

# Mareograf ve Sabit GPS ile uzun dönemli mutlak deniz seviyesi değişimleri

Hasan YILDIZ\*, Rasim DENİZ

İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

Norveç kıyılarındaki ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarındaki uzun dönemli mutlak deniz seviyesi değişimleri mareograf ve Sabit GPS zaman serilerinin analizi ile araştırılmıştır. Aylık ortalama deniz seviyesi ile Sabit GPS yükseklik zaman serilerindeki periyodik sinyallerin konumsal ve zamansal karakteri Deneysel Ortogonal Fonksiyon ve spektral analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Hem mareograf hem de Sabit GPS yükseklik zaman serisi doğrusal trendleri En Küçük Karelerle harmonik analiz yöntemiyle hesaplanmıştır. TREGDE'de anlamlı bir deniz seviyesi trendi bulunmazken, ANDENES mareograf istasyonunda uzun dönemli mutlak deniz seviyesinin  $2.44 \pm 0.21$  mm/yıl hızla yükseldiği belirlenmiştir. Bu değer literatürdeki 1-3 mm/yıl düzeyindeki global deniz seviyesi değişimleri ile uyumludur.

**Anahtar Kelimeler:** Mutlak deniz seviyesi, Sabit GPS, Deneysel Ortogonal Fonksiyon analizi, Spektral analiz.

## Long term absolute sea level changes by tide gauge and continuous GPS data

### Abstract

Long term absolute sea level changes at ANDENES and TREGDE tide gauges at Norwegian coasts are investigated by the analysis of the tide gauge and Continuous GPS time series. The spatial and temporal character of interannual to interdecadal sea level variations in tide gauge monthly mean sea level data and periodic signals in Continuous GPS height time series are determined by using Empirical Orthogonal Function and spectral analysis methods. The linear trends of both tide gauge and Continuous GPS height time series are calculated by harmonic analysis method with Least Squares Estimation. While no significant relative sea level trend is found at TREGDE,  $2.04 \pm 0.19$  mm/year is found at ANDENES. While no significant absolute vertical movement is determined at TGDE and ANDE, the absolute vertical velocity of ANDO Continuous GPS station is  $0.40 \pm 0.10$  mm/year and generally agrees with 0.89 mm/year land uplift determined by a Post Glacial Rebound model. The absolute sea level at ANDENES tide gauge is determined to be rising with a rate of  $2.44 \pm 0.21$  mm/year by combining the vertical velocity of ANDE Continuous GPS station with the relative sea level trend. This value is consistent with the global sea level rise estimates which is in the order of 1-3 mm/year.

**Keywords:** Absolute sea level, Continuous GPS, Empirical Orthogonal Function analysis, Spectral analysis.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hasan YILDIZ. hyildiz@hgk.mil.tr; Tel: (312) 595 22 47.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Mareograf ve Sabit GPS verileri ile uzun dönemli mutlak deniz seviyesi değişimlerinin araştırılması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 23.11.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 19.12.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Hükümetler arası İklim Değişimi Örgütü (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) tarafından; global deniz seviyesinin, geçen yüzyılda 10-20 cm yükseldiği ve bu yükselişin büyük bir kısmının global ısınmadan kaynaklandığı değerlendirilmekte ve 2100 yılında 40-60 cm daha yükseleceği tahmin edilmektedir (Houghton vd., 1995). 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.

Uzun dönemli deniz seviyesi değişimlerinin güvenilir ve yüksek doğrulukta belirlenmesi için uzun süreli deniz seviyesi verilerine gereksinim duyulur. Doğrusal deniz seviyesi trendinin; 0.5 mm/yıl'lık bir hata ile belirlenmesi için 30 yıllık, 0.3 mm/yıllık bir hata ile belirlenmesi için ise 50 yıllık veri gerekmektedir (Douglas, 1991; Shennan ve Woodworth, 1992). Veri uzunluğundaki bu kısıtlamalar, mareograf ölçülerindeki 1-10 yıl ve daha uzun süreli değişimlerden kaynaklanmaktadır. 1-10 yıl ve daha uzun süreli değişimler, meteorolojik etkiler, derin okyanustaki ve kıyı dolaşımındaki değişimler (Woodworth vd., 1999) ve hidrolojik döngüdeki su kaynaklarındaki uzun dönemli kütle değişimleri (Plag, 2002) nedeniyle oluşur.

Mareograf istasyonları, deniz seviyesi ile karadaki bir jeodezik nokta (mareograf röper noktası-Mar-RN) arasındaki görelî yükseklik farkını ölçmektedir. Deniz seviyesinin bir yer merkezci datuma göre konumu mutlak (yer merkezci) deniz seviyesi ve bunun zamana bağlı değişimi ise mutlak deniz seviyesi değişimi olarak adlandırılır. Kara parçasının yada 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 görelî deniz seviyesi değişimi denir. Mareograf istasyonları ile görelî deniz seviyesi ölçülmektedir. Eğer, sabit GPS (SGPS) (veya farklı uydu jeodezisi tekniği) ile

mareograf istasyonlarındaki düşey kabuk hareketleri belirlenirse, görelî deniz seviyesi değişimleri mutlak deniz seviyesi değişimlerine dönüştürülebilir.

