**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# SABİT GPS İSTASYONLARI ZAMAN SERİLERİ ANALİZİNDEN YARARLANARAK KAMPANYA TİPİ GPS ÖLÇÜLERİNİN HIZLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

**DOKTORA TEZİ**

**Ali İhsan KURT**

**Anabilim Dalı : Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği**

**Programı : Geomatik Mühendisliği**

**ŞUBAT 2009**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# SABİT GPS İSTASYONLARI ZAMAN SERİLERİ ANALİZİNDEN YARARLANARAK KAMPANYA TİPİ GPS ÖLÇÜLERİNİN HIZLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

**DOKTORA TEZİ**

**Ali İhsan KURT**
**(501022307)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Eylül 2008**
**Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Şubat 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Rasim DENİZ (İTÜ)**
**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Muhammed ŞAHİN (İTÜ)**
**Doç. Dr. Haluk ÖZENER (BÜ)**
**Prof. Dr. Ergin TARI (İTÜ)**
**Doç. Dr. Ş. Hakan KUTOĞLU (ZKÜ)**

**ŞUBAT 2009**

## ÖNSÖZ

Sabit GPS istasyonlarında toplanan sürekli GPS verileri ile jeodezik ve jeodinamik amaçlar doğrultusunda hesaplamalar yapmak, yer kabuğu hareketlerine yönelik kinematik modelleme çalışmalarını gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada; sabit GPS istasyonları zaman serileri analizi ile hesaplanan periyodik etkilerin kampanya tipi ölçülerle elde edilen hızlara düzeltme olarak getirilerek daha gerçekçi hıza ulaşılması için uygun modeller ve kampanya çözümünden elde edilen hızların iyileştirilmesi için bir yaklaşımın elde edilmesi araştırılmıştır. GPS zaman serileri, çeşitli gürültü modelleri ile test edilerek, test verisi olarak seçilen istasyonlara ait en uygun modelin Beyaz Gürültü ve Kırpışma Gürültüsünün birleşimi olduğu görülmüştür. Zaman serileri içindeki anlamlı sinyallerin frekanslarını ve genliklerini istasyon bazında hesaplamak amacıyla GPS zaman serilerine, boşluklu veriler için oldukça uygun bir yöntem olan Lomb-Scargle algoritması uygulanmıştır. Tüm istasyonlarda ortak olarak senelik ve altı aylık etkilerin baskın olduğu tespit edilmiştir. Senelik ve altı aylık etkilerin, hem deformasyon ölçüleri hem de TUTGA hızlarına nasıl ilave edilebileceğine dair bir algoritma geliştirilerek, kampanya tipi ölçülerden elde edilen hız alanının iyileştirilmesi için bir yöntem önerilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara ilişkin bir değerlendirme yapılarak, Türkiye genelinde ve bölgesel olarak nasıl uygulanabileceğine ilişkin yatay ve düşey hızlar için bir değerlendirme yapılmıştır.

Uzun bir çalışma süresi boyunca desteklerini esirgemeyen ve her aşamada bana yol gösteren danışman hocam Prof.Dr. Rasim DENİZ ve tez izleme jürisi üyeleri Prof.Dr. Muhammed ŞAHİN ve Doç.Dr. Haluk ÖZENER'e; verdikleri katkılar ile tezin daha anlaşılır hale gelmesini sağlayan tez jürisi üyeleri Prof.Dr.Ergin TARI ve Doç.Dr. Ş.Hakan KUTOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Sabit GPS istasyonlarının işletilmesinde ve verilerin kullanıcılara sağlanmasında emeği geçen başta Jeodezi Dairesi Başkanlığı olmak üzere tüm Harita Genel Komutanlığı personeline ve diğer kurumlara saygılarımı sunarım. MAGNET verilerini çalışmamda kullanmama olanak sağlayarak uygulamama destek veren başta Doç.Dr. Semih ERGİNTAV olmak üzere tüm TÜBİTAK-MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü personeline teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde emeklerini esirgemeyen anne ve babama, gülücükleri ile moral kaynağı olan kızım Dila'ya ve çalışma süresi boyunca hiçbir fedakârlıktan kaçınmayarak hep destek olan hayat arkadaşım Duygu'ya şükranlarımı sunarım.

