

**MAREOGRAF VE SABİT GPS ZAMAN SERİLERİNİN ANALİZİYLE UZUN
DÖNEMLİ MUTLAK DENİZ SEVİYESİ DEĞİŞİMLERİNİN ARAŞTIRILMASI**
(INVESTIGATION OF LONG TERM ABSOLUTE SEA LEVEL CHANGES BY THE
TIME SERIES ANALYSIS OF TIDE GAUGE AND CONTINUOUS GPS TIME
SERIES)

Hasan YILDIZ

Harita Genel komutanlığı, Ankara
hasan.yildiz@hgk.mil.tr

ÖZET

Norveç kıyılarında bulunan ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarındaki uzun dönemli mutlak deniz seviyesi değişimleri mareograf (Mar) ve Mar-Sabit GPS (Mar-SGPS) zaman serilerinin analizi ile araştırılmıştır. Bu amaçla, Norveç kıyılarındaki 14 adet mareograf istasyonunun 1953-2001 dönemindeki aylık ortalama deniz seviyesi (ODS) zaman serilerindeki 1-10 yıl ve daha uzun dönemli sinyaller ile ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS yükseklik zaman serilerindeki 2002.81-2004.92 dönemindeki periyodik sinyallerin konumsal ve zamansal karakterini belirlemek için Deneysel Ortogonal Fonksiyon (DOF) analizi ve spektral analiz uygulanmıştır. Doğrusal trend ve istatistiksel olarak anlamlı periyodik sinyallerin modellenmesiyle, uzun dönemli görel ODS trendleri En Küçük Kareler (EKK) yöntemi, Mar-SGPS istasyonlarının düşey hızları ise hem EKK hem de En Büyük Olabilirlik Kestirim (EBOK) yöntemleri ile hesaplanmıştır. TREGDE'de anlamlı bir görel ODS trendi bulunmazken, ANDENES'de görel ODS'nin 2.04 ± 0.19 mm/yıl hızla yükseldiği belirlenmiştir. TGDE ve ANDE Mar-SGPS istasyonlarında, anlamlı mutlak düşey yer kabuğu hareketi tespit edilmemiş, ANDO Mar-SGPS istasyonunda 0.43 ± 0.30 mm/yıl büyüklüğünde bir kara yükselmesi bulunmuştur. Bu değer, ICE4G (VM2) Buzul Sonrası Etki (BSE) modeli ile 0.89 mm/yıl olarak kestirilen kara yükselmesi ile genel olarak uyumludur. SGPS ile hesaplanan mutlak düşey hız, görel ODS yükselme hızı ile birleştirilerek ANDENES mareograf istasyonunda, uzun dönemli mutlak ODS'nin global ODS yükselme tahminleri ile tutarlı olarak 2.47 ± 0.36 mm/yıl hızla yükseldiği bulunmuştur. Benzer analiz ve yaklaşımların Türkiye kıyılarındaki uzun dönemli mutlak ODS değişimlerinin araştırılmasında kullanılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mareograf istasyonu, mutlak deniz seviyesi, sabit GPS (SGPS), deneysel ortogonal fonksiyon (DOF) analizi, spektral analiz, en küçük kareler (EKK), en büyük olabilirlik kestirimi (EBOK), buzul sonrası etki (BSE), kara yükselmesi.

ABSTRACT

Long term absolute sea level variations at ANDENES and TREGDE tide gauges located at the Norwegian coasts are investigated by the analysis of tide gauge (TG) and TG- Continuous GPS (TG-CGPS) time series. For this purpose, Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis and spectral analysis methods are used in order to determine the spatial and temporal character of interannual and interdecadal signals in monthly mean sea level (MSL) time series at 14 tide gauges along Norwegian coasts in 1953-2001 period and periodic signals in height time series of

ANDE, ANDO and TGDE TG-CGPS stations in 2002.81-2004.92 period. By modelling the linear trend and statistically significant periodic signals, the long term relative MSL trends are computed by using Least Squares (LS) method and the vertical velocities of TG-CGPS stations are computed by using both LS and Maximum Likelihood Estimation (MLE) methods. While no significant relative MSL trend is found at TREGDE, relative MSL at ANDENES is found to be rising with rate of 2.04 ± 0.19 mm/year. While no significant absolute vertical land movements are detected at TGDE and ANDE, a land uplift in the order of 0.43 ± 0.30 mm/year at ANDO CGPS station is found. This value generally agrees with 0.89 mm/year land uplift predicted from ICE4G (VM2) Post Glacial Rebound (PGR) model. Combining the absolute vertical velocity of CGPS with the relative MSL trend, absolute MSL at ANDENES tide gauge is found to be rising with a rate of 2.47 ± 0.36 mm/year which is consistent with the global sea level rise estimates. It is suggested to use similar analyses and approaches to investigate the long term absolute sea level variations along Turkish coasts.

Key words: Tide gauge, absolute sea level, continuous GPS (CGPS), empirical orthogonal function (EOF) analysis, spectral analysis, least squares (LS), maximum likelihood estimation, post glacial rebound (PGR), land uplift.

1. GİRİŞ

Hükümetler arası İklim Değişimi Örgütü tarafından yayımlanan üçüncü değerlendirme raporuna göre; global ortalama deniz seviyesinin (ODS), geçen yüzyılda 10-20 cm yükseldiği ve bu yükselmenin büyük bir kısmının global ısınmadan kaynaklandığı değerlendirildiği yapılmakta ve 2100 yılında en düşük 9 cm en yüksek 88 cm ve ortalama 48 cm daha yükseleceği tahmin edilmektedir (Church vd., 2001). Church ve White (2006) tarafından mareograf istasyonları ve uydu altimetre verileri kullanılarak yapılan çalışmada global ODS'nin Ocak 1870 yılından itibaren Aralık 2004 yılına kadar 19.5 cm yükseldiği, 20 nci yüzyılda ODS yükselme hızının 1.7 ± 0.3 mm/yıl ve ODS yükselme ivmesinin de 0.013 ± 0.006 mm/(yr²) olduğu bulunmuştur. Bu çalışma ile ölçülere dayalı olarak 20 nci yüzyılda deniz seviyesi yükselme hızında bir ivme olduğu ilk defa ortaya konulmuştur. Eğer bu ivme sabit kalırsa global ODS'nin Church vd. (2001)'de verilen tahminlerle tutarlı bir biçimde 2100 yılında 1990 yılındaki seviyesine göre 28-34 cm daha yükseleceği ifade edilmektedir (Church ve White, 2006). Bu tahminlerin gerçekleşmesi durumunda kıyı bölgelerindeki yerleşim ve tarımsal alanların bir kısmının sular altında kalması ve bunun da önemli ekonomik ve sosyal sorunlar yaratması söz konusudur.

ODS değişimlerinin güvenilir ve yüksek doğrulukla belirlenmesi için uzun süreli deniz seviyesi verileri gerekmektedir. ODS trendinin; 0.5 mm/yıl hata ile belirlenmesi için 30 yıl, 0.3 mm/yıl hata ile belirlenmesi için ise 50 yıl uzunluğunda veri gerekmektedir (Douglas, 1991; Shennan ve Woodworth, 1992). Veri uzunluğundaki bu kısıtlamalar, meteorolojik etkiler, derin okyanustaki ve kıyı dolaşımındaki değişimler (Woodworth vd., 1999) ve hidrolojik döngüdeki su kaynaklarının uzun dönemli kütle değişimleri (Plag, 2002) nedeniyle oluşan 1-10 yıl ve daha uzun süreli deniz seviyesi değişimlerinden kaynaklanmaktadır.

Mareograf istasyonları, anlık deniz seviyesi ile karadaki bir jeodezik nokta (mareograf röper noktası-Mar-RN) arasındaki yükseklik farkını ölçmektedir. Deniz seviyesinin yer merkezli bir datuma göre konumu mutlak deniz seviyesi ve bunun zamana bağlı değişimi ise mutlak deniz seviyesi değişimi olarak adlandırılır (Bevis vd., 2002). Kara parçasının ya da deniz tabanının veya daha genel olarak litosferin tanımlanan bir elipsoide göre düşey hareketi ise mutlak düşey yer kabuğu hareketi olarak adlandırılır (Bevis vd., 2002). Bu iki hareket arasındaki farka, yani deniz seviyesinin mareograf istasyonunun bulunduğu kara parçasına göre ya da deniz tabanına göre hareketine ise göreceli deniz seviyesi değişimi denir. Mareograf istasyonları ile göreceli deniz seviyesi ölçülmektedir. Eğer, sabit GPS (SGPS) (veya farklı uydu jeodezisi tekniği) veya tekrarlı mutlak gravite ölçüleri ile mareograf istasyonlarındaki düşey kabuk hareketleri belirlenirse, göreceli deniz seviyesi değişimleri mutlak deniz seviyesi değişimlerine dönüştürülebilir.

Mareograf istasyonlarındaki düşey yer kabuğu hareketlerini belirlemeye yönelik jeodezik teknikler ilk olarak Carter vd. (1989) tarafından önerilmiş ve Mar-RN'nin Uluslararası Yersel Referans Sistemi (ITRS) gibi global bir referans sistemine bağlanması ve mareograf istasyonlarındaki düşey yer kabuğu hareketlerinin mareograf istasyonları yanında tesis edilecek GPS noktaları ve Uluslararası GPS Servisi (IGS) istasyonlarında aynı anda yapılacak tekrarlı GPS (TGPS) ölçüleri ile izlenmesi tavsiye edilmiştir. Carter (1994)'de GPS teknolojisindeki önemli ilerlemeler, GPS uydu dağılımının tamamlanması, IGS'in kurulması nedeniyle, 1-2 mm/yıl doğruluğa ulaşmak için en az beş yıl, 0.3-0.5 mm/yıl doğruluk için ise birkaç on yıl uzunluğunda SGPS zaman serisinin kullanılması önerilmiştir. Neilan vd. (1997) tarafından mareograf istasyonlarında SGPS istasyonu kurulması ve işletilmesi, GPS ölçme yöntem ve stratejileri geliştirilmesi ile ilgili standartlar oluşturulması, GPS referans noktası ile Mar-RN arasında duyarlı geometrik nivelman bağlantı ölçüleri yapılması önerilmektedir. Bunun yanında, mareograf istasyonunun bulunduğu bölgedeki düşey yer kabuğu hareketleri ile ilgili tamamlayıcı bilgilerin toplanması, istasyon yakınındaki kütle dağılımının mutlak gravite ölçüleri ile öğrenilmesi ve istasyon yakınındaki meteorolojik ve çevre vb. yardımcı ölçümlerin yapılması da tavsiye edilmiştir. Bevis vd. (2002)'de ise mareograf istasyonlarında SGPS istasyonları kurulması ve işletilmesi ile ilgili teknik hususlar irdelenmiştir.