Bu çalışmada, istasyonların yoğun dağılımı, verilerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından test alanı olarak seçilen Norveç kıyılarındaki ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarındaki uzun dönemli mutlak deniz seviyesi değişimleri mareograf ve SGPS verileri kullanılarak araştırılmıştır. Ancak, ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonunun yanındaki Mareograf SGPS (Mar-SGPS) istasyonları ile mareograf istasyonları arasında tekrarlı duyarlı geometrik nivelman ölçüleri mevcut olmadığından, mareograf istasyonları ile Mar-SGPS istasyonları arasında görelî bir düşey hareket olmadığı varsayılmıştır.

## Veri analiz yöntemleri

### Deneysel Ortogonal Fonksiyon analizi

Deneysel Ortogonal Fonksiyon (DOF) analizi, zaman serilerinde yer alan değişik periyotlu sinyalleri gürültüden ayırmak ve birden fazla istasyona ait zaman serilerindeki ortak davranışı ortaya çıkarmak amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Temel Bileşenler Analiz (TBA) olarak da bilinen bu yöntem her türlü zaman ve konum serisine uygulanabilir. Bu yöntemin temel faydası, konumsal olarak dağılmış istasyon zaman serileri arasındaki fiziksel ilişkiyi daha özlü bir şekilde ortaya çıkarmasıdır. 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 ko-varyans matrisi oluşturulur ve kovaryans matrisi özdeğer ve özvektörlerine ayrıştırılır. İkincisinde ise; kovaryans matrisi oluşturulmadan Tekil Değer Ayrışımı (TDA) tekniği ile özdeğerler, özvektörler ve zamansal vektörler (temel bileşenler) elde edilir. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar aynıdır. Bu yöntem, Barnett (1983) ve Preisendorfer (1988)'de de ayrıntılı

olarak açıklanmış olup, yöntemin deniz seviyesi ölçülerine uygulanması aşağıda anlatılmaktadır:

Aylık ortalama deniz seviyesi (ODS) değerlerinin;  $m = 1 \dots M$  adet mareograf istasyonunda ve  $t=1 \dots N$  zamanlarındaki değerleri  $\psi_m(t)$  ile gösterilsin.  $\psi_m(t)$ ,  $N$  uzunluğunda  $M$  adet zaman serisini ifade etmektedir. Tüm  $M$  adet zaman serisi için; başlangıç ( $t=1$ ) ve bitiş ( $t=N$ ) zamanı aynı olmalıdır. Mareograf istasyonları deniz seviyesi ölçülerinin zaman boyutu genellikle istasyon sayısından daha fazladır. SGPS ölçüleri vb. veri setleri için de aynı durum söz konusudur. Bu nedenle, burada, DOF analizi, zaman adımı sayısı istasyon sayısından daha büyük olduğu durumlar ( $N > M$ ) için anlatılmıştır. Eğer bir istasyona ait verilerin varyansı diğerlerine göre önemli ölçüde büyük ise, bu diğer istasyonları etkileyecek ve DOF analizinde bu istasyonun değişimi baskın olarak ortaya çıkacaktır. Böylesi durumları önlemek amacıyla 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 deniz seviyesi ölçülerindeki doğrusal trendi,  $\sigma_m$  ise doğrusal trendi ve mevsimsel etkileri çıkartılmış verinin standart sapmasını ifade etmektedir ve,

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

olarak elde edilir. Verilerden trend ve mevsimsel etkilerin çıkarılmasından sonra, DOF analizi için, verilerden  $M \times N$  boyutunda bir  $F$  matrisi oluşturulur.  $F$  matrisi,  $M$  satır ( $m$  istasyon) ve  $N$  sütun ( $t$  zaman) olacak şekilde normlandırılmış veya normlandırılmamış zaman serilerinden oluşur :

$$F = \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Zaman}} \\ \left[ \begin{array}{cccc} F_1(1) & F_1(2) & \dots & F_1(N) \\ F_2(1) & F_2(2) & \dots & F_2(N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_M(1) & F_M(2) & \dots & F_M(N) \end{array} \right] \\ \downarrow \text{Konum} \end{matrix} \quad (3)$$

$F$  matrisinin DOF yöntemi ile konumsal ve zamansal ortogonal bileşenlerine ayrılması; kovaryans matrisi veya Tekil Değer Ayrışımı (TDA) yaklaşımı ile gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, DOF analizinde ko-varyans matrisi yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda,  $R_{FF}$  ko-varyans matrisi,  $F$  veri matrisi kullanılarak,

$$R_{FF} = (F * F^T)_{M \times M} \quad (4)$$

eşitliği ile elde edilir. Bu matrisin açık bir şekilde ifadesi,

$$R_{FF} = \begin{bmatrix} \langle F_1 F_1 \rangle & \langle F_1 F_2 \rangle & \dots & \langle F_1 F_M \rangle \\ \langle F_2 F_1 \rangle & \langle F_2 F_2 \rangle & \dots & \langle F_2 F_M \rangle \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \langle F_M F_1 \rangle & \langle F_M F_2 \rangle & \dots & \langle F_M F_M \rangle \end{bmatrix} \quad (5)$$

şeklinindedir. Burada  $\langle F_i F_j \rangle$ ;  $F_i$  ve  $F_j$  ( $i$  ve  $j$  istasyonlarındaki  $F_m(t)$  değerleri) arasındaki ko-varyansı ifade etmekte olup,  $R_{FF}$  kovaryans matrisinin köşegen elemanları, ilgili istasyonun varyansına karşılık gelmektedir.