Ece'm… Varlığınla değer kattığın hayatımız, Melek olup zamansız gidişinle üzüntülerin en derinine sürüklendi. "Dersin bitti mi baba?" diyen sözlerin hâlâ kulağımda çınlıyor. Baban seni çok özledi kızım, çok…

**Şubat 2009** **Ali İhsan KURT**

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

**KISALTMALAR** ..... **vii**
**ÇİZELGE LİSTESİ** ..... **viii**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **ix**
**SEMBOL LİSTESİ** ..... **xi**
**ÖZET** ..... **xiii**
**SUMMARY** ..... **xv**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
1.1 Kampanya Tipi GPS Ölçmeleri ve Sabit GPS İstasyonları ..... 2
1.2 Tezin Kapsamı ve Test Bölgesinin Tanıtılması ..... 6
**2. TEKTONİK HAREKETLER VE HIZLAR** ..... **9**
2.1 Kabuk Hareketleri ..... 9
2.2 Levha Hareketi ..... 10
2.3 Yerin Dönmesi, Referans Sistemleri ve IERS ..... 12
2.4 Uluslararası Yersel Koordinat Referans Sistemi ..... 14
2.5 GPS Verilerinden Doğrusal Tektonik Hızın Hesaplanması ..... 16
**3. GPS ZAMAN SERİLERİNE GENEL BİR BAKIŞ** ..... **19**
3.1 Zaman Serilerinin Genel Yapısı ..... 19
3.2 Deprem Sonrası (Post-sismik) Yer Değiştirmeler ..... 21
3.3 GPS Zaman Serilerinin Gürültü Özellikleri ..... 23
3.3.1 En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK) yöntemi ..... 26
3.3.1.1 Tam sayı spektral indis ile güç yasası gürültüsü ve beyaz gürültü ..... 28
3.3.1.2 Hesaplanan spektral indis ile güç yasası gürültüsü ve beyaz gürültü 29
3.3.2 CATS yazılımı ..... 31
3.3.2.1 Tam sayı spektral indis analizi sonuçları ..... 33
3.3.2.2 Kestirilen spektral indis ile güç yasası gürültüsü ve beyaz gürültü ... 34
3.3.2.3 Tektonik doğrusal hızın hatası ..... 35
**4. GPS ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ** ..... **37**
4.1 Temel Bileşenler Analizi ..... 38
4.1.1 Tekil değer ayrışımı ..... 39
4.1.2 Kovaryans matrisinin özdeğer yaklaşımı ..... 40
4.1.3 Temel Bileşenler Analizinin istatistiksel anlamı ..... 41
4.1.4 Temel Bileşenler Analizinin sentetik veri ile test edilmesi ..... 42
4.2 Spektral Analiz ..... 47
4.2.1 Fourier analizi ..... 47
4.2.2 Lomb-Scargle algoritması ..... 48
4.2.3 Lomb-Scargle algoritması ile Fourier analizinin karşılaştırılması ..... 51
**5. TEST VERİLERİ VE DEĞERLENDİRMESİ** ..... **59**
5.1 Günlük Çözümlerin Oluşturulması ..... 60
5.2 Günlük Çözümlerin Birleştirilmesi ..... 63
5.3 Zaman Serilerindeki Kaba Hataların Ayıklanması ..... 64
5.3.1 GPS zaman serilerindeki kaba hataların sebepleri ..... 64

5.3.2 Kaba hataların ayıklanması ..... 65
5.4 SGPS İstasyonları Zaman Serilerinin Temel Bileşenler Analizi ..... 68
5.5 GPS Zaman Serilerinin Lomb-Scargle Yöntemi ile Spektral Analizi ..... 71
5.6 SGPS İstasyonlarında Senelik ve Altı Aylık Sinyallerin Hesaplanması ..... 73
**6. KAMPANYA TİPİ GPS HIZLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ ..... 77**
6.1 Deformasyon Ölçmeleri ..... 77
6.2 TUTGA Hızlarına Getirilecek Düzeltmeler ..... 78
6.3 Senelik Etkilerin Gridlenmesi ..... 79
6.4 TUTGA Hızlarının İyileştirilmesine Yönelik Uygulama ..... 81
6.4.1 TUTGA noktasının ölçü zaman anlarının bulunması ..... 81
6.4.2 TUTGA zaman anlarına düzeltme değerlerinin getirilmesi ..... 83
6.4.3 TUTGA zaman anlarında yeni hız hesabının yapılması ..... 84
6.4.4 Ankara ist. TUTGA noktası kabul edilerek hızının iyileştirilmesi ..... 85
6.4.5 Kampanya GPS hızlarının geliştirilmesinin MAGNET ist.larında uyg. .. 86
6.5 Bir İstasyondan Elde Edilen Etkilerin Mesafeye Bağlı Değişimi ..... 88
**7. SONUÇLAR, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER ..... 91**
**KAYNAKLAR ..... 95**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 99**