SGPS zaman serilerinin periyodik sinyaller içerdiği ve bu sinyallerin hız kestirimlerini etkilediği bilinmektedir (Blewitt ve Lavall'ee, 2002). Dong vd. (2002) tarafından SGPS istasyonlarındaki yıllık düşey değişime neden olan jeofiziksel etkenler ve model hatalarının katkıları gösterilmiştir. Bu etkenler kutup gelgiti, okyanus gelgitleri, atmosferik kütle, gelgit dışındaki okyanus kütlesi, kar kütlesi, toprak nemi, kayaların ısınmadan kaynaklanan genleşmesi, yörünge, faz merkezi, troposfer modellerindeki hatalar, ağ dengelenmesindeki hatalar ve farklı yazılımlar kullanılmasından kaynaklanan hatalar olarak ifade edilmiştir.

Scherneck vd. (2002) tarafından yıllık, yarım-yıllık, 4 aylık ve 3 aylık harmonik terimler En Küçük Kareler (EKK) yöntemi ile modellenmiş ve böylece anten ve anten koruyuculardaki kar ve buz birikmesi vb. bazı iklimsel etkiler incelenmiştir. Blewitt ve Lavall'ee (2002)'de, IGS ağına yapılan incelemelerde GPS zaman serilerinin belirgin olarak yıllık periyodik sinyal içerdikleri belirlenmiş ve bu yıllık sinyalin genel

olarak yatay konumda genliđi 2 mm, dűşey konumda ise 4 mm civarında olduđu belirtilmiřtir. Zaman serilerinde gűrűlen yıllık periyodik etkinin atmosferik ve hidrolojik yűkleme etkisinden kaynaklanan gerçek bir fiziksel hareket olduđu tahmin edilmektedir. řanlı (2002)'de, yıllık periyodik etkinin dikkate alınmaması durumunda hız kestirim hatasının bűyűk olacađı ve bunun da deformasyon yorumlarında yanlıđıya yol açaacađı belirtilmektedir. Blewitt ve Lavall'ee (2002), yıllık deđiřimlerin istasyon hız kestirim hatalarına olan etkilerinin tamsayı-artı-yarım yıl gűzlem sűrelerinde en kűçük olduđu sonucuna varmıř ve 2.5 yıldan daha kısa sűreli verilerin jeodezik yorumlama amacıyla analiz edilmemesini űnermiřtir. Bunun nedeni olarak ise, hız ve periyodik bileřen parametrelerinin EKK modelinde birlikte kullanılması ile parametreler arasında oluřan yűksek korelasyon gűsterilmiřtir. Ayrıca, zaman serisinin 4.5 yıldan fazla veri iđeremesi durumunda hız hatasının gűz ardı edilebilir bir dűzeye indiđi ve periyodik bileřenlerin kestirilmesine gerek olmadıđı belirtilmiřtir. Diđer taraftan, Calais (1999), SGPS zaman serilerinde bűyűk genlikli ve yaklařık 450 gűnlűk periyodu olan uzun dűnemli bir periyodik sinyal bulunduđunu gűstermiřtir. Bu periyodun mevsimsel olmaması ve bu sinyalin dođu, batı bileřenlerinde daha bűyűk olması nedeniyle, bunun muhtemelen referans sistemindeki hatalar veya uydu yűrűnge veya Yer yűnelmesinden kaynaklanabileceđi sonucuna varılmıřtır. Mao vd. (1999), Zhang vd. (1997) ve Williams (2003) tarafından SGPS zaman serilerinin zamanla korelasyonlu (renkli) gűrűltű iđerdikleri belirtilmiřtir. Mao vd. (1999)'da SGPS zaman serilerinin normal dađılımlı olduđu varsayımı ile EKK ile analiz edilmesi durumunda, SGPS istasyon hız hatalarının olması gerekenden 5-10 kat daha kűçük olduđu gűsterilmiřtir.

Bu çalıřmada, istasyonların yođun dađılımlı, verilerin dođruluđu ve gűvenirliđi açısından test alanı olarak seçilen Norveç kıyılarındaki ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarındaki uzun dűnemli mutlak deniz seviyesi deđiřimleri mareograf ve Mar-SGPS zaman serilerinin analiziyle arařtırılmıřtır. SGPS yűkseklik zaman serilerinin normal dađılımlı olduđu varsayımı ile sadece EKK yűnteminin uygulandıđı Yıldız (2005) ve Yıldız ve Deniz (2005)'deki mareograf ve Mar-SGPS zaman serileri kullanılmıřtır. Ancak anılan çalıřmalardan farklı olarak burada, SGPS zaman serilerinin zamanla korelasyonlu gűrűltű iđerdiđi (Mao vd. ,1999, Zhang vd.,1997 ve Williams, 2003) dikkate alınarak SGPS yűkseklik zaman serilerine iliřkin hız hesapları EKK yűntemi yanında En Bűyűk Olabilirlik Kestirim (EBOK) yűntemi kullanılarak yapılmıřtır. Vurgulanması gereken diđer űnemli konu ise, ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarının yakınındaki Mar-SGPS istasyonları ile mareograf istasyonları arasında tekrarlı duyarlı geometrik nivelman ۆlűleri bulunmadıđından mareograf istasyonları ile Mar-SGPS istasyonları arasında gűreli bir dűşey hareket olmadıđı varsayılmıř olmasıdır.

Çalıřmanın ikinci bűlűműnde mareograf istasyonu ODS ve Mar-SGPS yűkseklik zaman serilerinin konumsal ve zamansal karakterini ortaya çıkarmak için kullanılan Deneysel Ortogonal Fonksiyon (DOF) analizi ayrıntılı olarak anlatılmıř, űűncű bűlűmde sűz konusu zaman serilerindeki periyodik deđiřimleri belirlemek için kullanılan MC-CLEAN V2.0 spektral analiz yazılımı ve dűrdűncű bűlűmde ise SGPS zaman serilerinin analizinde kullanılan EBOK yűntemi ve EBOK yűnteminin uygulandıđı Create and Analyse Time Series (CATS) yazılımı hakkında kısaca bilgi

verilmiştir. Beşinci bölümde uygulama, altıncı ve son bölümde ise sonuç ve öneriler verilmiştir.

2. DENEYSEL ORTOGONAL FONKSİYON ANALİZİ

DeneySEL Ortogonal Fonksiyon (DOF) analizi, zaman serilerinde bulunan farklı periyotlu sinyalleri gürültüden ayırmak ve birden fazla istasyona ait zaman serilerindeki ortak davranışı ve bilgiyi ortaya çıkarmak amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Temel Bileşenler Analizi (TBA) olarak da adlandırılan bu yöntem her türlü zaman ve konum serisine uygulanabilmektedir. Bu yöntemin temel faydası, konumsal olarak dağılmış istasyon zaman serileri arasındaki fiziksel ilişkiyi daha özlü bir şekilde ortaya çıkarabilmesidir. DOF analizi ile zaman serilerindeki konumsal ve zamansal değişimler, ortogonal fonksiyonlar veya istatistiksel bileşenlerle ortaya çıkarılmaktadır. Bu yöntemle, konumsal olarak dağılmış zaman serilerindeki değişim (varyans), değişim oranına göre az sayıda ortogonal fonksiyonla ifade edilebilir. Belirli sayıda zaman serisi için DOF hesabında iki yaklaşım mevcuttur. Birincisinde, zaman serilerinden kovaryans matris oluşturulur; özdeğer ve özvektörlerine ayrıştırılır. İkincisinde ise kovaryans matris oluşturulmadan Tekil Değer Ayrışımı (TDA) tekniği ile özdeğerler, özvektörler ve zamansal vektörler (temel bileşenler-TB) elde edilir. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar özdeştir. DOF analizi, Barnett (1983) ve Preisendorfer (1988)'de ayrıntılı olarak açıklanmış olup, yöntemin aylık deniz seviyesi veya SGPS yükseklik zaman serilerine uygulanması aşağıda anlatılmıştır.

Zaman serilerinin; $m = 1, \dots, M$ adet istasyonda ve $t=1, \dots, N$ zamanlarındaki değerleri $\psi_m(t)$ ile gösterilsin. $\psi_m(t)$, N uzunluğunda M adet zaman serisini ifade etmekte olup, zaman serilerinin hepsi için başlangıç ($t=1$) ve bitiş ($t=N$) zamanı aynı olmalıdır. Mareograf ve SGPS zaman serilerinin zaman boyutu genellikle istasyon sayısından daha fazladır. Bu nedenle, burada, DOF analizi, zaman adımı sayısı istasyon sayısından daha büyük olduğu durumlar ($N>M$) için anlatılmıştır. Eğer bir istasyona ait verilerin değişimi diğerlerine göre önemli ölçüde büyük ise, bu değişim diğer istasyonları etkileyecek ve DOF analizinde bu istasyonun değişimi baskın olarak ortaya çıkacaktır. Böylesi durumlar önlenmek istendiğinde tüm istasyonlara eşit ağırlık vermek için zaman serileri normlandırılabilir:

$$F_m(t) = \frac{\psi_m(t) - \text{trend}}{\sigma_m} \quad (1)$$

Burada trend, aylık ODS doğrusal trendi, σ_m ise ODS doğrusal trendi ve mevsimsel etkileri çıkartılmış verinin standart sapması olup,

$$\sigma_m = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N \psi_m^2(t) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

eşitliğiyle elde edilir. DOF analizine girdi olarak kullanılmak üzere ODS doğrusal trendi ve mevsimsel etkilerden arındırılmış (normlandırılmış veya normlandırılmamış) verilerle (M,N) boyutlu \mathbf{F} matrisi oluşturulur:

$$\mathbf{F} = \begin{array}{c} \xrightarrow{\text{Zaman}} \\ \left[\begin{array}{cccc} F_1(1) & F_1(2) & \dots & F_1(N) \\ F_2(1) & F_2(2) & \dots & F_2(N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_M(1) & F_M(2) & \dots & F_M(N) \end{array} \right] \begin{array}{l} \rightarrow \mathbf{f}_1(t) \\ \rightarrow \mathbf{f}_2(t) \\ \dots \\ \rightarrow \mathbf{f}_M(t) \end{array} \end{array} \downarrow \text{Konum} \quad (3)$$

