq t_k^{\text{off}} \\ 1 & \text{eğer } t_i > t_k^{\text{off}} \end{cases} \quad (2)$$

ile temsil edilmektedir.  $t_m^{\text{rlx}}$  zamanında meydana gelen bir depremin rahatlama evresi ise,  $d_m$  bu evrenin büyüklüğü ve  $\tau_m$  zamanının eksponansiyel fonksiyonu ile Eşitlik 1'de verildiği şekliyle temsil edilmektedir. Eşitlik 1'in matris formunda gösterimi,

$$\mathbf{y} - \mathbf{e} = \mathbf{A}\boldsymbol{\beta} \quad (3)$$

şeklinindedir. Burada  $n \times 1$  boyutlu  $\mathbf{y} = [y_1 \ \dots \ y_n]^T$  ölçüler vektörü;  $n \times 1$  boyutlu  $\mathbf{e} = [e_1 \ \dots \ e_n]^T$  hatalar vektörü ve Eşitlik 1 için  $u \times 1$  boyutlu  $\boldsymbol{\beta} = [y_0 \ r \ AC_1 \ AS_1 \ \dots \ AC_q \ AS_q \ g_1 \ \dots \ g_p \ d_1 \ \dots \ d_r]^T$  bilinmeyenler vektörü ile  $u = 2 + 2q + p + r$  bilinmeyen sayısıdır. Eşitlik 1'in doğrusallaştırılması ile elde edilen  $n \times u$  katsayılar matrisi ise,

$$\mathbf{a}_{lin} = [1 \ t_i]_{1 \times 2} \quad (4a)$$

$$\mathbf{a}_{sea} = \left[ \cos \frac{2\pi t_i}{T_1} \ \sin \frac{2\pi t_i}{T_1} \ \dots \ \cos \frac{2\pi t_i}{T_q} \ \sin \frac{2\pi t_i}{T_q} \right]_{1 \times 2q} \quad (4b)$$

$$\mathbf{a}_{off} = [H(t_i - t_1^{\text{off}}) \ \dots \ H(t_i - t_p^{\text{off}})]_{1 \times p} \quad (4c)$$

$$\mathbf{a}_{exp} = \left[ 1 - \exp\left(\frac{t_i - t_1^{rlx}}{\tau_1}\right) \quad \dots \quad 1 - \exp\left(\frac{t_i - t_r^{rlx}}{\tau_r}\right) \right]_{1 \times r} \quad (4d)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{a}_{lin} & \mathbf{a}_{sea} & \mathbf{a}_{off} & \mathbf{a}_{exp} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_{n \times u} \quad (4e)$$

şeklinde elde edilir.

## 2.2 Stokastik Model

Deformasyonların en doğru şekilde modellenip yorumlanmaları için, ölçüleri temsil eden deterministik (bkz. Eşitlik 1 ve 4) büyüklüklerin eksiksiz hesaba katılmasının yanı sıra, (ko)varyanslarının da gerçekçi bir şekilde analizlere dâhil edilmesi gerekmektedir (Santamaría-Gómez, Bouin, Collilieux, & Wöppelmann, 2011). Gerçekçi (ko)varyanslar, ölçüler ya da deterministik büyüklüklerden arındırılmış hataları temsil eden stokastik süreçlerin hesaba katılması ile mümkündür. GPS zaman serilerini temsil eden stokastik süreçler en iyi güç-yasası (power-law) süreçleri ile temsil edilmekte (Agnew, 1992) ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir:

$$P_y(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^\kappa \quad (5)$$

Burada;  $f$  frekansı,  $P_0$  ve  $f_0$  normalleştirme katsayılarını,  $\kappa$  ise spektral indeksi temsil etmektedir (Mandelbrot & van Ness, 1968). Spektral indeks değeri, durağan süreçler için  $-1 \leq \kappa < 1$ , durağan olmayan süreçler için ise  $-3 < \kappa < -1$  olmak üzere  $-3 < \kappa < 1$  aralığında değişmektedir. Bu değer, zaman serisinin frekans uzayındaki -spektrumundaki- eğimi temsil etmekte, bir başka ifade ile stokastik sürecin rengini de ifade etmektedir. Bu sebeptendir ki, renkli gürültü kavramı stokastik süreçleri temsilen kullanılmaktadır. Spektral indeks değerinin tamsayıya eşit olduğu renkler ile de isimlendirilen özel durumlar/stokastik süreçler vardır. Bunlar,  $\kappa = 0$  olduğu beyaz gürültü (white noise, BG),  $\kappa = -1$  olduğu kırpışma gürültüsü (flicker noise, KG; pink noise) ve  $\kappa = -2$  olduğu rasgele yürüyüş gürültüsüdür (random-walk noise, RYG; brown noise). Gürültü renginin beyaza yaklaşması ya da spektrum eğiminin yataylaşması ölçüler arası korelasyon seviyesinin azaldığını ifade etmektedir (Amiri-Simkooei, Tiberius, & Teunissen, 2007).

Renkli gürültü model kombinasyonları ile temsil edilen bir GPS zaman serisinin (ko)varyans matrisi,

$$\mathbf{Q}_y = \sum_{k=1}^p \sigma_k^2 \mathbf{Q}_k \quad (6)$$

ile ifade edilir (Amiri-Simkooei vd., 2007; Aydın, Duman, Günes, & Sanli, 2021). Burada,  $p$  stokastik modeli oluşturan varyans bileşenleri sayısını,  $\sigma_k^2$  gürültü büyüklüklerini,  $\mathbf{Q}_k$  ise  $n \times n$  boyutlu ( $k = \text{BG, KG, RYG}$  ya da güç-yasası gürültüsü (GYG)) gürültü modelinin kofaktör matrisini temsil etmektedir. Bu matris Hosking (1981) tarafından tanımlanan

$$\mathbf{T}_k = \Delta T^{-0.25\kappa} \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & h_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n-1} & h_{n-2} & h_{n-3} & \dots & h_0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (7)$$

dönüşüm matrisi kullanılarak  $\mathbf{Q}_k = \mathbf{T}_k \mathbf{T}_k^T$  eşitliği ile ve  $\mathbf{T}_k$  dönüşüm matris elemanları,  $h_0 = 1$  ve  $h_i = \left(i - 1 + \frac{\kappa}{2}\right) \frac{h_{i-1}}{i}$  şeklinde hesaplanmaktadır (Kasdin, 1995). Eşitlik 7'de  $\Delta T$  örneklem aralığını temsil etmektedir.  $\mathbf{Q}_k$  oluşturulmadan önce  $\mathbf{T}_k$  dönüşüm matrisinin  $\Delta T^{-0.25\kappa}$  ile ölçeklenmesi, aynı  $\Delta T$  ve gürültü büyüklüğü durumlarında, stokastik süreçlerin spektrumda

benzer frekanslarda örtüşmesini sağlamaktadır (Williams, 2003b).

Bu çalışma kapsamında zaman serileri analizleri (bkz. Bölüm 3.2) Hector v1.9 yazılımı (Bos, Fernandes, Williams, & Bastos, 2013) ile gerçekleştirilmiştir. Hector v1.9 yazılımı Eşitlik 3'te ifade edilen  $\beta$  fonksiyonel model bilinmeyenleri ve ilk aşamada bilinmeyen Eşitlik 6'daki varyans bileşenlerini (gürültü büyüklüklerini) en büyük olabilirlik kestirimi (maximum likelihood estimation, MLE) yöntemiyle eş zamanlı olarak kestirmektedir. Hector v1.9 yazılımı ile zaman serileri, veri boşluklarının da hesaba katıldığı hızlı çözüm yapabilen özel bir matris algoritması ile analiz edilmektedir. Çalışma kapsamında ifade edilen algoritmanın etkisi irdelenmemiş ve dolayısıyla burada detaylandırılmamıştır. Algoritmanın detayları için Bos vd. (2013) çalışmasına başvurulmalıdır.