## KISALTMALAR

**AGA** : Ana GPS Ağı
**APKIM** : Actual Plate Kinematic and Deformation Model
**ASN** : Alım için Sıklaştırma Ağı ve Noktaları
**BG** : Beyaz Gürültü
**BIH** : Bureau International de L'Heure
**CATS** : Create and Analysis Time Series
**DORIS** : Doppler Orbitography and Radiopositionig Integrated by Satellite
**EBOK** : En Büyük Olabilirlik Analizi
**EKKY** : En Küçük Kareler Yöntemi
**FDR** : False Discovery Rate
**FFT** : Fast Fourier Transform
**GNSS** : Global Navigation Satellite System
**GPS** : Global Positioning System
**IERS** : International Earth Rotation Service
**IGS** : International GNSS Service
**IPMS** : International Polar Motion Service
**ITRF** : International Terrestrial Reference Frame
**ITRS** : International Terrestrial Reference System
**KG** : Kırpışma Gürültüsü
**L-S** : Lomb-Scargle
**LLR** : Laser Lunar Ranging
**LOD** : Length of Day
**MAGNET** : Marmara Sürekli GPS Gözlem Ağı
**MLE** : Maximum Likelihood Estimation
**NNR** : No Net Rotation
**NUVEL** : Northwest University Velocity
**RYG** : Rasgele Yürüyüş Gürültüsü
**SGA** : Sıklaştırma GPS Ağı
**SGPS** : Sabit GPS
**SLR** : Satellite Laser Ranging
**SPD** : Spectral Power Density
**SOPAC** : Scripps Orbit and Permanent Array Center
**TB** : Temel Bileşen
**TBA** : Temel Bileşenler Analizi
**TUSAGA** : Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı
**TUTGA** : Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı
**USNO** : United States Naval Observatory
**UTC** : Universal Time Coordinated
**VLBI** : Very Long Baseline Interferometry

## ÇİZELGE LİSTESİ

**Sayfa**


**Çizelge 2.1 :** NNR-NUVEL-1A kinematik modeline göre levhalar için kartezyen dönme vektörü bileşenleri (McCarthy, 2000).. ..... 11
**Çizelge 2.2 :** Sonuç IERS Yer Dönme Parametrelerine İlgili Uydu Tekniklerinin Katkıları (IERS,2001).. ..... 13
**Çizelge 3.1 :** Deprem sonrası modelleme ile bulunan sonuçlar..... 21
**Çizelge 3.2 :** İstasyon koordinatlarında gözlenen yıllık düşey değişimlere, jeofiziksel kaynakların ve model hatalarının katkıları (Dong ve diğ., 2002). ..... 26
**Çizelge 3.3 :** Tamsayı spektral indis EBOK analizi sonuçları..... 34
**Çizelge 3.4 :** Hesapla bulunan spektral indis EBOK analizi sonuçları..... 35
**Çizelge 3.5 :** EBOK analizi ve EKKY ile bulunan doğrusal hızların hatalarının karşılaştırılması. ..... 36
**Çizelge 4.1 :** Sentetik veride rastgele boşluklar oluşturularak L-S yöntemi ile analiz sonuçları. ..... 53
**Çizelge 4.2 :** İstanbul SGPS istasyonunun yükseklik bileşeni için yapılan analizde, Lomb-Scargle Yöntemi ile bulunan anlamlı sinyallerin frekans ve genliklerinin FFT yöntemi ile bulunanlarla karşılaştırılması. ..... 56
**Çizelge 4.3 :** İstanbul SGPS istasyonunun Lomb-Scargle yöntemi ile çeşitli boşluklu veri aralıklarında yapılan analizinde bulunan anlamlı periyotlar ve karşılık gelen genlik değerleri. ..... 57
**Çizelge 5.1 :** Çalışma kapsamında değerlendirilen SGPS İstasyonlarına ait bilgiler. 59
**Çizelge 5.2 :** GAMIT yazılımı ile GPS veri değerlendirme aşamasında kullanılan *sesstbl* tablosundaki bazı önemli parametreler..... 61
**Çizelge 5.3 :** GAMIT yazılımı ile GPS veri değerlendirme aşamasında kullanılan *sittbl* tablosundaki bazı önemli parametreler. ..... 62
**Çizelge 5.4 :** GLOBK yazılımı ile zaman serilerinin oluşturulması aşamasında kullanılan glred ve glorg tablolarındaki bazı önemli parametreler. ..... 63
**Çizelge 5.5 :** Ankara, İstanbul, Trabzon ve Tubitak SGPS istasyonlarının Temel Bileşenler Analizi ile hesaplanan 1,2 ve 3. TB'in L-S algoritması ile anlamlı bulunan periyotları ve genlikleri. ..... 70
**Çizelge 5.6 :** Zaman serilerinin Kuzey-Güney Bileşenlerinin L-S analizinde bulunan baskın sinyallerin periyotları ve genlik değerleri..... 72
**Çizelge 5.7 :** Zaman serilerinin Doğu-Batı Bileşenlerinin L-S analizinde bulunan baskın sinyallerin periyotları ve genlik değerleri..... 72
**Çizelge 5.8 :** Zaman serilerinin Yükseklik Bileşenlerinin L-S analizinde bulunan baskın sinyallerin periyotları ve genlik değerleri..... 72
**Çizelge 5.9 :** 2006 yılı başına kadar olan zaman serilerinden elde edilen senelik ve altı aylık etkilerin genlik değerleri. ..... 74
**Çizelge 6.1 :** İstanbul SGPS istasyonunun En Küçük Kareler Analizi sonuçları. ..... 82
**Çizelge 6.2 :** MAGNET istasyonlarının hızlarının geliştirilmesi. ..... 88

## ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa**

**Şekil 1.1 :** Yıllık periyodik etki içeren zaman serilerinde, hız belirsizliğinin zamana göre azalması (Blewitt ve Lavalle, 2002).. ..... 4
**Şekil 1.2 :** İstanbul SGPS istasyonu yükseklik bileşeni zaman serisi... ..... 5
**Şekil 2.1 :** Ana levha sınırları ve beklenen hızlar (DGFI)... ..... 12
**Şekil 2.2 :** 1996-2000 yılları arasındaki kutup gezinmesi ve 1900-2000 yılları arasındaki ortalama kutup kayıklığı (IERS, 2000)..... 14
**Şekil 3.1 :** Gözlenen zaman serilerinin bileşenleri.. ..... 19
**Şekil 3.2 :** TUBI istasyonu kuzey-güney bileşenine ait deprem sonrası deformasyon ve üssel modellemesi..... 22
**Şekil 3.3 :** TUBI istasyonu doğu-batı bileşenine ait deprem sonrası deformasyon ve üssel modellemesi ..... 22
**Şekil 3.4 :** ISTA istasyonu kuzey-güney bileşenine ait deprem sonrası deformasyon ve üssel modellemesi..... 23
**Şekil 3.5 :** Zaman serilerindeki gürültülerin spektral indeks üzerindeki yerleri..... 24
**Şekil 4.1 :** 1.Test durumu için elde edilen temel bileşenlerin genlik spektrumları. .. 43
**Şekil 4.2 :** 2.Test durumu için elde edilen temel bileşenlerin genlik spektrumları. .. 44
**Şekil 4.3 :** TBA 3.Test durumu için oluşturulan sentetik zaman serileri..... 45
**Şekil 4.4 :** 3.Test durumu için elde edilen temel bileşenlerin genlik spektrumları. .. 46
**Şekil 4.5 :** Lomb-Scargle algoritmasını test etmek amacıyla oluşturulan sentetik zaman serisi..... 52
**Şekil 4.6 :** Sentetik verinin L-S ve FFT yöntemleri ile analizi sonucundaki güç spektrumları. ..... 53
**Şekil 4.7 :** %90'ı boşaltılmış sentetik zaman serisinin görünümü..... 54
**Şekil 4.8 :** %90'ı boşaltılmış sentetik zaman serisinin Lomb-Scargle yöntemi ile analizi sonucunda elde edilen güç spektrumu..... 54
**Şekil 4.9 :** İstanbul SGPS istasyonunun boşlukları doldurulmuş yükseklik bileşeni zaman serisi.. ..... 55
**Şekil 4.10 :** İstanbul SGPS istasyonunun boşlukları doldurulmuş Yükseklik Bileşeni Zaman Serisi L-S ve FFT yöntemleri ile analizi sonucundaki güç spektrumları.. ..... 56
**Şekil 5.1 :** Çalışma kapsamında değerlendirilen sabit GPS istasyonlarının konumsal dağılımı. ..... 59
**Şekil 5.2 :** Sabit GPS istasyonları analizlerinde kullanılan IGS istasyonlarının dağılımı.. ..... 62
**Şekil 5.3 :** SGPS istasyonu verilerinden üretilen günlük koordinat zaman serileri... 64
**Şekil 5.4 :** Antalya SGPS istasyonu zaman serisinin dengeleme sonrası gözlenen koordinat tekrarlılıkları ve kaba hatalı ölçüleri..... 67
**Şekil 5.5 :** TBA sonucunda oluşan temel bileşenlerin istasyonlara göre dağılımı. ... 68
**Şekil 5.6 :** Ankara, İstanbul, Tubitak ve Trabzon istasyonlarının (a) K-G (b) D-B (c) Yükseklik Bileşenlerinin TBA analizi sonucu elde edilen 1,2 ve 3.Temel Bileşenlerin L-S algoritmasına ait genlik spektrumları. ..... 69