\mathbf{F} matrisinin DOF analizi ile konumsal ve zamansal ortogonal bileşenlerine ayrılması, kovaryans matrisi veya Tekil Değer Ayrışımı (TDA) yaklaşımı ile gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, DOF analizi kovaryans matrisi yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda, \mathbf{F} veri matrisi kullanılarak, \mathbf{R}_{FF} kovaryans matrisi;

$$\mathbf{R}_{FF(M,M)} = \mathbf{F}\mathbf{F}^T \quad (4)$$

eşitliği ile elde edilir. Bu matrisin açık gösterimi şöyledir:

$$\mathbf{R}_{FF} = \begin{bmatrix} \langle F_1F_1 \rangle & \langle F_1F_2 \rangle & \dots & \langle F_1F_M \rangle \\ \langle F_2F_1 \rangle & \langle F_2F_2 \rangle & \dots & \langle F_2F_M \rangle \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \langle F_MF_1 \rangle & \langle F_MF_2 \rangle & \dots & \langle F_MF_M \rangle \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada $\langle F_iF_j \rangle$, F_i ve F_j (i ve j istasyonlarındaki $F_M(t)$ değerleri) arasındaki kovaryansı göstermekte; köşegen elemanları ($\langle F_iF_i \rangle$) istasyonların varyanslarına karşılık gelmektedir:

$$\langle F_iF_j \rangle = \langle F_jF_i \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N F_i(t)F_j(t) \quad (i,j=1,\dots,M) \quad (6)$$

\mathbf{F} matrisi kare ve simetrik bir matris olmasa da, \mathbf{R}_{FF} simetrik ve kare bir matristir. Eğer \mathbf{F} matrisindeki zaman serileri standart sapmalarına bölünerek normlandırılmışsa \mathbf{R}_{FF} , korelasyon matrisi adını alır. Kovaryans matris oluşturulduktan sonra özdeğer problemi çözümlür:

$$\mathbf{R}_{FF}\mathbf{E} = \mathbf{E}\boldsymbol{\lambda} \quad (7)$$

Diğer bir deyişle \mathbf{R}_{FF} kovaryans matris, $\boldsymbol{\lambda}$ ve \mathbf{E} matrislerine ayrıştırılır.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

Burada, λ matrisi (M,M) boyutlu olup \mathbf{R}_{FF} matrisinin özdeğerlerini (λ_k) içermektedir. λ matrisinin özdeğerleri azalan bir sıradadır ($\lambda_1 > \lambda_2 \dots > \lambda_M$). \mathbf{F} veri matrisi gerçek bir matris olduğundan \mathbf{R}_{FF} kovaryans matrisi pozitif tanımlıdır; yani tüm özdeğerleri sıfırdan büyük veya sıfıra eşittir. λ matrisinin sıfırdan farklı özdeğerleri λ_k , $k = 1 \dots K$ ise λ 'nın etkin boyutu gerçekte (K,K)'dir. Bu sadece K adet DOF bileşeninin (mod) belirlenebileceği anlamına gelmektedir. Sonraki bölümlerde k indisi "mod" u gösterir. (M,M) boyutlu E kare matrisi,

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1^1 & E_1^2 & \dots & E_1^M \\ E_2^1 & E_2^2 & \dots & E_2^M \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_M^1 & E_M^2 & \dots & E_M^M \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \longrightarrow$
 $e^1 \quad e^2 \quad e^M \quad \text{özvektörler } e^k$

biçimindedir.

e^k sütun vektörleri \mathbf{R}_{FF} matrisinin ilgili λ_k özdeğerlerine karşılık gelen özvektörlerdir. λ matrisindeki her sıfırdan farklı bir λ_k özdeğeri \mathbf{E} matrisinde bir e^k sütun vektörü ile ilintilidir. Bu nedenle ayrışımında sadece K adet sıfırdan farklı özdeğere karşılık gelen özvektör kullanılır. Böylece, \mathbf{E} matrisinin etkin boyutu (M,K) olup, M istasyonları, K ise DOF ayrışımının bileşenlerini (modlarını) göstermektedir.

\mathbf{E} özvektörler matrisi, I birim matris olmak üzere $\mathbf{E}\mathbf{E}^T = \mathbf{E}^T\mathbf{E} = \mathbf{I}$ özelliğine sahiptir. Bu, özvektörlerin uzayda korelasyonsuz, yani birbirine dik (ortogonal) olduğunu göstermektedir. Her e^k özvektörü k'ncı moddaki konumsal DOF değerini gösterir (her bir vektörün boyutu, istasyon sayısı M'ye eşittir). Konumsal DOF değerleri Deneysel Ortogonal Fonksiyonlar ya da kısaca DOF'lar olarak adlandırılmaktadır. DOF'un k'nci modunun zamansal yayılımı (yani e^k 'nci modun zamanla nasıl yayıldığı), $a^k(t)$ zaman serileri ile gösterilmektedir. $a^k(t)$, $f_m(t)$ orijinal zaman serilerinin e^k özvektörleri üzerine izdüşürülmesi ve tüm M adet istasyonda (konumda) toplanması ile elde edilir:

$$a^k(t) = \sum_{m=1}^M e_m^k f_m(t) \quad (m=1, \dots, M; t=1, \dots, N) \quad (10)$$

Burada $k=1,\dots,K$ DOF modlarını göstermektedir. \mathbf{A} matrisi, \mathbf{E}^T ve \mathbf{F} matrislerinin çarpımına eşittir:

$$\mathbf{A} = \mathbf{E}^T \mathbf{F} \quad (11)$$

Burada \mathbf{E}^T matrisi (K,M) , \mathbf{F} matrisi ise (M,N) boyutludur; buna göre \mathbf{A} matrisi (K,N) boyutlu olur. \mathbf{A} matrisinin satırları N uzunluğundaki (dönüştürülmüş) zaman serileridir (N = özgün zaman serilerinin uzunluğu). Bu zaman serileri temel bileşenler (TB) olarak adlandırılmaktadır. e^k konumsal özvektörlerin uzayda ortogonal olması gibi, $a^k(t)$ temel bileşenler de zamanda ortogondur. Her bir λ_k özdeğeri k 'ncı modun \mathbf{F} veri matrisinde açıkladığı değişim ile orantılıdır. Her bir özdeğerin açıkladığı yüzde değişim aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\% \text{değişim mod } k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^K \lambda_i} 100 \quad (12)$$

\mathbf{F} veri matrisindeki $f_m(t)$ zaman serileri, konumsal DOF bileşeni (e^k) ile ona karşılık gelen a^k temel bileşeni çarpılıp ve tüm K modlarında toplanarak yeniden elde edilebilir:

$$f_m(t) = \sum_{k=1}^K e_m^k a^k(t) \quad (13)$$

Matris gösterimiyle (11)'den $\mathbf{E} \mathbf{E}^T = \mathbf{I}$ olduğundan,

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} \mathbf{A} \quad (14)$$

çıkar. DOF ayrışımının amacı \mathbf{F} veri matrisinin filtrelenmiş veya daha az gürültü içeren halini $\hat{\mathbf{F}}$ elde etmektir. Bu, $\hat{\mathbf{F}}$ veri matrisindeki $\hat{f}_m(t)$ zaman serilerinin sadece ilk H adet ($H < K$) DOF modu ile yeniden oluşturulması ile sağlanır. İlk H mod, genellikle verideki değişimin önemli bir kısmını açıklamaktadır:

$$\hat{f}_m(t) = \sum_{k=1}^H e_m^k a^k(t) \quad (15)$$

Böylece, \mathbf{F} veri matrisindeki değişimin önemli bir kısmı korunarak elde edilen $\hat{\mathbf{F}}$ matrisinde veri sayısında azalma sağlanmış olur. Kimi zaman birinci ya da birkaç DOF modu anlamlı bir fiziksel işlevi temsil etmektedir. Ancak her zaman böyle olmayabilir.

DOF modlarının göreceli önemleri, ilgili moda karşılık gelen $\hat{f}_m(t)$ zaman serisinin $f_m(t)$ orijinal zaman serisindeki değişimi temsil etme kapasiteleri ile ölçülür. Daha önce de belirtildiği gibi, her bir DOF modu kendisine karşılık gelen bir özdeğere

sahiptir. Özdeğer büyüdükçe o mod tarafından açıklanan değişim (varyans) de büyür. DOF modları azalan özdeğerlere göre sıralanır. Böylece, en büyük özdeğere sahip olan birinci mod, verideki en büyük değişimin yüzdesini açıklar. İstatistiksel ayrışımın doğasında yer alan etkinliğine bağlı olarak birkaç DOF genellikle geniş bir veri setindeki temel değişimi tanımlamaya yeterlidir. Böylece, tüm veri alanında anlamlı olmayan değişimler filtrelenmiş olur. DOF'ların anlamını yorumlarken, DOF'ların gerçek dinamik modlara ve fiziksel davranış modlarına karşılık gelmek zorunda olmadığı dikkate alınmalıdır. Genellikle, tek bir fiziksel süreç birkaç DOF moduna yayılabilir. Diğer durumlarda ise, birden fazla fiziksel süreç tek bir DOF'daki varyansa katkıda bulunabilir. DOF işleminden elde edilen istatistiksel modlar, kabul görmüş fiziksel mekanizmalar ışığında değerlendirilmelidir. Genellikle, baskın modlarda elde edilen büyük değişimler tanımlanabilir fiziksel mekanizmalara bağlanarak yorumlanmaya çalışılır.

3. MC-CLEAN V2.0 SPEKTRAL ANALİZ YAZILIMI

Spektral analiz, zaman serisindeki değişimin frekansın bir fonksiyonu olarak dağıtılmasıdır (Emery ve Thomson, 1998). Spektral analizden önce verilerden ortalama ve doğrusal trend çıkarılır. Eğer bu işlem yapılmaz ise, bu etkiler spektrumun düşük frekans bileşenlerini bozar.