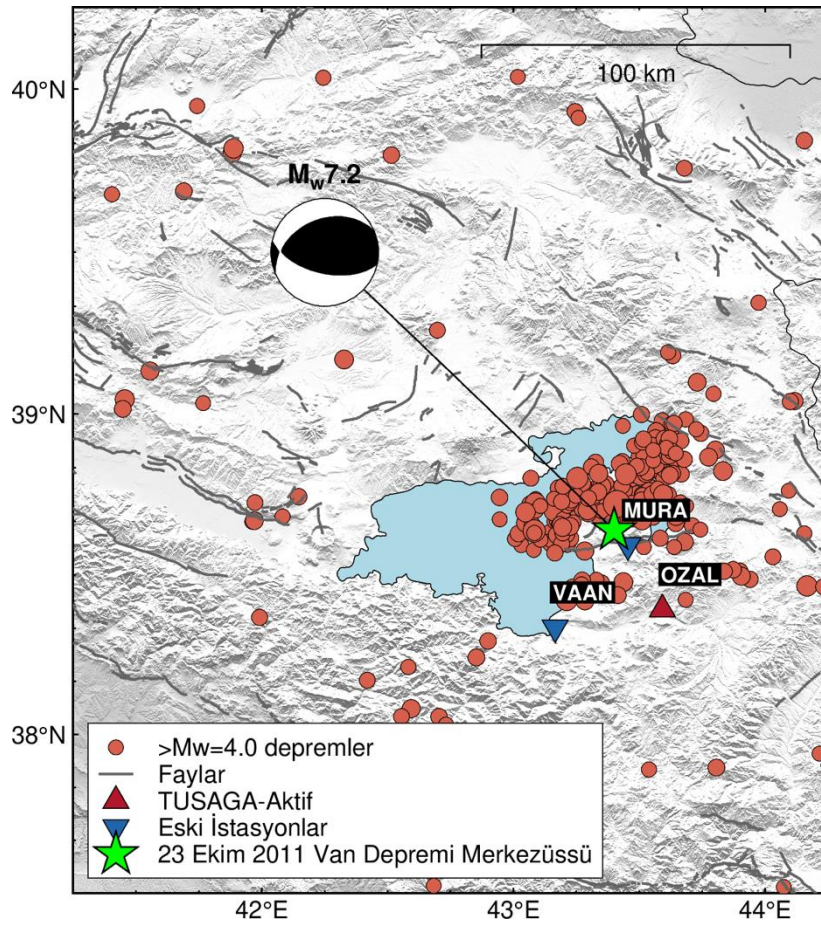
### 3. Analizler ve Bulgular

Bir fay düzleminde biriken enerjinin aniden boşalması ile meydana gelen deprem neticesinde hem deprem anında hem de deprem sonrasında yeryüzünde deformasyonlar meydana gelmektedir. Deprem anında ortaya çıkan ani yer değiştirme kosismik etki olarak isimlendirilmektedir. Kırılgan kıta kabuğunda enerji aniden boşalsa da litosfer (katı yer kabuğu) ile astenosfer (üst manto) kesişimindeki viskoelastik katmanda deprem kaynaklı stresin durağanlaşması zaman alan bir süreçtir. Viskoelastik deformasyon olarak isimlendirilen bu deprem sonrası rahatlama süreci üstel fonksiyon yardımıyla modellenmektedir (bkz. Eşitlik 1). Uygun şekilde modellen(e)meyen deterministik büyüklükler stokastik süreçler üzerinde etkili olmakta, dolayısıyla parametre standart hatalarında yanılırlara sebep olabilmektedir.

Viskoelastik deformasyonun GPS zaman serileri hata karakterine nasıl bir etkide bulunacağını irdelemek adına 23 Ekim 2011, 13:41 TSİ (Türkiye Saati ile) tarihinde  $M_w=7.2$  moment büyüklüğündeki Van Depremi örnek uygulama olarak seçilmiştir. Bu depremin akabinde 9 Kasım 2011, 21:23 TSİ tarihinde  $M_w=5.6$  moment büyüklüğünde yıkıcı bir deprem daha meydana gelmiştir. 23 Ekim ve 9 Kasım 2011 depremlerinin GPS zaman serileri üzerindeki etkileri Tiryakioğlu vd. (2017) tarafından irdelenmiş,  $M_w=5.6$  büyüklüğündeki 9 Kasım depremi için önemli yer değiştirmelerin olmadığı rapor edilmiştir. Dolayısıyla, 9 Kasım 2011 depremine analizlerde yer verilmemiştir.

#### 3.1 Veri Seti

23 Ekim 2011 Van Depremi'nden kaynaklı viskoelastik rahatlama evresinin GPS zaman serilerinde belirgin olarak görülebilmesi adına deprem odak merkezine yakın VAAN, MURA ve OZAL istasyonları değerlendirmeye alınmıştır (Şekil 1). İstasyonlara ait zaman serileri Harita Genel Müdürlüğü'nden edinilmiştir (URL-1). Özdemir (2016), TUSAGA ve TUSAGA-Aktif istasyonlarının günlük koordinatlarının nasıl üretildiği üzerine değerlendirmeler yapmıştır. Harita Genel Müdürlüğü'nce VAAN ve MURA istasyonları "Eski İstasyonlar", OZAL istasyonu ise "TUSAGA-Aktif" olarak sınıflandırılmıştır.



**Şekil 1:** Çalışmada kullanılan VAAN, MURA ve OZAL GPS istasyon konumları. 23 Ekim 2011 Van Depremi merkez üssü yeşil yıldız ve Kandilli Rasathanesi kayıtlarına göre depremden sonra 2021 yılı sonuna kadar meydana gelen  $M_w=4.0$ 'dan büyük depremler büyüklüğüne göre ölçeklendirilmiş kırmızı daireler ile gösterilmiştir. Gri çizgiler ile gösterilen faylar için Maden Teknik Arama (MTA) diri fay haritası kullanılmıştır (Emre vd. 2018).

Her üç GPS istasyonu zaman serisi verileri 27 Eylül 2008 tarihinde başlamakta, VAAN istasyonunda 07 Kasım 2012 (MJD: 56238), MURA istasyonunda 28 Ocak 2014 (MJD: 56685) ve OZAL istasyonunda 14 Aralık 2021 (MJD: 59562) tarihlerine kadar devam etmektedir. Bu tarihlere göre deprem öncesi döneme ait 3.07 yıllık zaman serileri, deprem sonrasında ise VAAN istasyonunda 1.04 yıl, MURA istasyonunda 2.27 yıl ve OZAL istasyonunda 10.14 yıllık zaman serisi bulunmaktadır. VAAN, MURA ve OZAL GPS istasyonları zaman serilerinde sırasıyla %33.27, %12.97 ve %8.91 veri boşluğu mevcuttur.

### 3.2 Zaman Serileri Analizleri

Viskoelastik rahatlama evresinin stokastik süreçler üzerine olan etkisi iki farklı senaryoda incelenmiştir. (I) Her üç sabit GPS istasyonu Doğu (D), Kuzey (K) ve Yükseklik (Y) bileşenleri ayrı ayrı deprem öncesi ve sonrası ayırt etmeksizin (zaman serileri bütün olarak) tek bir matematik model ile ele alınmıştır. 23 Ekim 2011 (MJD: 55857) günü için kosismik etki Heavyside fonksiyonu ile (bkz. Eşitlik 1 ve 2), deprem sonrası viskoelastik rahatlama evresi ise üssel fonksiyon yardımıyla hesaba katılmıştır. (II) Deprem öncesi ve sonrası olmak üzere zaman serileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Senaryo (I)'den kestirilen hatalar vektörü, senaryo (II)'de iki farklı seriden kestirilen hatalar vektörlerinin birleştirilmesiyle elde edilen vektör,

$$e_I = [y_F - A_F \beta_F]_{n \times n} \quad (8a)$$

$$e_{II} = \begin{bmatrix} y_{BE} - A_{BE} \beta_{BE} \\ y_{AE} - A_{AE} \beta_{AE} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (8b)$$

şeklinde ele alınmıştır. Burada, alt indis “F” senaryo (I) için zaman serisinin tümü; “BE” ve “AE” ise senaryo (II) için sırasıyla deprem öncesi ve deprem sonrasını ifade etmektedir.