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

$F$ , matrisi kare ve simetrik bir matris olmasa da,  $R_{FF}$  matrisi simetrik ve kare bir matristir.  $R_{FF}$  matrisinin boyutu  $M \times M$ 'dir. Eğer  $F$  matrisindeki zaman serileri standart sapmalarına bölünerek normlandırılır ise,  $R_{FF}$  matrisi korelasyon matrisi olur. Kovaryans matrisi oluşturulduktan sonra özdeğer problemi çözülür:

$$R_{FF} * E = E * \lambda \quad (7)$$

$R_{FF}$  kovaryans matrisi,  $\lambda$  ve  $E$  matrislerine ayrıştırılır. Burada,  $\lambda$  matrisi,

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

olarak tanımlanır,  $M \times M$  boyutlu olup  $R_{FF}$  matrisinin özdeğerlerini ( $\lambda_k$ ) içermektedir.  $\lambda$  matrisinin özdeğerleri azalan bir sıradadır ve böylece  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_M$  olur. Aynı zamanda  $F$  veri matrisi gerçek bir matris olduğundan,  $R_{FF}$  kovaryans matrisi pozitif tanımlıdır, yani tüm özdeğerleri sıfırdan büyük veya sıfıra eşittir.  $\lambda$  matrisinin boyutları  $M \times M$  olmasına rağmen, genellikle ilk  $K$  ( $K \leq \min(N, M)$ ) özdeğer  $\lambda_k, k = 1 \dots K$  sıfırdan farklıdır. Bu nedenle,  $\lambda$ 'nın etkin boyutu gerçekte  $K \times K$ 'dir. Bu sadece  $K$  adet DOF bileşeninin (mod) belirlenebileceğini ifade etmektedir. Devam eden bölümlerde  $k$  indeksi "mod"u ifade edecektir. Kare matris  $E$ ,  $M \times M$  boyutundadır.

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

$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$   
 $E^1 \quad E^2 \quad E^3 \longrightarrow$  özvektörler  $E^k$

$E^k$  sütun vektörleri  $R_{FF}$  matrisinin ilgili  $\lambda_k$  özdeğerlerine karşılık gelen özvektörlerdir.  $\lambda$  matrisindeki herbir sıfırdan farklı  $\lambda_k$  özdeğeri  $E$  matrisinde bir  $E^k$  sütun vektörü ile ilintilidir. Bu nedenle ayrışmada sadece  $K$  adet sıfırdan farklı özdeğere karşılık gelen özvektör kullanılır. Böylece,  $E$  matrisinin etkin boyutu  $M \times K$ 'dir.  $M$  istasyonları,  $K$  ise DOF ayrışımının bileşenlerini (modlarını) ifade etmektedir.

$E$  özvektörler matrisi,  $I$  birim matris olmak üzere  $E^k E^k{}^T = E^k{}^T E^k = I$  özelliğine sahiptir. Bu, özvektörlerin uzayda korelasyonsuz yani birbirine ortogonal olduğunu göstermektedir. Herbir  $E^k$  özvektörü  $k$ 'nci moddaki konumsal DOF değerini ifade eder (her bir vektör  $M$  boyutundadır.  $M$ , istasyon sayısıdır). 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 :

$$A^k(t) = \sum_{m=1}^M E_m^k F_m(t) \quad (10)$$

burada  $m=1 \dots M$  konumları (istasyonları),  $t=1 \dots N$  zaman adımlarını,  $k=1 \dots K$  ise DOF modlarını ifade etmektedir. Matris gösteriminde  $A$  matrisi  $E^T$  ve  $F$  matrislerinin çarpımı ile,

$$A = E^T * F \quad (11)$$

olarak bulunur. Burada  $E^T$  ( $E$ 'nin tranzpozesi) matrisi  $K \times M$ ,  $F$  matrisi ise  $M \times N$  boyutundadır, dolayısıyla  $A$  matrisi  $K \times N$  boyutunda olur.  $A$  matrisindeki satırlar  $N$  uzunluğunda zaman serileridir ( $N$ : orijinal zaman serilerinin uzunluğu). Bu zaman serileri temel bileşenler olarak adlandırılmaktadır.  $E^k$  konumsal bileşenlerin uzayda ortogonal olması gibi, temel bileşenler de zamanda ortogondur. Her bir  $\lambda_k$  özdeğeri  $k$ 'nci modun  $F$  veri matrisinde açıkladığı varyans ile orantılıdır. Her bir özdeğerin açıkladığı yüzde varyans aşağıdaki gibi hesaplanır :

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

$F$  veri matrisi, konumsal DOF bileşeni ( $E^k$ ) ile ona karşılık gelen  $A_k$  temel bileşeni çarpılarak ve tüm  $K$  modlarında toplanarak yeniden oluşturulabilir :

$$F_m(t) = \sum_{k=1}^K E_m^k A^k(t) \quad (13)$$

matris gösterimi ile;

$$F = E * A \quad (14)$$

olur.  $E$  matrisi,  $M \times K$  boyutunda ve  $A$  matrisi  $K \times N$  boyutunda olur. DOF ayrışımının amacı  $F$

veri matrisinin sıkıştırılmış veya daha az gürültü içeren halini elde etmektir. Bu F veri matrisinin sadece ilk H adet DOF modu ile  $H < K$  olacak şekilde yeniden oluşturması ile mümkün olur.