Hem aylık ODS hem de Mar-SGPS zaman serilerinin DOF analizi ile elde edilen temel bileşenlerin genlik spektrumlarının hesaplanmasında Heslop ve Dekkers (2002) tarafından geliştirilen MC-CLEAN V2.0 yazılımı kullanılmıştır. MC-CLEAN V2.0 yazılımı gürültü içeren ve eşit aralıklı olmayan paleoiklimsel zaman serilerinin frekans spektrumunu belirlemek amacıyla MATLAB 5.3 yazılımı kullanılarak geliştirilmiş ve bir Grafiksel Kullanıcı Arayüzü şeklinde düzenlenmiştir. Bu yazılım, Monte Carlo simülasyonlarına dayalıdır. Yazılımda birbirinden küçük farklılıklar gösteren çok sayıda spektrum oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu spektrumlar arasındaki küçük farklar hem ortalama bir spektrum hesaplanması hem de her bir frekans zirvesi için bir güven aralığı ve tüm spektrum için bir güven düzeyi belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. MC-CLEAN V2.0 yazılımı, MATLAB programlama dilinde hazırlanmış olup, Baisch ve Bokelmann (1999) tarafından MATLAB programlama dilinde yazılmış CLEAN algoritmasının geliştirilmiş halidir. CLEAN algoritmasında zaman alanında eşit olmayan örneklemelerden kaynaklanan hataları ortadan kaldırarak temiz bir spektrum oluşturmak amacıyla frekans alanında doğrusal olmayan bir devrişim (dekonvolüsyon) uygulanmaktadır. Baisch ve Bokelmann (1999), CLEAN algoritmasını hem gürültüsüz hem de gürültülü verilerle test ederek iyi sonuçlar elde etmiş ve bu algoritmanın boşluk içeren veya geliş güzel örneklenmiş verilere uygulanabileceğini de göstermiştir. Heslop ve Dekkers (2002) ise MC-CLEAN V2.0 yazılımı ile Monte Carlo CLEAN işlemini hem gerçek hem de sentetik verilere uygulayarak;

a. Bir Monte Carlo simülasyonunda CLEAN dönüşümü kullanılmasının ortalama spektrumdaki her bir frekans değeri için güven aralığı ve tüm spektrum için ise bir anlamlılık düzeyi belirlenmesine olanak sağladığını,

b. MC-CLEAN V2.0 yazılımında kullanılan veri ayıklama (data stripping), beyaz ve kırmızı gürültü eklenmesi şeklindeki üç simülasyonun da sentetik bir paleoklimsel kayıt için tutarlı spektrumlar ürettiğini ve bunun da Monte Carlo işleminin frekans alanında kararlı sonuçlar verdiğini,

c. Monte Carlo CLEAN işleminin gürültülü paleoklimsel kayıtlardaki periyodik sinyallerin analizi için uygun olduğunu,

ç. Monte Carlo tekniği ile belirlenen anlamlılık düzeyi kullanılarak zaman alanında temizlenmiş bir sinyalin yeniden oluşturulmasının zaman serisindeki belirli periyodik bileşenlerin ayrıştırılmasını sağladığını ortaya koymuştur.

4. EN BÜYÜK OLABİLİRLİK KESTİRİMİ (EBOK) VE CATS YAZILIMI

En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK; Maximum Likelihood Estimation- MLE) yöntemi, SGPS koordinat-zaman serilerinin gürültü karakterinin analiz edilmesinde en doğru ve hassas yöntem olarak kabul edilmektedir (Zhang vd., 1997; Mao vd., 1999; Williams, 2003; Williams vd., 2004). EBOK (MLE) kullanılarak birden fazla stokastik model ile birçok parametrenin (hız, periyodik sinyaller, koordinat atımları vb.) gürültü genliklerinin aynı anda kestirilmesi mümkündür (Williams vd., 2004). EBOK ile ilgili ilk algortimalar (Langbein ve Johnson, 1997; Zhang vd., 1997; Mao vd., 1999) gürültü içeriğinin klasik beyaz gürültü veya tam sayı spektral indislerinin kullanıldığı beyaz gürültü ve kırışma gürültüsü (BG+KG) veya beyaz gürültü ve rasgele yürüyüş gürültüsü (random walk noise- RYG) (BG+RYG) birleşimlerinden oluştuğu varsayımlarına dayanmıştır. Bu şekilde belirli modellerin seçilmesinin temel nedeni, bu çalışmaların yapıldığı zamanlarda, zamanla korelasyonlu gürültüye dayalı gürültü özelliklerini tanımlayan kovaryans matrisinin genel yapısının bilinmemesidir (Williams vd., 2004). Williams vd. (2004), zamanla korelasyonlu gürültü özelliklerini tanımlayan kovaryans matrisinin genel yapısını tanımlamış ve ayrıca EBOK ile spektral indis kestirilmesine de olanak sağlamıştır. Böylece, öncül gürültü modeli hakkında herhangi bir varsayım öngörülmeden, EBOK ile koordinat-zaman serilerinin gürültü karakterini en iyi tanımlayan kesirli spektral indis belirlenebilmektedir. SGPS zaman serilerinin gürültü analizi ile ilgili bu güne kadar yapılan en kapsamlı çalışma Williams vd. (2004) tarafından gerçekleştirilmiş olup, 16 ay ile 10 yılı aşan uzunluklardaki toplam 414 farklı istasyona ilişkin dokuz farklı GPS çözümü ile elde edilen 954 SGPS koordinat-zaman serisinin gürültü içeriği EBOK yöntemiyle analiz edilmiştir. Williams vd. (2004), global GPS çözümleri ile elde edilen SGPS her üç bileşen zaman serilerindeki gürültünün en iyi beyaz gürültü (BG) ve kırışma gürültüsü (KG) birleşimi ile tanımlandığını belirterek, Zhang vd. (1997) ve Mao vd. (1999)'yi doğrulamıştır. Williams vd. (2004), SGPS istasyon hız ve hatalarının daha gerçekçi bir biçimde belirlenmesi için zamanla korelasyonlu gürültü karakterinin hesaplamalarda dikkate alınmasını ve gürültü karakterlerinin analizinde EBOK yöntemini önermektedir. Williams ve Teferle (2003)'e göre, SGPS zaman serilerinin analizinde, var olan tüm gürültü modelleri test edilmelidir. Simav vd. (2006)'de ise SGPS zaman serileri hem EKK ve hem de EBOK yöntemleri kullanılarak sırasıyla; (1) hız, (2) hız + yıllık ve yarım yıllık harmonikler ve (3) hız ve genlik spektrumundaki anlamlı tüm harmonikler ile tanımlanan üç farklı matematiksel model ve dört değişik

gürültü modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Seçenekler içerisinde, genlik spektrumundaki tüm anlamlı periyodik sinyallerin hız modeline katılması ve kesirli spektral indis gürültü modelinin kullanılması durumunda en güvenilir ve en gerçekçi istasyon hızı belirlendiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada Mar-SGPS yükseklik zaman serilerinin analizinde EBOK yöntemi, Simav vd. (2006) tarafından önerildiği şekilde genlik spektrumundaki tüm anlamlı periyodik sinyallerin hız modelinde göz önüne alındığı matematiksel model ve kesirli spektral indis gürültü modeli kullanılarak uygulanmıştır. Bu amaçla Williams (2005) tarafından “C” programlama dilinde geliştirilen CATS (Create and Analyse Time Series) yazılımı kullanılmıştır. CATS, zaman serilerine (örneğin SGPS zaman serileri) çok parametrelili bir modeli ağırlıklı EKK ile EBOK yöntemini kullanarak uygulayan ve aynı zamanda zaman serisindeki gürültünün tipini ve büyüklüğünü hesaplayabilen bir yazılımdır. Bu yazılım ile parametreler, doğrusal ve doğrusal olmayan kısımlar olmak üzere iki aşamada kestirilir. Doğrusal kısım; hız, koordinat atımları (örneğin depremlerden kaynaklanan) ve bilinen periyodik terimleri (örneğin yıllık etki) içermektedir. Doğrusal olmayan kısım ise çeşitli gürültü modellerindeki parametrelerin hesaplanmasında kullanılır. Yazılım ile ilgili ayrıntılı bilgi Williams (2005)’de bulunabilir.

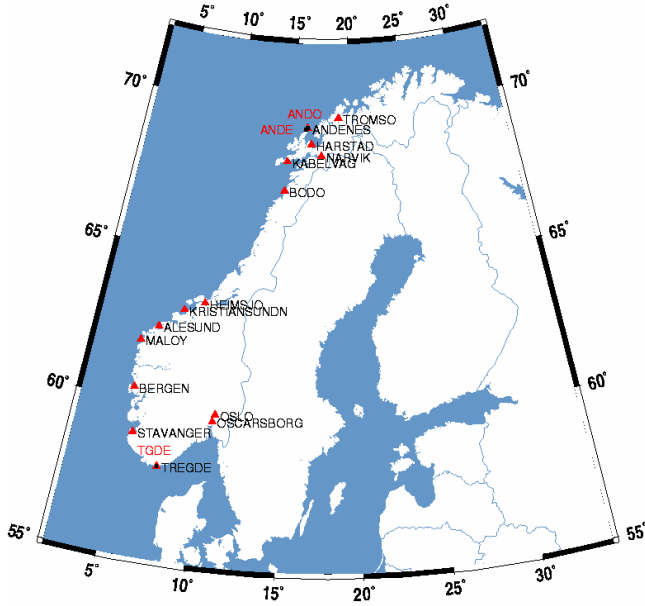
5. UYGULAMA

İstasyonların yoğun dağılımı, verilerin doğruluğu, uzunluğu ve güvenilirliği açısından uygulama alanı olarak Norveç kıyıları seçilmiştir. Bu bölgede bulunan ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarındaki uzun dönemli mutlak deniz seviyesi değişimleri, mareograf ve Mar-SGPS (ANDE, ANDO ve TGDE) istasyonları yükseklik zaman serilerinin analiziyle araştırılmıştır.

a. 1-10 Yıl ve Daha Uzun Süreli Deniz Seviyesi Değişimlerinin Araştırılması

ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarındaki göreceli ortalama deniz seviyesi trendini belirleme doğruluğunu etkileyen 1-10 yıl ve daha uzun süreli değişimlerin konumsal ve zamansal karakterini ortaya çıkarmak amacıyla, Norveç kıyılarına dağılmış 14 mareograf istasyonunun 1953-2001 dönemindeki trend ve mevsimsel etkileri çıkarılmış aylık ODS verilerine, DOF ve spektral analiz yöntemleri uygulanmıştır. Norveç kıyılarındaki, 1953-2001 döneminde kesintisiz aylık ODS verisi olan RLR (Revised Local Reference) kategorisindeki 14 mareograf istasyonu ve ANDENES mareograf istasyonu aylık ODS verileri Ortalama Deniz Seviyesi Sürekli Servisi’nden (Permanent Service for Mean Sea Level-PSMSL) temin edilmiştir (Woodworth ve Player, 2003). Mareograf istasyonlarının konumları Şekil 1’de gösterilmektedir.