Bu senaryoda bir bileşen iki farklı zaman serisi şeklinde ele alındığı için kosismik etki hesaba katılmamış fakat, deprem sonrası zaman serisi için ilk senaryoda olduğu gibi viskoelastik rahatlama evresi benzer şekilde üssel fonksiyon ile ele alınmıştır. Deprem ile ilgili deterministik büyüklüklerin haricinde Eşitlik 1’de gösterildiği şekilde yıllık ( $T_1 = 365.25$  gün = 1 yıl) ve yarıyıllık ( $T_2 = 183.625$  gün = 0.5 yıl,  $q = 2$  için) periyodik sinyaller hesaba dâhil edilmiştir.

### 3.2.1 Uyuşumsuz Ölçülerin Ayıklanması

İlk olarak, VAAN, MURA ve OZAL istasyonları tüm bileşenlerinde yukarıda ifade edilen senaryo ve deterministik büyüklükler kullanılarak uyumsuz ölçüler çeyrekler açıklığı yöntemine göre ayrı ayrı ayıklanmıştır. Viskoelastik rahatlama evresi ile ilişkili hem senaryo (I) hem de senaryo (II) deprem sonrası zaman serisi için Eşitlik 1’de  $\tau_1 = 100$  gün ( $m = 1$  için) olarak hesaba dâhil edilmiştir. Bölüm 3.1’de ifade edilen veri boşluğu yüzdeleri uyumsuz ölçüler ayıklandıktan sonra kalan ölçüler üzerinden hesaplanmıştır.

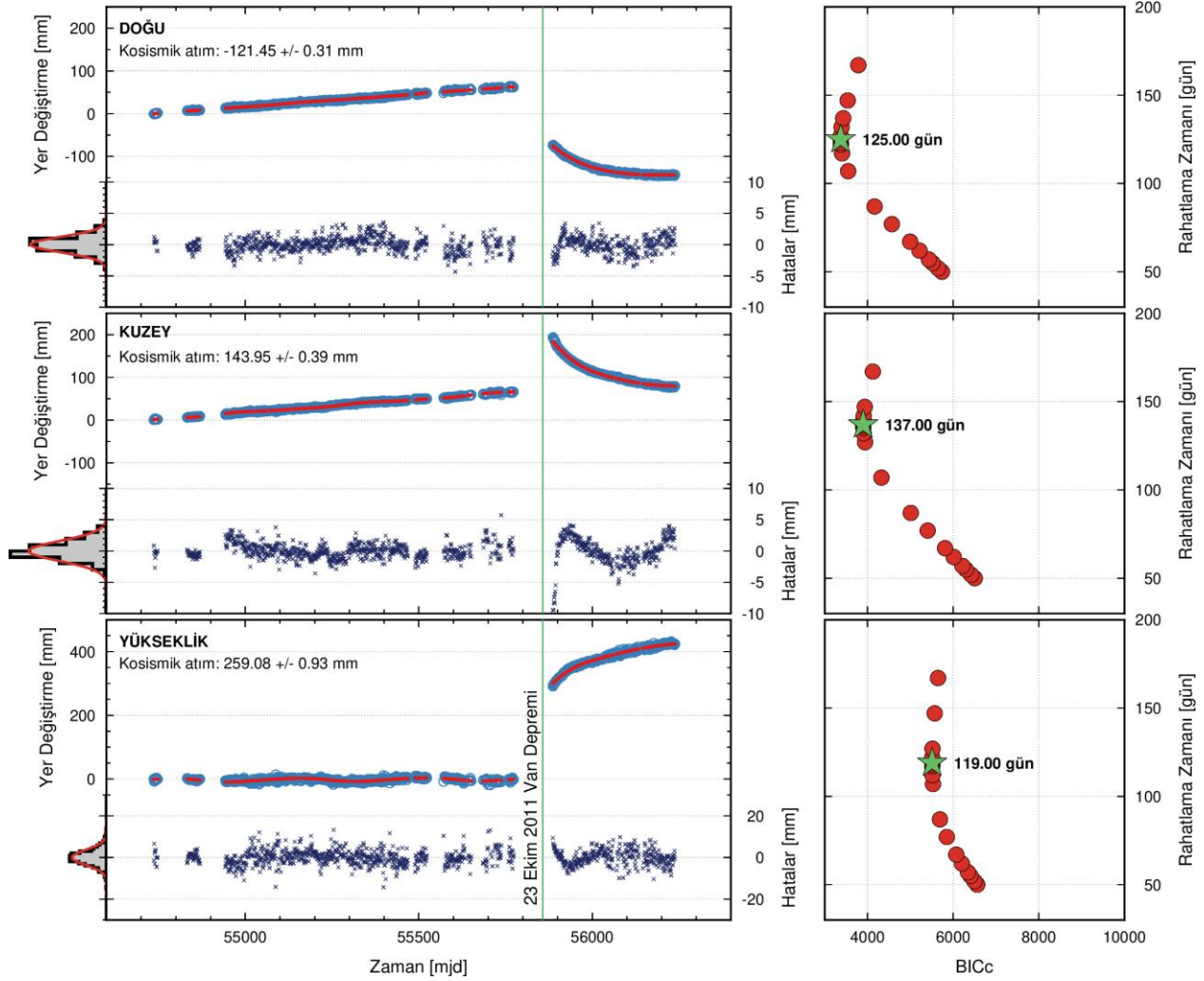
### 3.2.2 $\tau$ Viskoelastik Rahatlama Zamanının Optimizasyonu

Bir deprem meydana geldiğinde, Eşitlik 1’de deprem ile ilgili olan üssel fonksiyonda yalnızca  $t_m^{rlx}$  zamanı bilinmektedir. Parametre kestirim işlemi ise  $d_m$  viskoelastik rahatlama evresinin büyüklüğü kestirilmektedir. Dolayısıyla,  $\tau_m$  viskoelastik rahatlama evresinin zamanı ilk aşamada ne tam olarak bilinmekte ne de analizlerde kestirilmektedir. Bu çalışmada, 23 Ekim 2011 Van Depremi için  $\tau_1$  ( $m = 1$ ) değeri Hector v1.9 yazılımının model seçimi için hesaplanan  $BIC_c$  (corrected Bayesian Information Criteria) kalite ölçütü kullanılmıştır. He, Bos, Montillet ve Fernandes (2019) uzun GPS zaman serilerinin düşük frekanslardaki gürültü özelliklerini incelediği çalışmasında  $BIC_{cp}$  değerinin model seçiminde etkili olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği tarihte ve çalışmada kullanılan Hector yazılımının versiyonu  $BIC_c$  kalite ölçütü değerini hesaplamamaktadır. Yazılımın en güncel versiyonunda, olası ani yer değiştirmelerin (ofsetlerin) belirlenmesinde  $BIC_c$  değerine başvurulmuştur (Bos & Fernandes, 2021). Ayrıca, bu çalışma kapsamı dışında yapılmış simülasyon çalışmalarında da  $BIC_c$  değerinin uygun model seçiminde etkili olduğu tecrübe edilmiştir. Dolayısıyla  $BIC_c$  değeri, 23 Ekim 2011 Van Depremi viskoelastik rahatlama zamanının belirlenmesi için model seçim kriteri olarak benimsenmiştir.

$\tau_1$  viskoelastik rahatlama zamanının optimizasyonu için Nelder-Mead Simplex algoritması kullanılmıştır (Press, 2007). Başlangıç değeri  $\tau_1 = 50$  gün olarak seçilmiştir. Deterministik olarak, senaryo (I) için başlangıç koordinat değeri (intercept), deformasyon oranı (hız), yıllık ve yarıyıllık periyodik sinyaller, deprem anı kosismik yer değiştirme ve deprem sonrası rahatlama evresi için üssel fonksiyon; senaryo (II) deprem sonrası zaman serisi için ise deprem anı kosismik hariç benzer parametreler kestirim için tanımlanmıştır. Stokastik olarak, bu aşamada yalnızca BG varsayımı dikkate alınmıştır. Bu model varsayımları ile viskoelastik rahatlama evresinin gözle dâhi görülebildiği VAAN istasyonu için optimizasyonu gerçekleştirilmiş, senaryo (II) deprem sonrası zaman serisinde  $\tau_1$  değerinin anlamsız büyük değerlere ulaştığı görülmüştür. VAAN istasyonu deprem sonrasında yalnızca 1.04 yıllık zaman serisi mevcuttur. Bu durumun önüne geçebilmek adına tüm değerlendirmelerde  $\tau_1 \in [0, 300]$  gün aralığına koşul uygulanmıştır.