İlk H mod genellikle verinin varyansının önemli bir kısmını açıklamaktadır :

$$\hat{F}_m(t) = \sum_{k=1}^H E_m^k A^k(t) \quad (15)$$

Böylece, F veri matrisindeki varyansın önemli bir kısmı korunarak, veri sayısında azalma sağlanacaktır. Kimi zaman ilk yada birkaç DOF modu anlamlı bir fiziksel işlevi temsil etmektedir, ancak her zaman böyle olmayabilir.

DOF modlarının göreceli önemleri,  $F_m^{(i)}$  matrisinin toplam varyansını (değişimini) açıklama kapasiteleri ile ölçülür. Daha önce de belirtildiği gibi, her bir DOF modu kendisine karşılık gelen bir özdeğere sahiptir. Özdeğer büyüdükçe o mod tarafından açıklanan varyans da büyür. DOF modları azalan özdeğerlere göre sıralanır. Böylece, en büyük özdeğere sahip olan birinci mod, verideki en büyük varyans yüzdesini açıklar. İstatistiksel ayrışımın doğasında yer alan etkinliğine bağlı olarak birkaç DOF genellikle geniş bir veri setindeki temel değişimi tanımlamaya yeterlidir. Böylelikle, 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 yayılır. Diğer durumlarda, birden fazla fiziksel süreç tek bir DOF'daki varyansa katkıda bulunabilir. DOF işleminden elde edilen istatistik modlar, kabul görmüş fiziksel mekanizmalar ışığında değerlendirilmelidir. Genellikle, baskın modlarda elde edilen büyük değişimler tanımlanabilir fiziksel mekanizmalara bağlanır.

### Spektral analiz

Spektral analiz, zaman serisindeki varyansının frekansın bir fonksiyonu olarak dağıtılmasıdır (Emery ve Thomson, 1998). Spektral analizden önce verilerden ortalama ve trend çıkarılır. Eğer

bu yapılmaz ise, bunlar spektrumun düşük frekans bileşenlerini bozar.

Bu çalışmada, DOF analizi ile elde edilen temel bileşenlerin spektrumlarının hesaplanmasında Heslop ve Dekkers (2001) 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 üzere geliştirilmiştir. Bu yazılım, Monte Carlo simülasyonlarına dayalıdır. Çok sayıda birbirinden küçük farklılıklar gösteren spektrumlar yaratılır. Yaratılan bu spektrumlar arasındaki küçük farklar, ortalama bir spektrum hesabı ile hem her bir frekans zirvesi için güven aralığı hem de tüm spektrum için bir güven düzeyi belirlenmesi için kullanılır. 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 örneklemeden kaynaklanan hataları ortadan kaldırarak temiz bir spektrum oluşturmak amacıyla frekans alanında doğrusal olmayan bir devrişim (dekonvolüsyon) uygulanır. Baisch ve Bokelmann (1999), CLEAN algoritmasını hem gürültüsüz hem de gürültülü veri üzerinde test ederek iyi sonuç verdiğini ortaya çıkarmış ve bu algoritmanın boşluk içermeyen veya geliş güzel örneklenmiş verilerle yapılan uygulamalarda da faydalı sonuçlar verdiği sonucuna varmıştır.

### Test alanında sayısal uygulama ve bulgular

İstasyonların yoğun dağılımı, verilerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından 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 kullanılarak araştırılmıştır.

### Aylık ODS verilerindeki 1-10 yıl ve daha uzun süreli değişimlerin araştırılması

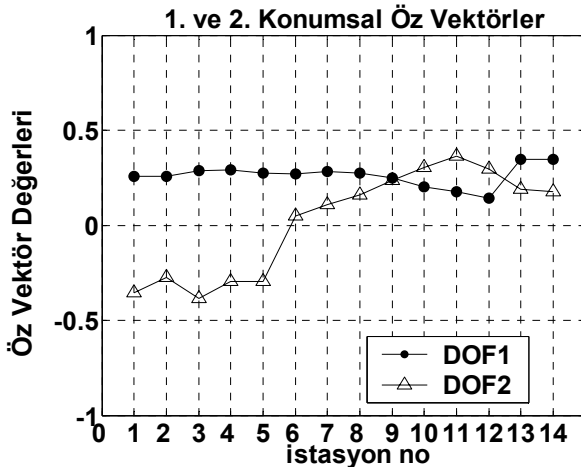
ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarındaki göreceli deniz seviyesi trendlerini belirleme doğruluğunu etkileyen 1-10 yıl ve daha uzun süreli değişimlerin konumsal ve zamansal ka-

rakterini ortaya çıkarmak amacıyla, Norveç kıyılarına dağılmış 14 mareograf istasyonunun 1953-2001 dönemindeki doğrusal trendi ve mevsimsel etkileri çıkarılmış aylık ODS verilerine, DOF ve spektral analiz yöntemleri uygulanmıştır. DOF analizinde, kovaryans matrisi yaklaşımı kullanılmıştır. Aylık ODS verilerinin DOF analizinde her bir DOF modu tarafından açıklanan varyanslar Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Aylık ODS verilerinin DOF analizinde her bir DOF modunun açıkladığı varyanslar

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

İlk iki DOF modu ile ilintili konumsal öz vektörün istasyonlara göre dağılımı Şekil 1’de gösterilmektedir.