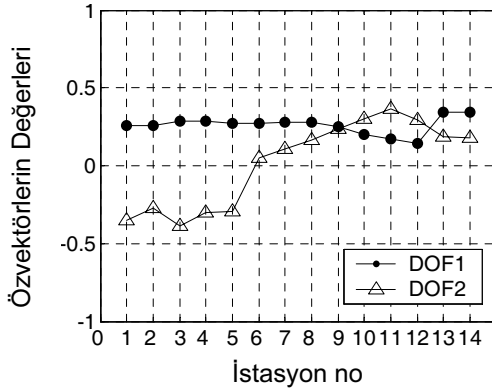
DOF analizinde kovaryans matris yaklaşımı uygulanmıştır. Aylık ODS verilerinin DOF analizinde her bir DOF modunun temsil ettiği değişimler Tablo 1’de verilmektedir. İlk iki DOF modu ile ilintili konumsal özvektörün istasyonlara göre dağılımı Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 1. Norveç kıyılarındaki, 1953-2001 döneminde ortak verisi olan 14 mareograf istasyonu, ANDENES mareograf istasyonu ve ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS istasyonları. Şekilde kırmızı renkli üçgenler mareograf istasyonlarını, siyah renkli küçük kareler ise Mar-SGPS istasyonlarını göstermektedir.

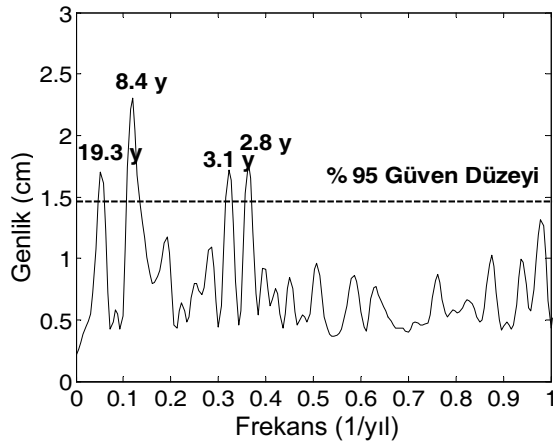
Tablo 1. Aylık ODS verilerinin DOF analizinde her bir DOF modunun temsil ettiği değişimler.

DOF mod no	Varyans (%)	DOF mod no	Varyans (%)
1	74.7	8	1.1
2	10.0	9	0.9
3	3.6	10	0.8
4	2.8	11	0.6
5	1.8	12	0.5
6	1.4	13	0.4
7	1.2	14	0.3

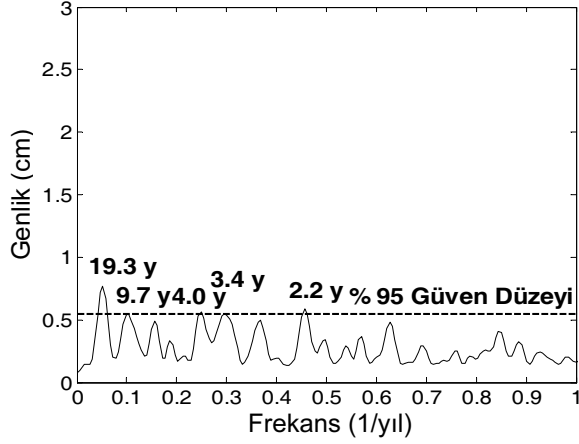


Şekil 2. İlk iki konumsal özvektör.

Birinci konumsal özvektörün 14 mareograf istasyonunda da hemen hemen birbirine eşit değerler alması, tüm mareograf istasyonlarında 1-10 yıl ve daha uzun süreli deniz seviyesi değişimlerinin benzer karakterde olduğunu göstermektedir. Bu periyotlu değişimlerin % 10'luk kısmını temsil eden ikinci konumsal özvektör değerleri ise belirgin olarak, Norveç'in kuzey kıyılarından güney kıyılarına doğru bir artış göstermektedir. Bu farklılığın Norveç'in kuzey ve güneyindeki 1-10 yıl ve daha uzun dönemli deniz seviyesi değişimlerini etkileyen meteorolojik, oşinografik, hidrolojik vb. etkenlerin farklı karakterde olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Birinci temel bileşen, 1-10 yıl ve daha uzun süreli deniz seviyesi değişimlerinin yaklaşık ± 30 cm'lik, ikinci temel bileşen ise yaklaşık ± 10 cm'lik kısmını temsil etmektedir. Birinci ve ikinci temel bileşenlerdeki anlamlı frekansları belirlemek amacıyla, MC-CLEAN V2.0 yazılımı ile 1000 iterasyonlu Monte Carlo simülasyonu uygulanarak genlik spektrumları hesaplanmıştır. Birinci ve ikinci temel bileşenlerin genlik spektrumlarının 1-10 yıl ve daha uzun periyotları kapsayan frekansları (0-1 1/yıl) sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmektedir.



Şekil 3. Birinci temel bileşenin genlik spektrumu.



Şekil 4. İkinci temel bileşenin genlik spektrumu.

Genlik spektrumları iki kısımdan oluşmaktadır: siyah çizgi ortalama spektrumu, spektrumu kesen kesikli siyah çizgi ise tüm frekanslar için % 95 güven düzeyini göstermektedir. Bu nedenle, sadece kesikli siyah çizginin üzerindeki frekanslar % 95 güven düzeyinde anlamlıdır. Birinci temel bileşen için 2.8, 3.1, 8.4 ve 19.3 yıllık, ikinci temel bileşen için 2.2, 3.4, 4.0, 9.7 ve 19.3 yıllık periyodu olan sinyaller % 95 güven düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Söz konusu sinyallerin genlikleri, frekans ve periyotları ile karşılaştırmalı olarak Tablo 2’de verilmektedir. Tablo 2’deki 8.4 yıl periyotlu sinyalin, 8.8 yıl periyotlu Ay Yerberi (Lunar Perigee), 19.3 yıl periyotlu sinyalin ise 18.6 yıl periyodu olan Ay Düşüm Noktası (Lunar Nodal) gelgitinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Tablo 2. Norveç kıyılarında aylık deniz seviyesi ölçülerindeki % 95 Güven düzeyinde anlamlı bulunan 1-10 yıl ve daha uzun periyotlu sinyaller.

Sinyal 1/yıl	1953-2001 Genlik		Periyod yıl	Düşünceler
	Birinci Temel Bileşen (mm)	İkinci Temel Bileşen (mm)		
0.45	-	6	2.2	-
0.36	18	-	2.8	-
0.32	17	-	3.1	-
0.29	-	5	3.4	-
0.25	-	6	4.0	-
0.12	23	-	8.4	Ay Yerberi (Lunar Perigee) gelgiti (8.8 yıl)
0.10	-	5	9.7	-
0.0052	17	8	19.3	Ay Düşüm Noktası (Lunar Nodal) gelgiti (18.6 yıl)

b. Uzun dönemli görelı ODS trendlerinin belirlenmesi

Uzun dönemli görelı ortalama deniz seviyesi trendleri, yerel (yerel kara çökmesi vb.) ya da bölgesel yer kabuğu hareketleri, meteorolojik parametrelerdeki (atmosferik basınç, sıcaklık ve rüzgar etkileri) doğrusal değişimler, okyanus akıntıları ve deniz suyu yoğunluğundaki doğrusal değişimler ile global deniz seviyesi trendlerinin birleşiminden oluşmaktadır (Woodworth, 1987). Bu çalışmada, meteorolojik ve oşinografik parametreler harmonik analiz modeline katılmamıştır.

ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarına ait aylık ODS verilerinin harmonik analizi ile bu istasyonlardaki görelı deniz seviyesi trendleri hesaplanmıştır. Bu analizde,

$$h_i = Z_0 + at_i + \sum_{j=1}^N A_j \cos(\omega_j t_i - \theta_j) \quad (16)$$

matematiksel modeli kullanılmıştır. Burada h_i , t_i 'nci aya ilişkin ortalama deniz seviyesi değeri; t_i , başlangıç epoğundan itibaren geçen ay sayısı ($i=1,2,\dots,M$); a , aylık doğrusal trend (mm/ay); Z_0 , ortalama deniz seviyesi (ODS); N , modelde kullanılan anlamlı gelgit bileşenlerinin toplam sayısı; A_j , ω_j ve θ_j ise j 'nci gelgit bileşeninin sırasıyla genliği, frekansı ve faz açısıdır.

Spektral analiz ile birinci ve ikinci temel bileşen zaman serilerinde % 95 güven düzeyinde anlamlı bulunan ve Tablo 2'de verilen 1-10 yıl ve daha uzun periyotlu sinyallerin frekansları ile 12 ve 6 aylık mevsimsel etkilerin frekansları harmonik analizde bilinen olarak alınmış ve ODS, ODS trendi ve harmonik bileşenlerin katsayıları En Küçük Kareler (EKK) ile hesaplanmıştır (Nakiboğlu ve Demir, 2002). Uyuşumsuz ölçüleri belirlemek için Tau test yöntemi uygulanmıştır (Pope, 1976). Tüm bilinmeyenler, Şanlı ve Blewitt (2001)'deki doğrusal regresyon modelindeki gelgit katsayılarının anlamlılık testine benzer bir biçimde anlamlılık testine (t-testi) tabi tutulmuştur. Bilinmeyen olarak her bir sinyal için alınan iki katsayıdan en az biri anlamlı bulunmuş ise o sinyalin anlamlı, aksi durumda anlamsız olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm analizlerde istatistiksel güven düzeyi % 95 alınmıştır.