Şekil 2 incelendiğinde, VAAN istasyonu doğu bileşeni için 125 gün, kuzey bileşeni için 137 gün, yükseklik bileşeni için ise 119 günlük bir viskoelastik rahatlama zamanı optimize edilmiştir. Ancak her üç bileşende zaman serileri incelendiğinde, ölçü ve model değerleri birbirleri ile uyumlu görünse de deprem sonrası hata değerlerine bakıldığında düzgün dağılım göstermediği açıkça görülmektedir. Şekil 2’deki hata değerleri senaryo (I) yani Eşitlik 8’de ifade edilen  $e_7$  değerini temsil

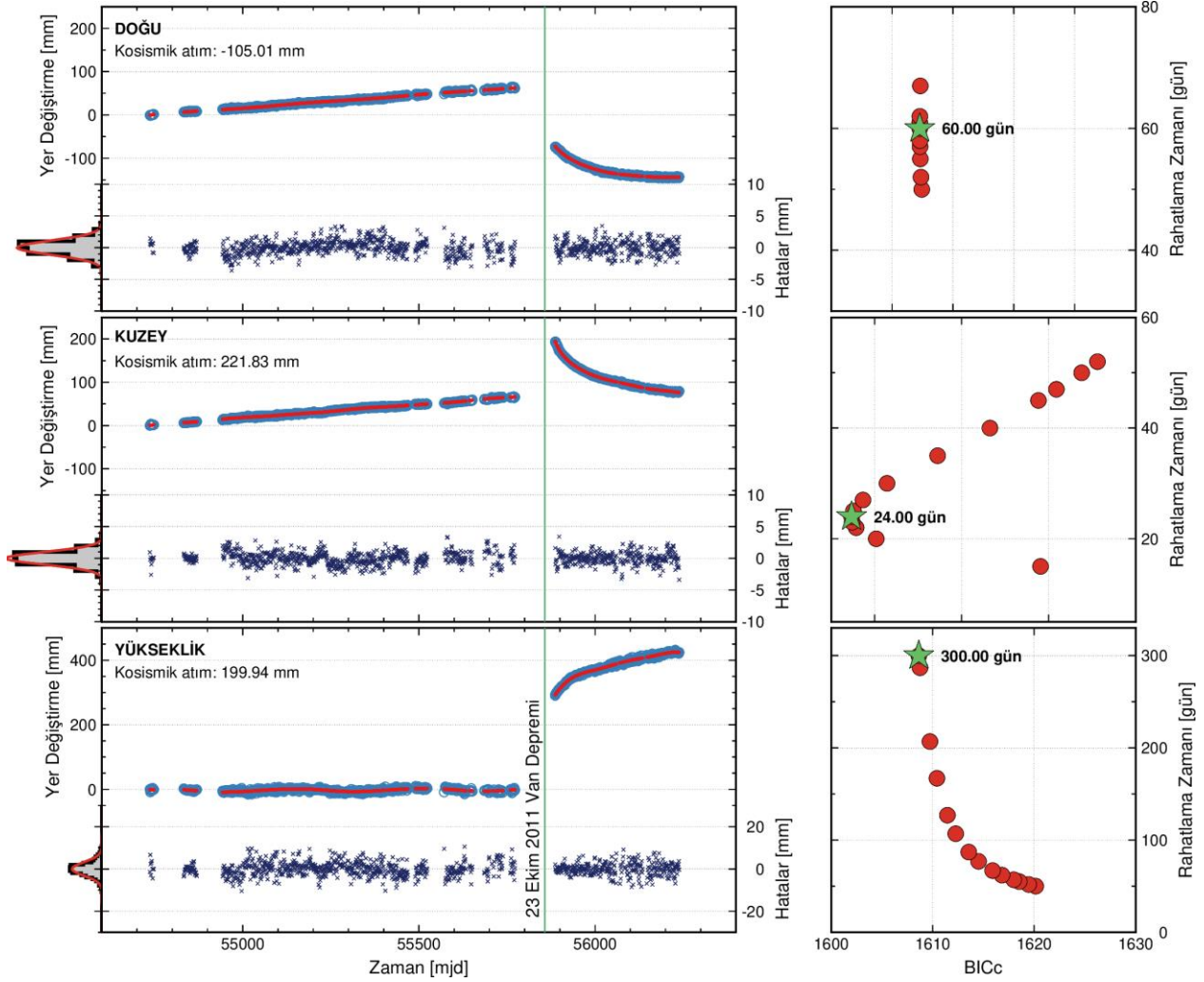
etmektedir ki stokastik süreçlerin irdelenmesi bu hata vektörü üzerinden yapılacaktır.



**Şekil 2:** VAAN istasyonu için senaryo (I)  $\tau_1$  değeri optimizasyon sonuçları. Kırmızı daireler Nelder-Mead Simplex algoritması yakınsama sürecindeki  $BIC_c$  değerine karşılık rahatlama zamanlarını, yeşil yıldız ise en küçük  $BIC_c$  değerine göre yakınsatılmış  $\tau_1$  değerlerini göstermektedir. Doğu, kuzey ve yükseklik bileşenleri için zaman serisi (mavi daireler) kestirilen model (kırmızı çizgi) ve hata değerleri (koyu mavi x'ler) histogramları ile gösterilmiştir. Düşey yeşil düz çizgi deprem zamanını ifade etmektedir.

Senaryo (II)'de deprem öncesi zaman serisi, başlangıç koordinat değeri, hız, yıllık ve yarı yıllık sinyaller hesaba katılarak yalnızca BG varsayımı ile değerlendirilmiştir. Deprem sonrası ise kullanılan büyüklükler yukarıda ifade edilmiştir. Şekil 3, senaryo (II) deprem sonrası için  $\tau_1$  optimizasyon sonuçlarını göstermektedir.





Şekil 3: VAAN istasyonu için senaryo (II)  $\tau_1$  değeri optimizasyon sonuçları. Simgeler Şekil 2'de açıklandığı gibidir.