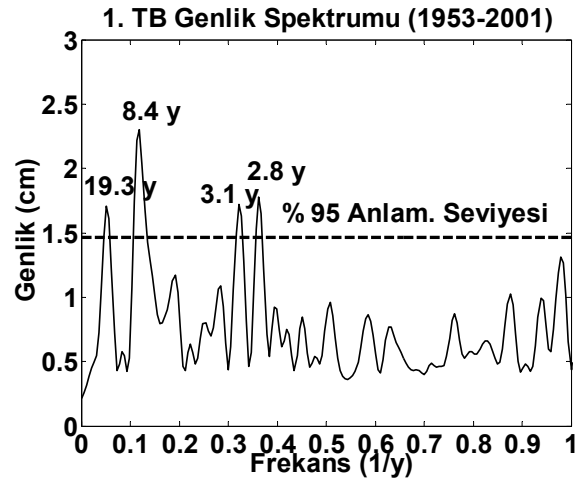


Şekil 1. İlk iki konumsal öz vektör

Birinci konumsal öz vektörün 14 mareograf istasyonunda da hemen hemen birbirine eşit değerler alması, tüm mareograf istasyonlarının 1-10 yıl ve daha uzun süreli deniz seviyesi değişimlerinin benzer karakterde olduğunu göstermektedir. Norveç kıyılarındaki 1-10 yıl ve daha

uzun süreli deniz seviyesi değişimlerinin % 10’luk kısmını açıklayan ikinci konumsal öz vektör 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 kaynaklandığı düşünülmektedir. 1. TB, 1-10 yıl ve daha uzun süreli deniz seviyesi değişimlerinin yaklaşık  $\pm 30$  cm’lik, 2. TB ise yaklaşık  $\pm 10$  cm’lik kısmını açıklamaktadır.

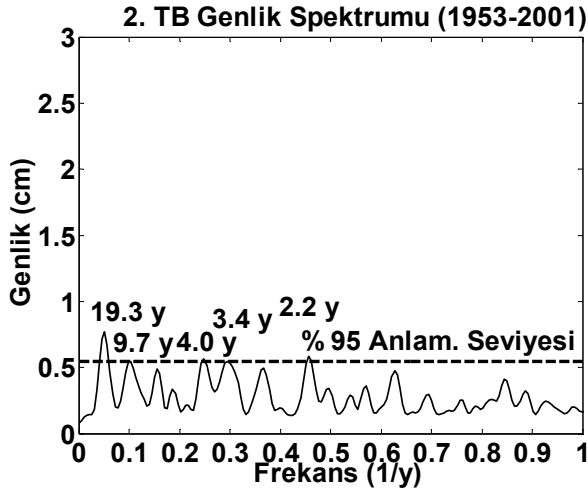
1. ve 2. TB’lerdeki anlamlı frekansları belirlemek amacıyla, MC-CLEAN V2.0 yazılımı ile 1000 iterasyonlu Monte Carlo simülasyonu uygulanarak genlik spektrumları hesaplanmıştır. 1. ve 2. TB’lerin genlik spektrumlarının 1-10 yıl ve daha uzun periyotları kapsayan [0-1] 1/y arası frekansları sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3’de verilmektedir.



Şekil 2. 1. TB’nin genlik spektrumu

Spektrumlar iki kısımdan oluşmaktadır: siyah çizgi ortalama spektrumu vermekte olup, spektrumu kesen kesikli siyah çizgi ise tüm frekanslar için %95 anlamlılık seviyesini göstermektedir, bu nedenle, sadece kesikli siyah çizginin üzerindeki frekanslar %95 seviyesinde anlamlıdır.

Birinci TB için 2.8, 3.1, 8.4 ve 19.3 yıllık, ikinci TB için 2.2, 3.4, 4.0, 9.7 ve 19.3 yıllık periyodu olan sinyaller %95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı bulunmuştur.



Şekil 3. 2. TB'nin genlik spektrumu

### ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarında uzun dönemli görel ODS trendlerinin belirlenmesi

Uzun dönemli görel deniz seviyesi doğrusal 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 yükseliş trendinin birleşiminden oluşmaktadır (Woodworth, 1987). Bu çalışmada, meteorolojik ve oşinografik parametreler mevcut olmadığından harmonik analiz modeline dahil edilmemiştir.

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

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

eşitliği ile verilen matematiksel model kullanılmıştır. Burada;  $h_i$   $t_i$  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,  $A_j$ ,  $\omega_j$  ve  $\theta_j$  ise  $j$ . gelgit bileşeninin sırasıyla genliği, frekansı ve faz açısıdır.

Spektral analiz ile 1. ve 2. TB zaman serilerinde % 95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı bulunan frekanslar 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). Uyşumsuz ölçüleri belirlemek için  $1-\alpha = 0.95$  istatistiksel güven düzeyinde Tau test yöntemi uygulanmıştır (Pope, 1976). Tüm bilinmeyenler, Şanlı ve Blewitt (2001)'deki doğrusal regresyon modelindeki gelgit katsayılarının anlamlılık testine benzer bir biçimde,  $1-\alpha=0.95$  istatistiksel güven düzeyinde anlamlılık testine (t-testi) tabi tutulmuştur. Bilinmeyen olarak her bir sinyal için iki katsayı alınmış, katsayılardan en az birisi %95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı olarak bulunmuş ise o sinyalin anlamlı, aksi taktirde anlamsız olduğu sonucuna varılmıştır.