ANDENES mareograf istasyonunda 1938-2001 döneminde ODS'nin 2.04 ± 0.19 mm/yıl hızla karaya göre yükseldiği belirlenmiş, TREGDE mareograf istasyonunda ise 1935-2001 döneminde -0.03 ± 0.11 mm/yıl büyüklüğünde ve anlamlı olmayan bir ODS trendi belirlenmiştir.

c. Mar-SGPS istasyonu verilerinin analizi

ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarında uzun dönemli mutlak deniz seviyesi değişimlerini belirlemek amacıyla, Avrupa Deniz Seviyesi Servisi (European Sea Level Service-ESEAS) SGPS istasyonları ağına ait üç adet Mar-SGPS noktasının düşey koordinat (yükseklik) zaman serileri analiz edilmiştir. Bu istasyonlar, Kuzey Norveç'teki ANDENES mareograf istasyonu binasının üzerine monte edilen ANDE ve bu istasyonun 7 km uzağındaki ANDO istasyonları ile Güney Norveç'teki

TREGDE mareograf istasyonu binasının hemen yanına yerleştirilen TGDE istasyonudur. Sözü edilen Mar-SGPS yükseklik zaman serileri, Harita Genel Komutanlığı'nca ESEAS-RI projesi kapsamında gerçekleştirilen SGPS veri analizi çalışmasından elde edilmiştir. Mar-SGPS istasyonlarındaki GPS ölçüleri Uluslararası GPS Servisinin (IGS) ürünleri kullanılarak GAMIT V.10.1 yazılımı (King ve Bock, 2003) ile değerlendirilmiştir. Harita Genel Komutanlığı tarafından ESEAS-RI projesi kapsamında Mar-SGPS verilerinin GAMIT/GLOBK yazılımı ile değerlendirilmesinde kullanılan stratejiler Kierulf ve Plag (2004) ve Cingöz vd. (2005)'de ayrıntılı olarak verilmiştir. GAMIT yazılımı ile günlük çözümler gevşek zorlamalı olarak elde edilmektedir. Bu nedenle, günlük çözümlerin güvenilir, hassas ve tüm dünyada geçerli bir referans sistemine dayandırılması gerekmektedir. GLOBK yazılımı V.5.08 (Herring, 2003) kullanılarak her güne ait gevşek zorlamalı GPS çözümleri, Avrupa'da seçilen 9 adet IGS noktasının GPS verisi ve Uluslararası Yersel Referans Ağı 2000'deki (ITRF2000) koordinatları kullanılarak üç boyutlu dönüşüm ile koordinat zaman serilerine dönüştürülmüştür. 9 adet IGS istasyonu ile ANDO, ANDE ve TGDE Mar-SGPS istasyonları koordinat zaman serilerinin ağırlıklı karesel ortalama hataları (Weighted Root Mean Square- WRMS) Tablo 3'de verilmektedir. WRMS hesabında, doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır.

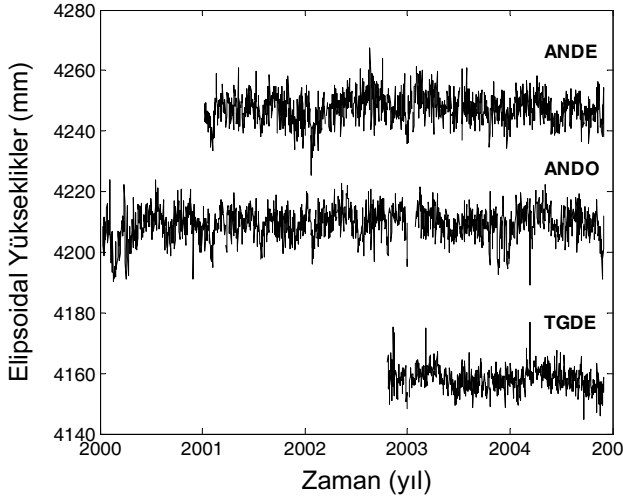
Tablo 3. IGS ve Mar-SGPS istasyonları Kuzey (K), Doğu (D) ve Yükseklik (Y) zaman serilerinin ağırlıklı karesel ortalama hataları (WRMS).

SGPS	Türü	WRMS (mm)		
		K	D	Y
VILL	IGS	1.1	1.2	5.2
TRO1	IGS	2.1	3.0	4.3
GRAZ	IGS	1.0	1.4	3.5
POTS	IGS	0.9	1.1	3.3
WTZR	IGS	1.1	1.4	3.1
ONSA	IGS	1.0	1.3	3.7
NYA1	IGS	1.0	0.9	5.9
GRAS	IGS	1.2	1.6	3.4
MATE	IGS	1.2	1.4	4.2
ANDO	Mar-SGPS	1.7	2.9	5.1
ANDE	Mar-SGPS	4.1	2.9	4.8
TGDE	Mar-SGPS	1.3	1.5	3.6

ç. Mar-SGPS yükseklik zaman serilerinin DOF ve spektral analizi

SGPS istasyonlarında hızların güvenilir olarak belirlenmesi için en az 2.5 yıllık veriye ihtiyaç duyulmaktadır (Blewitt ve Lavallée, 2002). ANDE, ANDO ve TGDE SGPS istasyonlarında sırasıyla yaklaşık 4, 5 ve 2 yıl uzunluğunda veri mevcut olup, söz konusu istasyonlara ilişkin yükseklik zaman serileri Şekil 5'de verilmektedir. Bu istasyonların yükseklik zaman serileri, mareograf aylık ODS ölçülerinin analizine benzer bir biçimde, DOF ve spektral analiz yöntemleri ile analiz edilerek istatistiksel olarak anlamlı periyodik sinyaller belirlenmiştir. DOF analizinden önce verilerdeki bu döneme ilişkin trendler doğrusal regresyon analizi ile çıkarılmıştır. DOF analizinde

DOF modlarının verilerdeki toplam değişimi temsil etme oranları Tablo 4’de verilmektedir.

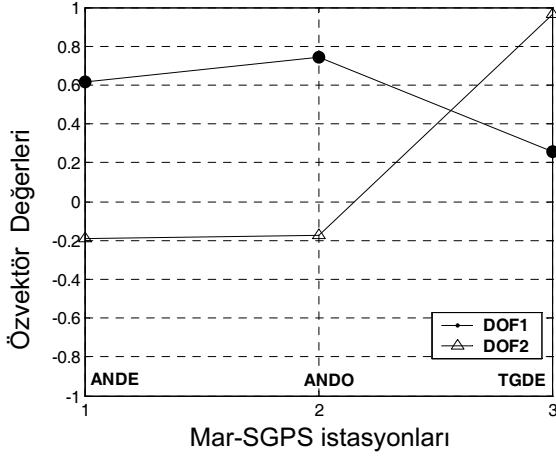


Şekil 5. ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS yükseklik zaman serileri. Üç istasyonu aynı şekil üzerinde gösterebilmek için zaman serileri düşey yönde kaydırılmıştır.

Tablo 4. Mar-SGPS verilerinin DOF analizinde DOF modlarının verilerdeki toplam değişimi temsil etme oranları.

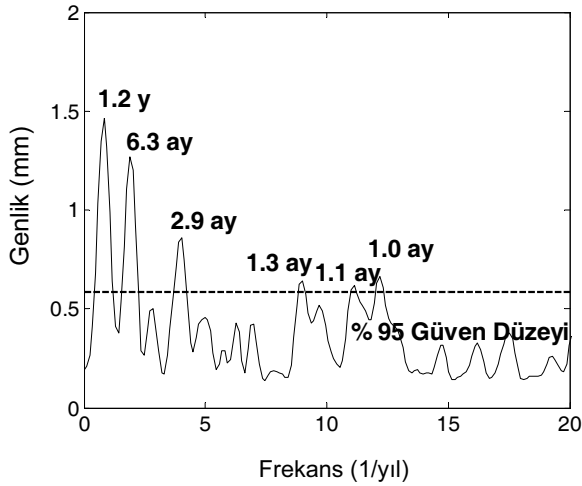
DOF mod No.	Değişim (%)
1	62.6
2	20.1
3	17.3

İlk iki konumsal özvektörün Mar-SGPS istasyonlarına dağılımı Şekil 6’da gösterilmektedir. İlk iki DOF modu, üç istasyonun yükseklik zaman serilerindeki periyodik değişimlerin genel karakterini büyük ölçüde temsil etmektedir. Şekil 6 incelendiğinde, birinci konumsal özvektörün ANDE ve ANDO’da birbirine oldukça yakın değerler aldığı, TGDE’nin ise bu iki istasyondan daha küçük bir değer aldığı görülmektedir. Birinci özvektörün üç istasyonda da pozitif değerler alması, üç istasyon arasında dikkate değer bir konumsal korelasyon olduğunu göstermektedir.

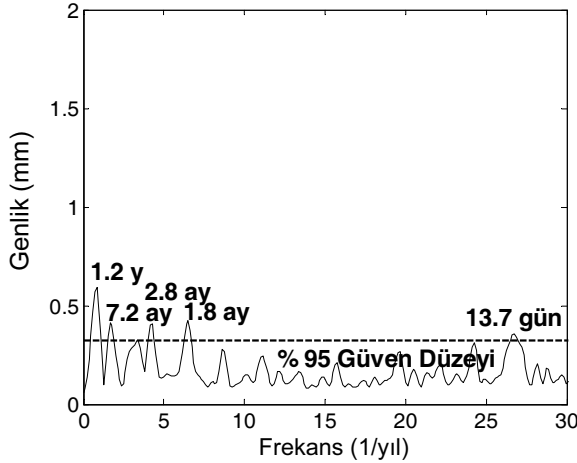


Şekil 6. İlk iki konumsal özvektör.

SGPS yükseklik zaman serilerindeki değişimin, yaklaşık ± 10 mm kısmı birinci temel bileşen, yaklaşık ± 5 mm lik kısmı ikinci temel bileşen ile açıklanmaktadır. DOF analiziyle elde edilen birinci ve ikinci temel bileşenlerin MC-CLEAN V2.0 yazılımı ile hesaplanan genlik spektrumları sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Birinci temel bileşende 1.2 yıl, 6.3, 2.9, 1.3, 1.1 ve 1.0 ay; ikinci temel bileşende 1.2 yıl, 7.2, 2.8 ve 1.8 ay ve 13.7 gün periyotlu sinyaller anlamlı bulunmuştur. Birinci ve ikinci temel bileşenlerde bulunan 1.2 yıllık (~438 günlük) etki, Calais (1999) tarafından belirlenen 450 günlük periyotlu etki ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 7. Birinci temel bileşenin genlik spektrumu.



Şekil 8. İkinci temel bileşenin genlik spektrumu.