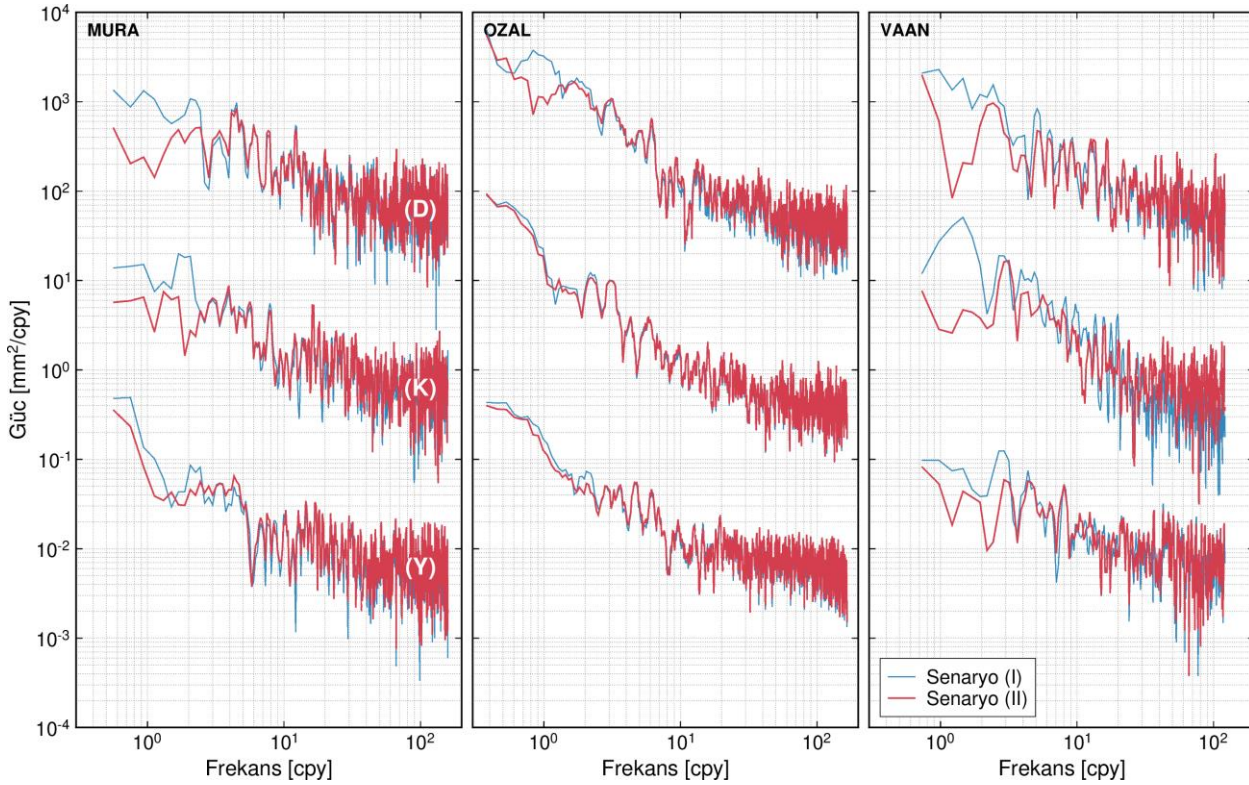
Şekil 3 dikkatle incelendiğinde, deprem sonrası dönem Şekil 2'ye göre oldukça düzgün dağılımlı görünmektedir ki bu da deprem sonrası rahatlama evresinin daha iyi modellendiğinin göstergesidir. Senaryo (II) için VAAN istasyonu doğu bileşeni viskoelastik rahatlama zamanı 60 gün, kuzey için 24 gün, yükseklik içinse 300 gün olarak optimize edilmiştir. Deprem öncesi dönem hataları ve deprem sonrası hataların birleşimi,  $e_{II}$  (bkz. Eşitlik 8) hatalar vektörünü temsil etmektedir ve stokastik süreçlerin irdelenmesi bu hata vektörü üzerinden yapılacaktır.

Yukarıda VAAN istasyonu için açıklanan viskoelastik zamanın optimizasyonu işlemi MURA ve OZAL istasyonları için de gerçekleştirilmiştir. MURA istasyonunda, deprem sonrası rahatlama evresi gözle görülecek düzeyde değildir. Senaryo (I) sonuçlarına göre, doğu ve kuzey bileşenlerinde 300 gün üst sınırında, yükseklik bileşeninde ise 6 gün olarak optimize edilmiştir. Yükseklik bileşenindeki 6 günlük rahatlama zamanı gerçek dışı kosmik yer değiştirme ve standart sapmaların kestirilmesine sebep olmuştur. Senaryo (II) sonuçlarına bakıldığında ise, optimize edilen rahatlama zamanları doğu, kuzey ve yükseklik bileşenleri için sırasıyla 86, 132 ve 57 gündür. OZAL istasyonunda ise bu değerler senaryo (I) için sırasıyla 300, 300 ve 141 gün iken senaryo (II) için 300, 300 ve 119 gün olarak optimize edilmiştir.

### 3.2.3 $e_I$ ve $e_{II}$ Hatalar Vektörlerinin Stokastik Karakterleri

Bu bölümde deterministik büyüklüklerden ayıklanmış, senaryo (I) ve (II)'den elde edilen hata vektörlerinin stokastik karakterleri irdelenmiş ve karşılaştırılmıştır. İlk aşamada, her istasyonun tüm bileşenlerindeki  $e_I$  ve  $e_{II}$  hata vektörleri Lomb-Scargle algoritması kullanarak güç spektrumları irdelenmiştir. Lomb-Scargle algoritması Lomb (1976) tarafından

geliştirilmiş, Scargle (1982) tarafından kapsamı genişletilen boşluklu zaman serileri güç spektrumlarının hesabında sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Şekil 4'te MURA, OZAL ve VAAN istasyonlarını doğu, kuzey ve yükseklik bileşenlerindeki senaryo (I) ve (II) için güç spektrumları gösterilmektedir.  $e_I$  ve  $e_{II}$  hata vektörleri, başlangıç değer, hız, yıllık/yarıyıllık mevsimsel sinyaller ve deprem sonrası viskoelastik rahatlama evresi deterministik büyüklükleri hesaba katılarak yalnızca BG stokastik model varsayımına göre elde edildikleri için güç spektrumları da yalnızca ilgili zaman serilerinin stokastik karakterlerini gösterecektir. Bir başka deyişle, iki farklı durumda ele alınan deprem sonrası viskoelastik rahatlama evresinin stokastik süreçlere olan etkisini de gösterecektir.



Şekil 4: Senaryo (I) ve (II) için tüm istasyonların Doğu (D), Kuzey (K) ve Yükseklik (Y) bileşenlerindeki güç spektrumları. Görsel kolaylık açısından koordinat bileşenleri birbirlerine göre ötelenerek çizilmiştir.

Şekil 4 incelendiğinde, MURA istasyonu doğu ve kuzey bileşenlerinde senaryo (I) durumu senaryo (II) ile karşılaştırıldığında düşük frekanslarda daha güçlü sinyale sahiptir, yani ölçüler düşük frekanslarda daha korelasyonludur. Yükseklik bileşeninde bu durum yataydaki kadar güçlü olmasa da senaryo (I)'den elde edilen hata vektörleri de benzer şekilde düşük frekanslarda daha korelasyonludur. Yüksek frekanslara doğru spektrumun eğimi yataylaşmakta, bu da uygun renkli gürültü modeline BG gürültü modelinin eşlik edeceğini göstermektedir. OZAL istasyonu için senaryolar üç bileşen için karşılaştırıldığında ise neredeyse benzer özellik göstermektedir. Yalnızca, doğu bileşeninde yıllık sinyal civarında kısmen daha güçlü sinyal görünmektedir. OZAL istasyonu güç spektrumlarının diğer istasyonunkilere nazaran bu denli benzerlik göstermesinin en önemli sebebi zaman serisi uzunluğudur. Önceki bölümlerde ifade edildiği üzere deprem sonrasında 10 yıldan daha uzun bir zaman serisine sahiptir. Deprem sonrası viskoelastik rahatlama evresinin gözle dahi rahatlıkla görülebildiği VAAN istasyonunda, doğu bileşeni için düşük frekanslarda senaryo (I) durumunun daha güçlü sinyal gösterdiği açıktır. Yüksek frekanslara doğru ise MURA ve OZAL istasyonlarında olduğu gibi benzer karakter göstermektedir. Kuzey bileşeninde, yine düşük frekanslarda senaryo (I) durumu daha güçlü sinyal özelliği göstermektedir. Orta frekanslarda benzer eğim gösterse de yüksek frekanslarda yataylaşan spektrumda senaryo (II) için BG modeli daha baskın sinyal ile ortaya çıkmaktadır. Yükseklik bileşeninde ise, doğu bileşeninde ve MURA istasyonu yükseklik bileşenindeki ile benzer özellikleri sergilemektedir. Şekil 2

ve 3'te hata serilerinin deprem sonrası kısımlarındaki farklılık, özellikle yüksek frekanslardaki güç değişiminin sebebinin açıkça göstermektedir.