Aylık ODS verilerinin harmonik analiziyle, ANDENES mareograf istasyonunda 1938-2001 döneminde  $2.04 \pm 0.19$  mm/yıl hızla yükselen bir görel ODS trendi bulunurken, TREGDE mareograf istasyonunda 1935-2001 döneminde % 95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı bir ODS trendi belirlenmemiştir.

### 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. Söz konusu, Mar-SGPS yükseklik zaman serileri, Harita Genel Komutanlığı (HGK)'nce 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. HGK tarafın-

dan ESEAS-RI projesi kapsamında Mar-SGPS verilerini GAMIT/GLOBK yazılımı ile değerlendirme çalışmalarında kullanılan stratejiler Kierulf ve Plag (2004) ve Cingöz ve diğerleri (2005)'de ayrıntılı olarak ifade edilmiştir.

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 GAMIT ile her gün için elde edilen gevşek zorlamalı GPS çözümleri, Avrupa'da seçilen 9 adet IGS noktasına ait GPS verisi ve Uluslararası Yersel Referans Ağı 2000 (ITRF2000)'deki 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 2'de verilmektedir. WRMS hesabında, doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır.

Tablo 2. IGS ve Mar-SGPS istasyonları Kuzey (K), Doğu (D) ve Yükseklik (Y) zaman serilerinin ağırlıklı karesel ortalama hataları (WRMS)

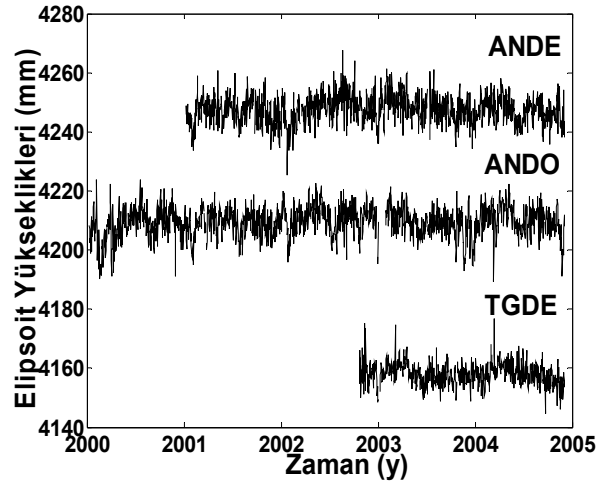
SGPS	Türü	WRMS (mm)		
		K	D	Y
VILL	IGS	1.1	1.2	5.2
TRO1	IGS	2.1	3.0	4.3
GRAZ	IGS	1.0	1.4	3.5
POTS	IGS	0.9	1.1	3.3
WTZR	IGS	1.1	1.4	3.1
ONSA	IGS	1.0	1.3	3.7
NYA1	IGS	1.0	0.9	5.9
GRAS	IGS	1.2	1.6	3.4
MATE	IGS	1.2	1.4	4.2
ANDO	Mar-SGPS	1.7	2.9	5.1
ANDE	Mar-SGPS	4.1	2.9	4.8
TGDE	Mar-SGPS	1.3	1.5	3.6

### Mar-SGPS yükseklik zaman serilerinin DOF ve spektral analizi

SGPS istasyonlarında hızların güvenilir olarak belirlenmesi için en az 2.5 yıllık veriye ihtiyaç

bulunmaktadır (Blewitt ve Lavallée, 2002). ANDE, ANDO ve TGDE SGPS istasyonlarında sırasıyla yaklaşık 4, 5 ve 2 yıl uzunluğunda yükseklik zaman serisi mevcut olup, söz konusu istasyonlara ilişkin yükseklik zaman serileri Şekil 4'te gösterilmektedir.

ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS istasyonları yükseklik zaman serileri, mareograf aylık ODS ölçülerininin analizine benzer bir biçimde, DOF ve spektral analiz yöntemleri ile analiz edilerek SGPS yükseklik zaman serilerindeki istatistiksel olarak anlamlı periyodik değişimler belirlenmiştir.



Şekil 4. ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS yükseklik zaman serileri. Üç istasyonu aynı şekil üzerinde gösterebilmek için zaman serileri düşey yönde kaydırılmıştır

ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS istasyonlarının 2002.8068-2004.9194 dönemine ait yükseklik zaman serilerindeki belirgin periyodik değişimleri ortaya çıkarmak için DOF analizi uygulanmıştır.

DOF analizinden önce verilerdeki bu döneme ilişkin trendler doğrusal regresyon analizi ile çıkarılmıştır. DOF analizinde açıklanan varyanslar Tablo 3'te verilmektedir.

İlk iki konumsal özvektörün Mar-SGPS istasyonlarına dağılımı Şekil 5'te gösterilmektedir. İlk iki DOF modunun üç istasyonun yükseklik zaman serilerindeki periyodik değişimlerin ge-

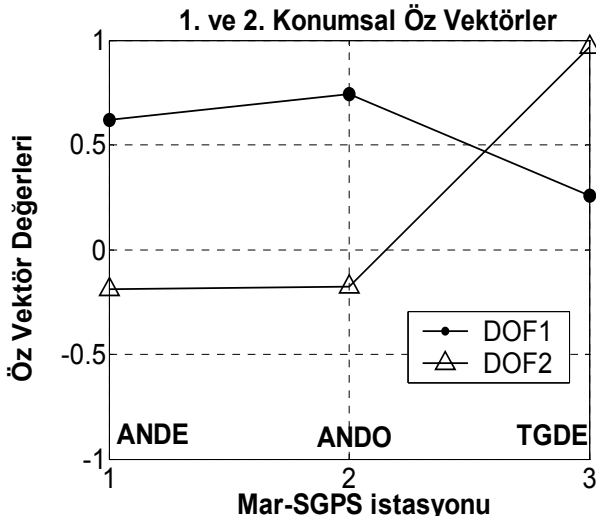


nel karakterini büyük ölçüde temsil ettiği değerlendirilmektedir.