DOF analizi ile yükseklik zaman serilerindeki sadece 2002.81-2004.92 ortak veri dönemine ilişkin belirgin periyodik değişimler belirlenmiştir. TGDE, ANDE ve ANDO Mar-SGPS istasyonları yükseklik zaman serileri yaklaşık 2, 4 ve 5 yıl uzunlukta olduğundan, her birinin spektrumları ayrı ayrı hesaplanmıştır. ANDO için sırasıyla genliği 1 ve 1.2 mm olan 4.4 yıl ve 1.8 yıl ve genlikleri 0.57-1.54 mm arasında değişen 11.2, 9.0, 7.3, 5.7, 4.6, 3.5, 2.9, 2.1, 1.9, 1.7, 1.3, 1.1, 1.0, 0.94 ve 0.91 ay periyotlu sinyaller anlamlı bulunmuştur. ANDE için genliği 1.2 mm olan 3.1 yıl, genlikleri 0.64-1.46 mm arasında değişen 10.4, 5.9, 4.6, 2.9, 2.1, 1.9 ay ve 25 gün periyotlu sinyaller anlamlı görülmüştür. TGDE için ise genliği 1.75 mm olan 1.2 yıl, genlikleri 0.66-1.00 mm arasında değişen 6, 4.2, 1.9 ay ve 15, 13 gün periyotlu sinyaller anlamlı çıkmıştır. SGPS zaman serilerinde Blewitt ve Lavall'ee (2002)'de, IGS ağında yapılan incelemelerde GPS zaman serilerinin belirgin olarak yıllık periyodik sinyal içerdikleri belirlenmiş ve bu sinyalin genel olarak atmosferik, hidrolojik yükleme etkilerinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Dong vd. (2002) tarafından ise söz konusu yıllık sinyalin nedenleri olarak kutup gelgiti, okyanus gelgitleri, atmosferik kütle, gelgit dışındaki okyanus kütlesi, kar kütlesi, toprak nemi, kayaların ısınmadan kaynaklanan genleşmesi, yörünge, faz merkezi, troposfer modellerindeki hatalar, ağ dengelenmesindeki hatalar ve farklı yazılımlar kullanılmasından kaynaklanan hatalar gösterilmiştir. Ancak, ANDE, ANDO ve TGDE SGPS yükseklik zaman serilerinde bulunan, periyotları 13 gün ile 4.4 yıl arasında değişen yıllık sinyal dışındaki diğer sinyallerin Teferle (2003), Calais 1999 ve Schernek vd (2002) tarafından belirtildiği gibi referans sisteminin tanımlanması, modellenmemiş yer merkezi değişimleri, hassas efemeris bilgisi, uydu yörüngeleri, GPS ölçeğindeki değişimler, atmosferik gecikme ve istasyon tesisinden kaynaklanan hatalar ile multipath veya anten faz merkezi değişiklikleri gibi istasyona özgü hatalardan ve modellenmemiş ya da yanlış modellenmiş katı yer gelgitlerinden ve yüklenme etkilerinden (okyanus gelgiti, atmosferik basınç, hidrolojik ve fırtına dalgası yüklenmeleri) bir veya birkaçı nedeniyle oluşabileceği düşünülmektedir. Ancak, söz konusu periyodik sinyallerin nedenlerinin belirlenmesi için ek çalışmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir.

d. Mar-SGPS yükseklik zaman serileriyle düşey hızların belirlenmesi

ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS istasyonlarındaki düşey hızları belirlemek amacıyla, daha önce aylık ODS verilerine (16) eşitliği ile uygulanan EKK yöntemi ile harmonik analiz modeli Mar-SGPS yükseklik zaman serilerine de uygulanmıştır. Spektral analizde anlamlı bulunan frekanslar modele bilinmeyen olarak katılmıştır. Bilinmeyen olarak alınan her bir sinyale ilişkin iki katsayının istatistiksel analizi, verilerdeki uyumsuz ölçülerin ayıklanması ve bilinmeyen parametrelerin anlamlılık testi (t-testi) aylık ODS verilerinin analizine benzer biçimde gerçekleştirilmiştir. Spektral analizle belirlenen periyodik sinyallerin tamamı harmonik analiz sonucunda anlamlı bulunmuştur. EKK yöntemi ile sırasıyla TGDE ve ANDE Mar-SGPS için -0.280 ± 0.200 mm/yıl ve -0.024 ± 0.098 mm/yıl büyüklüğünde anlamsız hız değerleri elde edilmiş; ANDO Mar-SGPS'ye ilişkin hız değeri anlamlı çıkmış, buna göre ANDO Mar-SGPS istasyonunun 0.40 ± 0.10 mm/yıl olarak yükseldiği belirlenmiştir (Yıldız, 2005; Yıldız ve Deniz, 2006).

SGPS zaman serilerinin zamanla korelasyonlu (renkli) gürültü içerdiği (Williams, 2003) göz önüne alınarak Mar-SGPS yükseklik zaman serilerine ilişkin hızlar, EBOK yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu amaçla, Simav vd. (2006) tarafından önerildiği şekilde genlik spektrumundaki tüm anlamlı periyodik sinyallerin hız modeline katıldığı matematiksel model ve kesirli spektral indis gürültü modeli kullanılmıştır. EBOK yöntemi ile sırasıyla TGDE için -0.28 ± 0.41 mm/yıl ve ANDE için -0.005 ± 0.27 mm/yıl büyüklüğünde anlamsız hızlar bulunmuştur. ANDO için ise 0.43 ± 0.30 mm/yıl büyüklüğünde anlamlı bir yükselme belirlenmiştir. EBOK yöntemi ile yapılan hız hesaplamalarında EKK yöntemi ile hemen hemen aynı hızlar bulunmuş, ancak hız hataları EKK yöntemine göre 2-3 kat daha büyük çıkmıştır.

e. Uzun Dönemli Mutlak Deniz Seviyesi Değişimlerinin Belirlenmesi

TREGDE mareograf istasyonunda ise 1935-2001 döneminde -0.03 ± 0.11 mm/yıl büyüklüğünde ve anlamlı olmayan bir görece ODS trendi belirlenmiştir. Peltier (2001) tarafından belirlenen Buzulsal İzostatik Dengelenme (Glacial Isostatic Adjustment-GIA) ICE4G (VM2) modeline göre Buzul Sonrası Etki (BSE) (Post Glacial Rebound-PGR) nedeniyle bu istasyonda belirlenen 0.79 mm/yıl hızla kara yükselmesi, TGDE Mar-SGPS istasyonunda anlamlı bir düşey kabuk hareketi olmadığı bulgusu ile çelişmektedir. Bu uyumsuzluğun bir nedeni olarak yaklaşık 2 yıl uzunluğunda zaman serisi olan bu istasyonun Blewitt ve Lavallée (2002) tarafından önerilen 2.5 yıl uzunluğu tam olarak sağlamaması gösterilebilir. Bu nedenle TGDE Mar-SGPS istasyonunda daha fazla (> 2.5 yıl) zaman serisi oluşması durumunda benzer analizlerle istasyonda istatistiksel olarak anlamlı hız belirlenebileceği düşünülmektedir.

ANDENES mareograf istasyonunda 1938-2001 döneminde ODS, 2.04 ± 0.19 mm/yıl hızla karaya göre yükselmektedir. ANDENES mareograf istasyonunun hemen yanında bulunan ANDE Mar-SGPS istasyonunda anlamlı bir mutlak düşey hız bulunmazken, ANDENES mareograf istasyonuna yaklaşık 7 km uzaklıkta bulunan ANDO Mar-SGPS istasyonu 0.43 ± 0.30 mm/yıl hızla mutlak olarak yükselmektedir.

Bu sonuç Peltier (2001) tarafından ANDENES mareografı için belirlenen 0.89 mm/yıl kara yükselmesi ile genel olarak uyumludur. ANDENES mareograf istasyonundaki 2.04 ± 0.19 mm/yıl görelî ODS trendi ile ANDO Mar-SGPS istasyonunun mutlak düşey hareketi (0.43 ± 0.30 mm/yıl) birleştirilerek, ANDENES mareograf istasyonunda uzun dönemli mutlak deniz seviyesinin 2.47 ± 0.36 mm/yıl hızla yükseldiği belirlenmiştir. Bu değer, Şanlı ve Blewitt (2001) tarafından İngiltere'deki North Shields mareograf istasyonunda sırasıyla Mareograf + GPS ve duyarlı geometrik nivelman ölçüleri ile belirlenen 3.2 ± 1.5 mm/yıl ve 2.6 ± 1.0 mm/yıl mutlak deniz seviyesi değişimleri ile uyumludur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Test alanı olarak seçilen Norveç kıyılarındaki ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarındaki uzun dönemli mutlak deniz seviyesi değişimleri, mareograf ve ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS istasyonları yükseklik zaman serileri analiz edilerek belirlenmiştir. Hem uzun dönemli deniz seviyesi hem de Mar-SGPS yükseklik zaman serisi doğrusal trendleri, EKK kullanılarak harmonik analiz yöntemiyle hesaplanmıştır. TREGDE mareograf istasyonunda ise 1935-2001 döneminde -0.03 ± 0.11 mm/yıl büyüklüğünde ve anlamlı olmayan bir görelî ODS trendi belirlenmiştir. ANDENES mareograf istasyonunda 1938-2001 döneminde ODS'ni 2.04 ± 0.19 mm/yıl hızla karaya göre yükseldiği belirlenmiştir. TGDE ve ANDE'de anlamlı mutlak düşey hareketler bulunmazken, ANDO SGPS istasyonunun mutlak düşey hızı 0.43 ± 0.30 mm/yıl dır. Bu sonuç, Peltier (2001) tarafından geliştirilen Buzul Sonrası Etki modeliyle belirlenen 0.89 mm/yıl kara yükselmesi ile genel olarak uyumludur. ANDO SGPS istasyonunun mutlak düşey hızı, görelî ODS trendi ile birleştirilerek ANDENES mareograf istasyonunda uzun dönemli mutlak deniz seviyesinin 2.47 ± 0.36 mm/yıl hızla yükseldiği belirlenmiştir. Bu sonuç Şanlı ve Blewitt (2001) tarafından verilen mutlak deniz seviyesi değişimleri ve literatürde 1-3 mm/yıl düzeyinde verilen global deniz seviyesi değişimleri ile uyumludur.