Hangi renkli gürültü modeli kombinasyonlarının zaman serilerini temsil edeceğini, değerlendirme senaryoları uygun gürültü modelini değiştirip değiştirmeyeceğini irdelemek adına, her bir hata vektörü BG+KG, BG+KG+RYG ve BG+GYG model kombinasyonları ile analiz edilmişlerdir. Model uygunluğu tıpkı deprem sonrası rahatlama zamanı optimizasyonunda olduğu gibi  $BIC_c$  değerlerine göre yapılmıştır. Stokastik modelin dâhil edildiği analizlerde, deterministik olarak başlangıç değeri ve hız bileşeni hesaba katılmıştır.  $e_I$  ve  $e_{II}$  hata vektörleri hız bileşeninden bağımsız oldukları için beklenen değerinin "0 mm/yıl" olması gerekmektedir. Tablo 1, VAAN istasyonu için kestirim sonuçlarını göstermektedir.

**Tablo 1:** VAAN istasyonu senaryo (I) ve (II) için her üç bileşende BG+KG, BG+KG+RYG ve BG+GYG stokastik modelleri ile kestirim sonuçları. İtalik-altı çizili değerler senaryo (I) ve (II) için  $BIC_c$  değerine göre en uygun olan stokastik süreci, kırmızı ile belirtilenler ise senaryolardan bağımsız en uygun olan stokastik süreci göstermektedir. Birimler, BG: mm; KG, RYG ve GYG: mm.yıl<sup>-k/4</sup>; Hız: mm/yıl'dır.

DOĞU							
	BG	KG	RYG	GYG	$\kappa$	Hız	$BIC_c$
<b>Toplam Zaman Serisi (Senaryo-I)</b>							
<b>BG+KG</b>	<i>0.74</i>	<i>2.81</i>	-	-	<i>-1.00</i>	<i>0.065 +/- 0.256</i>	<i>2957.51</i>
<b>BG+KG+RYG</b>	0.74	2.81	0.00	-	-2.00	0.065 +/- 0.256	2964.42
<b>BG+GYG</b>	0.72	-	-	2.77	-0.96	0.063 +/- 0.246	2964.74
<b>Deprem Öncesi + Deprem Sonrası (Senaryo-II)</b>							
<b>BG+KG</b>	<i>0.81</i>	<i>2.32</i>	-	-	<i>-1.00</i>	<i>-0.001 +/- 0.213</i>	<i>2919.88</i>
<b>BG+KG+RYG</b>	0.81	2.32	0.00	-	-2.00	-0.001 +/- 0.213	2926.79
<b>BG+GYG</b>	0.61	---	-	2.17	-0.69	0.010 +/- 0.130	2925.20
<b>KUZEY</b>							
<b>Toplam Zaman Serisi (Senaryo-I)</b>							
	0.37	4.00	-	-	-1.00	0.096 +/- 0.361	2918.75
	<i>0.79</i>	<i>0.00</i>	<i>6.36</i>	-	<i>-2.00</i>	<i>0.480 +/- 3.135</i>	<i>2864.79</i>
	0.75	-	-	5.20	-1.70	0.371 +/- 1.877	2870.56
<b>Deprem Öncesi + Deprem Sonrası (Senaryo-II)</b>							
	<i>0.69</i>	<i>2.21</i>	-	-	<i>-1.00</i>	<i>-0.039 +/- 0.202</i>	<i>2666.77</i>
	0.69	2.21	0.00	-	-2.00	-0.039 +/- 0.202	2673.68
	0.65	-	-	2.14	-0.91	-0.036 +/- 0.177	2674.28
<b>YÜKSEKLİK</b>							
<b>Toplam Zaman Serisi (Senaryo-I)</b>							
	<i>2.63</i>	<i>7.75</i>	-	-	<i>-1.00</i>	<i>-0.015 +/- 0.708</i>	<i>5284.74</i>
	2.63	7.75	0.00	-	-2.00	-0.015 +/- 0.708	5291.65
	2.05	-	-	7.25	-0.72	0.027 +/- 0.454	5291.39
<b>Deprem Öncesi + Deprem Sonrası (Senaryo-II)</b>							
	<i>2.58</i>	<i>5.92</i>	-	-	<i>-1.00</i>	<i>0.054 +/- 0.545</i>	<i>5045.56</i>
	2.58	5.92	0.00	-	-2.00	0.054 +/- 0.545	5052.46
	1.76	-	-	5.52	-0.56	0.056 +/- 0.282	5050.60

Tablo 1 uygun stokastik model açısından irdelendiğinde, senaryo (I) için kuzey bileşen hariç BG+KG gürültü modeli ile temsil edilmektedir. Bu senaryoda kuzey bileşeni BG+KG+RYG modeli ile temsil edilmiştir. Kestirilen gürültü büyüklüklerine bakıldığında KG için "0 mm.yr<sup>-0.25</sup>" kestirilmiştir. Dolayısıyla, BG+RYG modelinin uygun olduğu da söylenebilir. Senaryo (II) için uygun stokastik modeller irdelendiğinde ise, her üç bileşen BG+KG modeli ile temsil edilmektedir. Senaryo (I) ve (II) karşılıklı olarak irdelendiğinde, yani senaryo (I) mi yoksa senaryo (II) mi daha uygun sorusunun cevabına bakıldığında, yine tüm bileşenlerde BG+KG modelinin geçerli olduğu açıkça görülmektedir. GPS zaman

serileri için BG+KG modelinin en uygun stokastik süreç olduğu birçok araştırmacı tarafından da vurgulanmıştır (Calais, 1999; He vd., 2016; Mao vd., 1999; Santamaría-Gómez vd., 2011; Williams vd., 2004; Zhang vd., 1997).

VAAN istasyonu hız bileşenleri açısından irdelendiğinde, her üç bileşen için de tüm çözümler 0 mm/yıl'a oldukça yakın kestirilmiştir. Doğu bileşeninde senaryo (I) ve (II) arasındaki fark mutlak değerce yaklaşık 0.06 mm/yıl kadardır. Ayrıca senaryo (II) sonuçlarının 0 mm/yıl'a daha yakın olduğu görülmektedir. Kuzey bileşeninde, senaryo (I) ve (II) arasındaki farklar, BG+KG stokastik modeli için yaklaşık 0.14 mm/yıl, BG+KG+RYG stokastik modeli için 0.52 mm/yıl ve BG+GYG modeli içinse 0.41 mm/yıl kadardır. Yükseklik bileşeninde ise doğu bileşeninde olduğu gibi yaklaşık 0.06 mm/yıl kadarlık bir fark ortaya çıkmaktadır. Hız standart sapmaları açısından bakıldığında, senaryo (I) ve (II) için belirlenmiş en uygun stokastik modellerle kestirilen hız standart sapmaları arasındaki oran; doğu, kuzey ve yükseklik bileşenleri için sırasıyla %17, %94 ve %23 oranında aşırı tahmin edilmişlerdir.

Benzer şekilde MURA istasyonu stokastik olarak irdelendiğinde, hem senaryo (I) hem de senaryo (II) için kendi içlerinde BG+KG gürültü modeli ile, senaryo (I) ve (II) karşılıklı olarak irdelendiklerinde ise senaryo (II) için olan BG+KG gürültü modeli senaryo (I)'dekine göre  $BIC_c$  değerine göre daha uygundur. Hız bileşeni açısından irdelendiğinde, senaryo (I) ve (II) arasındaki hız farkları doğu, kuzey ve yükseklik bileşenleri için sırasıyla 0.07, 0.05 ve 0.14 mm/yıl kadardır. En uygun stokastik model ile kestirilen standart sapmalarda ise senaryo (I)'de senaryo (II)'ye göre, %14, %10 ve %8 oranında aşırı tahmin edilmiştir. OZAL istasyonu stokastik olarak irdelendiğinde, senaryo (I) kendi içinde doğu ve kuzey bileşenleri için BG+GYG gürültü modeli ile temsil edilirken yükseklik bileşeni için BG+KG ile temsil edilmektedir. Bu durum senaryo (II) için yalnızca doğu bileşeninde farklılık göstermiş, en uygun stokastik model BG+KG olarak belirlenmiştir. Kuzey ve yükseklik bileşenleri sırasıyla senaryo (I)'de olduğu gibi BG+GYG ve BG+KG gürültü modelleri ile temsil edilmiştir. Senaryo (I) ve (II) karşılıklı olarak irdelendiklerinde ise, tüm bileşenlerde senaryo (II) için hesaplanan  $BIC_c$  değerleri senaryo (I)'e göre daha düşüktür. Hız bileşenleri arasındaki farklar, doğu, kuzey ve yükseklik bileşenleri için sırasıyla 0.08, 0.02 ve 0.13 mm/yıl kadardır. En uygun stokastik model ile kestirilen standart sapmalarda ise senaryo (I)'de senaryo (II)'ye göre, %52, %12 ve %4 oranında aşırı tahmin edilmiştir.