Tablo 3. Mar-SGPS verilerinin DOF analizinde açıklanan varyanslar

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

Şekil 5 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 istasyon da da pozitif değerler alması, üç istasyon arasında dikkate değer bir konumsal korelasyon olduğunu göstermektedir.

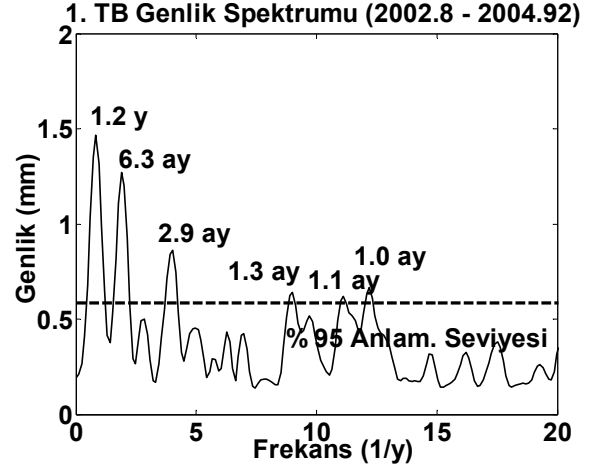


Şekil 5. İlk iki konumsal özvektör

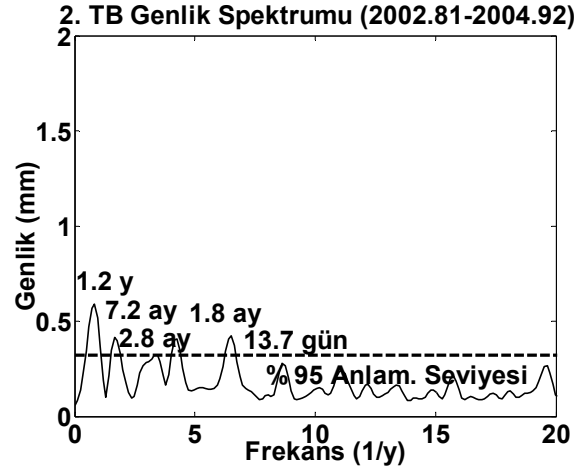
1. TB SGPS yükseklik zaman serilerindeki değişimin yaklaşık  $\pm 10$  mm kısmını ve 2. TB ise SGPS yükseklik zaman serilerindeki değişimin yaklaşık  $\pm 5$  mm lik kısmını açıklamaktadır.

Yükseklik zaman serilerinin DOF analiziyle elde edilen 1. ve 2. TB’lerin MC-CLEAN V2.0 yazılımı ile hesaplanan genlik spektrumları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.

1. TB’de 1.2 yıl, 6.3, 2.9, 1.3, 1.1 ve 1.0 ay, 2. TB’de 1.2 yıl, 7.2, 2.8 ve 1.8 ay ve 13.7 gün periyodu olan sinyaller % 95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı bulunmuştur.



Şekil 6. 1. TB’nin genlik spektrumu



Şekil 7. 2. TB’nin 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 istasyonlarının yükseklik zaman serisi uzunluklarının sırasıyla yaklaşık 2, 4 ve 5 yıl olduğundan, her bir Mar-SGPS yükseklik zaman serisinin spektrumları ayrı ayrı hesaplanmıştır. ANDO Mar-SGPS istasyonu yükseklik zaman serilerinde sırasıyla 1 ve 1.2 mm genliği 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 periyodu olan sinyaller %95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı olarak bulunmuştur. ANDE Mar-SGPS istasyonu yükseklik zaman serilerinde 1.2 mm genlikli 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 periyodu

olan sinyaller %95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı bulunmuştur. TGDE Mar-SGPS istasyonu yükseklik zaman serilerinde ise 1.75 mm genlikli 1.2 yıl, genlikleri 0.66-1.00 mm arasında değişen 6, 4.2, 1.9 ay ve 15, 13 gün periyodu olan sinyaller genlik spektrumlarında %95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı olarak bulunmuştur.

### **Mar-SGPS yükseklik zaman serileri doğrusal trendinin belirlenmesi**

ANDE, ANDO ve TGDE Mar-SGPS istasyonlarındaki düşey hızları belirlemek amacıyla, daha önce aylık ODS verilerine (16) eşitliği ile uygulanan harmonik analiz modeli Mar-SGPS yükseklik zaman serilerine de uygulanmıştır. Spektral analiz ile %95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı bulunan frekanslar modele bilinmeyen olarak dahil edilmiştir. Bilinmeyen olarak alınan her bir sinyale ilişkin iki katsayının istatistiksel analizi, verilerdeki uyuşumsuz ölçülerin ayıklanması ve bilinmeyen parametrelerin anlamlılık testi (t-testi) aylık ODS verilerinin analizine benzer bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Spektral analizle belirlenen periyodik sinyallerin tamamı harmonik analiz sonucunda % 95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı bulunmuştur. TGDE ve ANDE Mar-SGPS istasyonlarında % 95 istatistiksel güven düzeyinde anlamlı mutlak düşey hareketler bulunmazken, ANDO Mar-SGPS istasyonunun mutlak düşey hızı  $0.40 \pm 0.10$  mm/yıl olarak belirlenmiştir.