Bu çalışmada kullanılan DOF ve spektral analiz yöntemlerinin, Türkiye'deki aylık mareograf ODS ve Mar-SGPS verilerine uygulanabileceği ve böylece ülkemiz kıyılarındaki 1-10 yıl ve daha uzun dönemli deniz seviyesi değişimleri ile Mar-SGPS yükseklik zaman serilerindeki periyodik değişimlerin konumsal ve zamansal karakterinin ortaya çıkarılabileceği, anlamlı sinyallerin hız ile birlikte modellenmesiyle uzun dönemli görelî ve mutlak ODS değişimlerinin daha yüksek bir doğrulukla belirlenebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, Mar-SGPS istasyonlarının düşey hızları ise hem EKK hem de EBOK yöntemleri ile hesaplanmıştır. EBOK yöntemi ile yapılan hız hesaplamalarında EKK yöntemi ile hemen hemen aynı hızlar bulunmuş, ancak hız hataları EKK yöntemine göre 2-3 kat daha büyük çıkmıştır. Türkiye'de bulunan Mar-SGPS koordinat zaman serilerinin analizinde EBOK yöntemi kullanılmasının Mar-SGPS istasyonları düşey hızlarının daha gerçekçi bir hata ile belirlenmesi açısından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Buzul sonrası erime sonucu deniz sularının yeniden dağılımı sadece buzulların eridiği kuzey bölgeleri (İskandinavya, Kanada ve İskoçya) değil, daha düşük enlemdeki bölgeleri de etkilemektedir. Lambeck ve Johnston (1995)'te Akdeniz

kıyılarında buzul sonrası erime nedeniyle karalarda bir çökme (ya da deniz seviyesinde yükselme) hareketi görüldüğüne değinilmekte ve Ege kıyıları için bu çökme ~ 0.5 mm/yıl olarak verilmektedir. Peltier (2001)'de ise Türkiye'den sadece Antalya-II mareograf istasyonu için kestirim yapılmış ve bu istasyonda 0.11 mm/yıl büyüklüğünde bir kara çökmesi kestirilmiştir. BSE (PGR) değeri hesaplayan modeller sürekli olarak yeni veri setleri ile geliştirilmektedir. Yeni BSE modelleri izlenerek ülkemiz kıyılarındaki mutlak deniz seviyesi değişimleri belirlenirken BSE etkisinin de dikkate alınmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Baisch, S. ve Bokelmann, G.H.R.**, 1999, Spectral analysis with incomplete time series: an example from seismology, *Computers and Geosciences*, 25, 739-750.
- Barnett, T.P.**, 1983, Recent Changes in Sea Level and Their Possible Causes, *Climatic Change*, 5, 15-38.
- Bevis, M., Scherer, W. ve Merrifield, M.**, 2002, Technical issues and recommendations related to the installation of continuous GPS stations at tide gauges. *Marine Geodesy*, 25, 1, 87-99.
- Blewitt, G. ve Lavall'ee, D.**, 2002, Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research*, 107, B7, ETG9-1/9-11, DOI:10.1029/2001JB000570.
- Calais, E.**, 1999, Continuous GPS measurements across the Western Alps, 1996-1998, *Geophysical Journal International*, 138 (1), 221-230.
- Carter, W. E., Aubrey, D. G., Baker, T. F., Boucher, C., LeProvost, C., Pugh, D., Peltier, W. R., Zumberge, M., Rapp, R. H., Schutz, R. E., Emery, K. O., Enfield, D. B.**, 1989, Geodetic fixing of tide gauge benchmarks, Technical Report, WHOI-89-31, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts.
- Carter, W. E.**, 1994, Report of the Surrey Workshop of the IAPSO tide gauge bench mark fixing committee, NOAA Technical Report, NOSOES0006, Institute of Oceanographic Sciences, Deacon Laboratory, Surrey, UK.
- Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D. ve Woodworth P.L.**, 2001, Changes in sea level, in J.T. Houghton, Y. Ding, D.J Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden and D. Xiaou (eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, 639-694, Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Church, J. A. ve White, N. J.**, 2006, A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826.
- Cingöz, A., Yıldız, H. ve Demir, C.**, 2005, Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) Mareograf-GPS Noktalarında 1992-2003 Dönemindeki Tekrarlı GPS Ölçülerinin Değerlendirilmesi, JEOFNIV-1-2005 nolu Teknik Rapor, 23 sayfa, Jeodezi Dairesi Başkanlığı, Harita Genel Komutanlığı.
- Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M. K., Miyazaki, S.**, 2002, Anatomy of apparent seasonal variations from GPS derived site position time series, *Journal of Geophysical Research*, 107 (B4), 1-16.

- Douglas B.C.**, 1991, Global sea level rise, *Journal of Geophysical Research*, 96, C4, 6981-6992.
- Emery W.J. ve Thomson, R.E.**, 1998, *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, 634, Pergamon, Elsevier, Newyork.
- Herring, T.A.**, 2003, GAMIT/GLOBK Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program, Version 5.08, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Heslop, D., Dekkers, M.J.**, 2002, Spectral analysis of unevenly spaced climatic time series using CLEAN: signal recovery and derivation of significance levels using a Monte Carlo simulation, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 130, 103-116.
- Kierulf, H. P. ve Plag, H. P.**, 2004, ESEAS CGPS Processing Strategy Determination of High Accuracy Vertical Velocities, Report No: ESEAS-NMA-T2.1-D2.1A, January 12.
- King R.W. ve Bock, Y.**, 2003, Documentation for the GAMIT analysis software release V.10.1, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Lambeck, K, and Johnston, P.**, 1995, Land subsidence and sea-level change: contributions from the melting of the last great ice sheets and the isostatic adjustment of the Earth, *Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence*, The Hague, The Netherlands, October 1995, 3-18.
- Langbein, J., and Johnson, H.**, 1997, Correlated errors in geodetic time series: Implications for time dependent deformation, *Journal of Geophysical Research*, 102, 591-604.
- Mao, A., Harrison, C. G. A., Dixon, T. H.**, 1999, Noise in GPS coordinate time series, *Journal of Geophysical Research*, **104 (B2)**, 2797-2818.
- Nakiboğlu M. ve Demir C.**, 2002, Dengeleme Hesabı Cilt I, Harita Genel Komutanlığı, Harita Yüksek Teknik Okulu Komutanlığı, Ankara.
- Neilan, R. E., Van Scoy, P. A., Woodworth, P. L.**, 1997, Methods for monitoring sea level: GPS and tide gauge benchmark monitoring and altimeter calibration, IGS Workshop Proceedings, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.
- Peltier, W. R.**, 2001, ICE-4G (VM2) glacial isostatic adjustment corrections in Douglas, B. C., Kearney, M. S., Leatherman, S. P., eds, *Sea Level Rise History and Consequences*, International Geophysics Serie, 75, Academic Press, San Diego.
- Plag H.P., ed.**, 2002, Description of Work, European Sea Level Service Research Infrastructure (ESEAS-RI), 95, Project No: EVR1-2001-00042.
- Pope, Allen J.**, 1976, *The Statistics of Residuals and The Detection of Outliers*, NOAA Technical Report, NOS65, NS1.
- Preisendorfer, R.W.**, 1988, *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography*, *Developments in Atmospheric Science*, 17, Elsevier, Amsterdam.
- Scherneck, H. G., Johansson, J. M., Elgered, G., Davis, J. L., Jonsson, B., Hedling, G., Koivula, H., Ollikainen, M., Poutanen, M., Vermeer, M., Mitrovica, J. X., Milne, G. A.**, 2002, BIFROST: Observing the three-dimensional deformation of Fennoscandia, in *Ice Sheets Sea Level and the Dynamic Earth*, pp. 69-93, Eds. Mitrovica, J. X., Vermeersen, B. L. A., Washington, D.C., USA.

- Shennan, I. ve Woodworth, P.L.**, 1992, A Comparison of late Holocene and twentieth-century sea level trends from the UK and North Sea region, *Geophysical Journal International*, 109, 96-105.
- Simav, Ö., Demir, C., Simav, M., Yıldız, H.**, 2006, Sabit GPS İstasyonları Koordinat Zaman Serilerinin Analizi, *Harita Dergisi*, Sayı 136, 1-15.
- Şanlı, D.U. ve Blewitt, G.**, 2001, Geocentric sea level trend using GPS and >100-yr tide gauge record on a post glacial rebound nodal line, *Journal of Geophysical Research*, 106, B1, 713-719.
- Şanlı, D.U.**, 2002, GPS Zaman Serilerinin Analizi ve Türkiye İçin Değerlendirmeler, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) 2002 Yılı Bilimsel Toplantısı, Tektonik ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, İznik, 10-12 Ekim, s. 216-225.
- Teferle, F.N.**, 2003, Strategies for long-term monitoring of tide gauges using GPS, PhD thesis, Faculty of Engineering: School of Civil Engineering: Engineering, Surveying and Space Geodesy, University of Nottingham.
- Williams, S.D.P.**, 2003, 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., Teferle, F.N.**, 2003, ESEAS CGPS Coordinate Time Series Analysis Strategy, Technical Report, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, University of Nottingham, Nottingham, UK.
- 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, 1-19.
- Williams, S.D.P.**, 2005, Create and Analyse Time Series: CATS software V3.0 Beta, 11 pages.
- Woodworth, P.L.**, 1987, Trends in U.K. Mean Sea Level, *Marine Geodesy*, 11, 57-87.
- Woodworth, P.L., Tsimplis, M.N., Flather, R.A. ve Shennan, I.**, 1999, A Review of the trends observed in British Isles mean sea level data measured by tide gauges, *Geophysics Journal International*, 136, 651-670.
- Woodworth, P. L. ve Player R. J.**, 2003, "The Permanent Service for Mean Sea Level: an update to the 21st Century." *Journal of Coastal Research*, 19(2): 287-295.
- Yıldız, H.**, 2005, Mareograf ve Sabit GPS Verileri ile Uzun Dönemli Mutlak Deniz Seviyesi Değişimlerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kasım 2005, İstanbul, 92 sayfa.
- Yıldız, H. ve Deniz, R.**, 2006, Mareograf ve Sabit GPS ile Uzun Dönemli Mutlak Deniz Seviyesi Değişimleri, *İTÜ Dergisi/d – Mühendislik*, Cilt:5, Sayı:3, Kısım:1, 115-125.
- Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H. O., Fang, P., Williams, S. D. P., 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.