### 3.2.4 Senaryo (I) ve (II) Kosismik Yer Değiştirmeleri

Bu bölümde, farklı iki senaryoda elde edilen kosismik yer değiştirmelerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Senaryo (I) için kosismik yer değiştirmeler doğrudan analizlerden kestirilmişken, senaryo (II) için kosismik yer değiştirmeler deprem öncesi kestirim modelinin deprem tarihindeki değeri ve deprem sonrası modelin deprem tarihindeki değeri arasındaki fark alınarak hesaplanmıştır. Tablo 2, kosismik yer değiştirmeler ve senaryolar arası farkları göstermektedir.

**Tablo 2:** Senaryo (I)'den kestirilen, senaryo (II)'den kestirilen iki ayrı model kullanılarak hesaplanan kosismik yer değiştirmeler ve aralarındaki farklar.

		Birimler milimetredir.		
		Senaryo (I)	Senaryo (II)	Fark
MURA	Doğu	-12.82	-17.00	-4.18
	Kuzey	-64.24	-59.47	4.77
	Yükseklik	-	-	-
OZAL	Doğu	-3.30	-4.31	-1.01
	Kuzey	8.57	9.35	0.78
	Yükseklik	-2.48	-1.04	1.44
VAAN*	Doğu	-121.45	-105.01	16.44
	Kuzey	143.95	221.83	77.88
	Yükseklik	259.08	199.94	-59.14

\*VAAN istasyonu senaryo (I) ve (II) sonuçları Şekil 2 ve 3'te verilmiştir.

MURA istasyonunda kosismik yer değiştirme farkı doğu ve kuzey bileşenleri için mutlak değerce ortalama 4.5 mm, yükseklik bileşeni için ise yukarıda ifade edildiği gibi her iki senaryoda da anlamsız bir değer kestirimi elde edilmiştir. OZAL istasyonunda kosismik kestirim farkları ortalama 1.0 mm civarındadır. VAAN istasyonunda bu farklar oldukça yüksek değerlere sahiptir. Doğru bileşeni için yaklaşık 16 mm olan fark kuzey bileşeninde yaklaşık 8 cm'lere kadar çıkmıştır. Yükseklik bileşeninde ise farklılık yaklaşık 6 cm olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin büyüklüğü deprem sonrası rahatlama evresinin ele alınma stratejisinin önemini de ortaya koymaktadır.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, GPS zaman serileri kullanılarak deprem sonrası rahatlama evresi en uygun değerine optimize edilerek iki farklı şekilde modellenmiş ve hem stokastik süreçleri hem de hız parametre ve standart sapmalarını nasıl etkilediği üzerine irdelemeler yapılmıştır. İki farklı model değerlendirmesi; deprem öncesi ve sonrasını da kapsayacak biçimde bütünleşik bir analiz ve deprem öncesi ve sonrası ayrı ayrı analiz edilerek hata terimlerinin birleştirilmesi şeklinde ele alınmıştır. Uygulama alanı olarak 23 Ekim 2011 Mw=7.2 Van depremi seçilmiştir. Deprem odak merkezine yakınlığı dolayısıyla Harita Genel Müdürlüğü'nden edinilen VAAN, MURA ve OZAL istasyon zaman serileri doğu, kuzey ve yükseklik bileşenleri ifade edilen senaryolara göre değerlendirilmiştir.

Deprem sonrası rahatlama zamanı Nelder-Mead yakınsama algoritmasıyla her iki senaryo için de optimize edilmiştir. Optimizasyon işleminde deprem sonrası en kısa zaman serisi yaklaşık 1 yıl ile VAAN istasyonuna aittir. Buradan hareketle deprem sonrası rahatlama zamanı optimize değerleri anlamsız değerlere eriştiği için 300 gün üst koşulu uygulanmıştır. İlk senaryoda, VAAN istasyonu için doğu, kuzey ve yükseklik bileşenleri için sırasıyla 125, 137 ve 119 gün optimize edilmişken, ikinci senaryoda bu değerler 60, 24 ve 300 gün olarak optimize edilmiştir. Bu değerler, MURA istasyonu için 300, 300 ve 6 gün / 86, 132 ve 57 gün olarak, OZAL istasyonu için ise 300, 300 ve 141 gün / 300, 300 ve 119 gün olarak optimize edilmişlerdir. Deprem sonrası rahatlama zamanının 300 gün üst sınırına erişmesi, ilk senaryoda, deprem öncesi ve sonrası birlikte değerlendirildiği için depremden önceki ölçülerden etkileniyor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Deprem öncesinden bağımsız olan ikinci senaryoda 300 gün üst sınırına erişmesi ise, rahatlama zamanını modellemek için az sayıda ölçü olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, viskoelastik rahatlama evresi modellemesinde kullanılan eksponansiyel fonksiyonun tek başına yetersiz olabileceği, literatür doğrultusunda logaritmik fonksiyon ile de desteklenmesi gerektiğinin bir göstergesi olabilir.

Değerlendirme senaryolarından edinilen doğu, kuzey ve yükseklik güç spektrumları, özellikle bütünleşik analiz (ilk senaryo) sonuçları düşük frekanslarda daha güçlü sinyal karakteri sergilemektedir. Ancak zaman serisi uzunluğu arttıkça frekans uzayında bu farklılığı görmek zorlaşmaktadır ki OZAL istasyonu güç spektrumu bunun bir örneğidir. Düşük frekanslarda güçlü sinyal, RYG'ye bir katkı yapabileceğinin göstergesidir. Buradan hareketle, en uygun stokastik sürecin belirlenmesi işleminde BG+KG, BG+KG+RYG ve BG+GYG modelleri her iki senaryo için irdelenmişlerdir. VAAN istasyonunda, ilk senaryoda BG+KG+RYG ile temsil edilen kuzey bileşen, ikinci senaryoda BG+KG ile temsil edilmiştir. OZAL istasyonunda, ilk senaryoda BG+GYG ile temsil edilen doğu ve kuzey bileşenleri ise ikinci senaryoda yine benzer şekilde BG+KG ile temsil edilmiştir. OZAL istasyonu ilk senaryosunda BG+GYG için kestirilen spektral indeks değerleri yaklaşık -1.25 civarındadır. Bu durum ise stokastik sürecin RYG'ye evrildiğinin de bir göstergesidir. Diğer istasyon ve bileşenlerde BG+KG en uygun model olarak belirlenmiştir. Stokastik irdelemelerin sonucu olarak, ikinci senaryo hata terimi tüm istasyon ve bileşenlerde BG+KG ile temsil edilmişlerdir ki bu durum literatürde sık vurgulanan stokastik süreçtir.

Bütünleşik analizin yapıldığı ilk senaryo ve ayrı analizlerin gerçekleştirilerek birleştirilen ikinci senaryo neticesinde kestirilen hız parametreleri arasında farklılık yaklaşık 0.1 mm/yıl kadardır. Ancak, VAAN istasyonu kuzey bileşeninde bu değer

yaklaşık 0.5 mm/yıl'a kadar çıkmıştır. En uygun stokastik modeller üzerinden ilk senaryo hız standart sapmaları ikinci senaryoya göre özellikle VAAN istasyonu kuzey bileşeninde %94 kadar daha fazladır. Diğer istasyon ve bileşenlerinde bu oranlar %4 – %52 arasında değişmektedir. İlk ve ikinci senaryo hata terimleri karşılaştırıldığında, deprem sonrası rahatlamının ilk senaryoda model ile tam olarak uyuşmadığı, ikinci senaryoya göre stokastik süreçler, hız parametresi ve standart sapmalarındaki farklılığın sebebini açıkça göstermektedir. Hız parametresine benzer olarak kosmik yer değiştirmeler iki senaryo için karşılaştırıldıklarında ise MURA istasyonu için ortalama 4.5 mm, OZAL istasyonu için ortalama 1.1 mm ve VAAN istasyonu için ise 80 mm'ye kadar farklılıklar gözlemlenmiştir.