### **ANDENES ve TREGDE mareograf istasyonlarında mutlak deniz seviyesi değişimlerinin belirlenmesi**

% 95 istatistiksel güven düzeyinde, TREGDE mareograf istasyonunda 1935-2001 döneminde anlamlı bir görel deniz seviyesi trendi ve TGDE Mar-SGPS istasyonunda anlamlı bir mutlak düşey hız belirlenmemiştir. Ayrıca, Peltier (2001) tarafından bu istasyonda belirlenen  $0.79$  mm/yıl hızla kara yükselmesi, TGDE Mar-SGPS istasyonundaki istatistiksel olarak anlamlı bir düşey kabuk hareketi olmadığı bulgusu ile çelişmektedir. Bu uyumsuzluğun bir nedeni olarak yaklaşık 2 yıl uzunluğunda zaman serisi olan TGDE Mar-SGPS istasyonunun (Blewitt ve Lavallée, 2002) tarafından önerilen 2.5 yıl uzunluğu tam olarak sağlamaması gösterilebilir.

ANDENES mareograf istasyonunda 1938-2001 döneminde ODS,  $2.04 \pm 0.19$  mm/yıl hızla karaya göre yükselmektedir. ANDENES mareograf istasyonunun hemen yanında bulunan ANDE Mar-SGPS istasyonunda % 95 istatistiksel güvenle anlamlı bir mutlak düşey hız bulunmazken, ANDENES mareograf istasyonuna yaklaşık 7 km uzaklıkta bulunan ANDO Mar-SGPS istasyonu  $0.40 \pm 0.10$  mm/yıl hızla mutlak olarak yükselmektedir. Bu, Peltier (2001) tarafından ANDENES mareografı için belirlenen  $0.89$  mm/yıl kara yükselmesi ile genel olarak uyumludur. ANDENES mareograf istasyonundaki  $2.04 \pm 0.19$  mm/yıl görel deniz seviyesi trendi ile ANDO Mar-SGPS istasyonunun mutlak düşey hareketi ( $0.40 \pm 0.10$  mm/yıl) birleştirilerek, ANDENES mareograf istasyonunda uzun dönemli mutlak deniz seviyesinin  $2.44 \pm 0.21$  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 kullanılarak belirlenen  $3.2 \pm 1.5$  mm/yıl ve  $2.6 \pm 1.0$  mm/yıl mutlak deniz seviyesi değişimleri ile uyumludur.

### **Sonuçlar ve tartışma**

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'de anlamlı bir görel deniz seviyesi trendi bulunmazken, ANDENES'de  $2.04 \pm 0.19$  mm/yıl bulunmuştur. TGDE ve ANDE'de anlamlı mutlak düşey hareketler bulunmazken, ANDO SGPS istasyonunun mutlak düşey hızı  $0.40 \pm 0.10$  mm/yıl olup, Peltier (2001) tarafından geliştirilen Buzul Sonrası Etki modeliyle belirlenen  $0.89$  mm/yıl kara yükselmesi ile genel olarak uyumludur. ANDO SGPS istasyonu mutlak düşey hızı, görel deniz seviyesi trendi ile birleştirilerek ANDENES mareograf istasyonunda uzun dönemli mutlak deniz seviyesinin  $2.44 \pm 0.21$  mm/yıl hızla yük-

seldiği belirlenmiş ve Şanlı ve Blewitt (2001) tarafından verilen mutlak deniz seviyesi değişimleri ve 1-3 mm/yıl düzeyindeki global deniz seviyesi değişimleri ile uyumlu bir sonuç elde edilmiştir.

## Kaynaklar

- Barnett, T.P. (1983). Recent changes in sea level and their possible causes, *Climatic Change*, 5, 15-38.
- Baisch, S. ve Bokelmann, G.H.R. (1999). Spectral analysis with incomplete time series: an example from seismology, *Computers and Geosciences*, 25, 739-750.
- 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 Lavallée, D., (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research*, 107, B7, ETG9-1/9-11, DOI:10.1029/2001JB000570.
- 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, Jeodezi Dairesi Başkanlığı, Harita Genel Komutanlığı.
- 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. ve Dekkers, M. (2001). Spectral analysis of unevenly spaced time series using CLEAN: signal recovery and derivation of significance levels using a Monte Carlo simulation, *User Manual*.
- Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Callander, B. A., Harris, N., Kattenberg, A., ve Maskell, K., eds. (1995). *Climate change 1995*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 572, Cambridge University Press.
- 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.
- Koch, K.R. (1987). *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*, Springer-Verlag, New York.
- Nakiboğlu M. ve Demir C. (2002). Dengeleme Hesabı Cilt I, Harita Genel Komutanlığı, Harita Yüksek Teknik Okulu Komutanlığı, Ankara.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. (1987). Trends in U.K. mean sea level, *Marine Geodesy*, 11, 57-87.