## Teşekkür

Harita Genel Müdürlüğü'ne bünyelerinde kurulmuş Eski İstasyonlar, TUSAGA ve TUSAGA-Aktif sürekli GPS istasyon zaman serilerini açık erişimle sundukları için teşekkür ederim. Makaledeki şekillerin tümü “Generic Mapping Tools v6.x” açık kaynak kodlu yazılımı ile üretilmiştir (Wessel vd., 2019). Kıymetli değerlendirmeleri için editör Prof. Dr. Bahattin Erdoğan ve iki hakeme sonsuz şükranlarımı sunarım.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Kaynaklar

- Agnew, D. C. (1992). The time-domain behavior of power-law noises. *Geophysical research letters*, 19(4), 333-336.
- Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. C., & Teunissen, P. J. (2007). Assessment of noise in GPS coordinate time series: methodology and results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).
- Aydin, C., Duman, H., Günes, Ö., & Sanli, D. U. (2021). Effect of stochastic model errors on significance test for velocities in analysis of GPS position time series. *Journal of Surveying Engineering*, 147(1), 04020025.
- Bogusz, J., & Klos, A. (2016). On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. *GPS solutions*, 20, 655-664.
- Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & Bastos, L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. *Journal of Geodesy*, 87(4), 351-360.
- Bos, M. S., & Fernandes, R. M. S. (2021). *Hector user manual version 1.9*.
- Calais, E. (1999). Continuous GPS measurements across the Western Alps, 1996–1998. *Geophysical Journal International*, 138(1), 221-230.
- Chen, G., Zhao, Q., Wei, N., & Liu, J. (2018). Impacts on noise analyses of GNSS position time series caused by seasonal signal, weight matrix, offset, and helmert transformation parameters. *Remote Sensing*, 10(10), 1584.
- Dogan, U., Demir, D. Ö., Çakir, Z., Ergintav, S., Ozener, H., Akoğlu, A. M., Nalband, S. S., & Reilinger, R. (2014). Postseismic deformation following the Mw 7.2, 23 October 2011 Van earthquake (Turkey): Evidence for aseismic fault reactivation. *Geophysical Research Letters*, 41(7), 2334-2341.
- Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Webb, F., Prawirodirdjo, L., Kedar, S., & Jamason, P. (2006). Spatiotemporal filtering using principal component analysis and Karhunen-Loeve expansion approaches for regional GPS network analysis. *Journal of geophysical research: solid earth*, 111(B3).
- Dzurisin, D. (2003). A comprehensive approach to monitoring volcano deformation as a window on the eruption cycle. *Reviews of Geophysics*, 41(1).
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of*

- Earthquake Engineering*, 16(8), 3229-3275.
- Gualandi, A., Avouac, J. P., Galetzka, J., Genrich, J. F., Blewitt, G., Adhikari, L. B., Koirala, B. P., Gupta, R., Upreti, B. N., Pratt-Sitaula, B., & Liu-Zeng, J. (2017). Pre-and post-seismic deformation related to the 2015, Mw7. 8 Gorkha earthquake, Nepal. *Tectonophysics*, 714, 90-106.
- Hackl, M., Malservisi, R., & Wdowinski, S. (2009). Strain rate patterns from dense GPS networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1177-1187.
- Hackl, M., Malservisi, R., Hugentobler, U., & Jiang, Y. (2013). Velocity covariance in the presence of anisotropic time correlated noise and transient events in GPS time series. *Journal of Geodynamics*, 72, 36-45.
- Hammond, W. C., Kreemer, C., Blewitt, G., & Plag, H. P. (2010). Effect of viscoelastic postseismic relaxation on estimates of interseismic crustal strain accumulation at Yucca Mountain, Nevada. *Geophysical Research Letters*, 37(6).
- He, X., Montillet, J. P., Hua, X., Yu, K., Jiang, W., & Zhou, F. (2016). Noise analysis for environmental loading effect on GPS position time series. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 14, 131-142.
- He, X., Bos, M. S., Montillet, J. P., & Fernandes, R. M. S. (2019). Investigation of the noise properties at low frequencies in long GNSS time series. *Journal of Geodesy*, 93(9), 1271-1282.
- Hetland, E. A., & Simons, M. (2010). Post-seismic and interseismic fault creep II: Transient creep and interseismic stress shadows on megathrusts. *Geophysical Journal International*, 181(1), 99-112.
- Hosking, J. R. M. (1981). Fractional Differencing. *Biometrika*, 68(1), 165-176.
- Ingleby, T., & Wright, T. J. (2017). Omori-like decay of postseismic velocities following continental earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44(7), 3119-3130.
- Johnson, H. O., & Agnew, D. C. (1995). Monument motion and measurements of crustal velocities. *Geophysical Research Letters*, 22(21), 2905-2908.
- Kasdin, N. J. (1995). Discrete simulation of colored noise and stochastic processes and  $1/f$  power law noise generation. *Proceedings of the IEEE*, 83(5), 802-827.
- Langbein, J. (2008). Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B5).
- Langbein, J. (2017). Improved efficiency of maximum likelihood analysis of time series with temporally correlated errors. *Journal of Geodesy*, 91, 985-994.
- Langbein, J., & Johnson, H. (1997). Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B1), 591-603.
- Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science*, 39, 447-462.
- Mandelbrot, B. B., & van Ness, J. W. (1968). Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM review*, 10(4), 422-437.
- Mao, A., Harrison, C. G., & Dixon, T. H. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B2), 2797-2816.
- Marone, C. J., Scholtz, C. H., & Bilham, R. (1991). On the mechanics of earthquake afterslip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B5), 8441-8452.
- Özdemir, S. (2016). TUSAGA ve TUSAGA-Aktif istasyonlarının hassas koordinat ve hızlarının hesaplanması üzerine. *Harita Dergisi*, 155, 53-81.
- Perfettini, H., & Avouac, J. P. (2004). Postseismic relaxation driven by brittle creep: A possible mechanism to reconcile geodetic measurements and the decay rate of aftershocks, application to the Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B2).
- Press, W. H. (2007). *Numerical recipes: The art of scientific computing (3rd ed.)*. Cambridge University Press.
- Santamaría-Gómez, A., Bouin, M. N., Collilieux, X., & Wöppelmann, G. (2011). Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B1).
- Santamaría-Gómez, A., & Ray, J. (2021). Chameleonic noise in GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(3), e2020JB019541.
- Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced

data. *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 263, Dec. 15, 1982, p. 835-853., 263, 835-853.

- Tiryakioglu, I., Yavasoglu, H., Ugur, M. A., Özkaymak, Ç., Yilmaz, M., Kocaoglu, H., & Turgut, B. (2017). Analysis of October 23 (Mw 7.2) and November 9 (Mw 5.6), 2011 Van earthquakes using long-term GNSS time series. *Earth Sciences Research Journal*, 21(3), 147-156.
- Vallianatos, F., & Sakkas, V. (2021). Multiscale Post-Seismic Deformation Based on cGNSS Time Series Following the 2015 Lefkas (W. Greece) Mw6. 5 Earthquake. *Applied sciences*, 11(11), 4817.
- Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., & Genrich, J. (1997). Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 18057-18070.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H., & Tian, D. (2019). The generic mapping tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), 5556-5564.
- Williams, S. D. P. (2003a). Offsets in global positioning system time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B6).
- Williams, S. D. P. (2003b). The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series. *Journal of Geodesy*, 76, 483-494.
- 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: Solid Earth*, 109(B3).
- 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: solid earth*, 102(B8), 18035-18055.
- URL-1: <https://www.harita.gov.tr/public/sunum/>, (Erişim Tarihi: 19 Şubat 2023).