**Şekil 5.7 :** Zaman serilerinden elde edilen yatay yöndeki senelik bileşenlerin genliklerinin istasyonlara göre dağılımı.. ..... 75
**Şekil 5.8 :** %90'ı boşaltılmış sentetik zaman serisinin görünümü. ..... 75
**Şekil 5.9 :** Zaman serilerinden elde edilen yatay yöndeki altı aylık bileşenlerin genliklerinin istasyonlara göre dağılımı. ..... 76
**Şekil 5.10 :** Zaman serilerinden elde edilen düşey yöndeki altı aylık bileşenlerin genliklerinin istasyonlara göre dağılımı. ..... 76
**Şekil 6.1 :** Kuzey-güney bileşeni senelik etkilerinin grid noktalarında enterpolasyonu. ..... 80
**Şekil 6.2 :** Doğu-batı bileşeni senelik etkilerinin grid noktalarında enterpolasyonu. 80
**Şekil 6.3 :** Yükseklik bileşeni senelik etkilerinin grid noktalarında enterpolasyonu. 81
**Şekil 6.4 :** Kampanya tipi ölçüden doğrusal hızın hesaplanması. ..... 82
**Şekil 6.5 :** TUTGA hızına senelik ve altı aylık etkilerin getirilmesiyle yeni hızının hesaplanması. ..... 84
**Şekil 6.6 :** Uygulamada kullanılan MAGNET istasyonlarının dağılımı. ..... 87
**Şekil 6.7 :** Ankara istasyonundan elde edilen düşey bileşene ait senelik etkinin kullanılabilirliğinin mesafeye bağlı olarak gösterimi. ..... 90

## SEMBOL LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $\mathbf{a_w}$ | **:** Beyaz gürültü genliği |
| $\mathbf{b_\kappa}$ | **:** Güç Yasası Gürültüsü genliği |
| **C** | **:** Veri kovaryans matrisi |
| **f** | **:** Frekans |
| **I** | **:** Birim matris |
| $\mathbf{J_\kappa}$ | **:** κ spektral indisine sahip Güç Yasası Gürültüsünün kovaryans matrisi |
| **ln** | **:** Doğal logaritma |
| **Px(f)** | **:** Güç spektrumu |
| **Po , fo** | **:** Normalizasyon sabitleri |
| **t** | **:** Zaman |
| **V** | **:** Tektonik doğrusal hız |
| $\vec{\mathbf{X}}(\mathbf{t})$ | **:** Sabit bir noktanın t zaman anındaki anlık gerçek konumu |
| $\hat{\mathbf{v}}$ | **:** Dengeleme sonrası artıklar |
| **Ωx, Ωy, Ωz** | **:** Kartezyen dönme vektörü bileşenleri |
| Δ | **:** Deformasyon miktarı (mesafe) |
| **σ** | **:** Standart sapma |
| **κ** | **:** Spektral indeks |
| $\lambda_i$ | **:** Tekil değerler |
| **ω** | **:** Açısal frekans |
| ζ | **:** İstatistik değeri |

## SABİT GPS İSTASYONLARI ZAMAN SERİLERİ ANALİZİNDEN YARARLANARAK KAMPANYA TİPİ GPS ÖLÇÜLERİNİN HIZLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

## ÖZET

Kampanya tipi GPS gözlemleri kullanıcıya elindeki alıcı sayısından daha fazla sayıda noktada gözlem yaparak, ölçü bölgesinin daha yüksek konumsal çözünürlükle izlenmesine olanak sağlamaktadır. Diğer taraftan, kampanya tipi veriler zamansal olarak seyrektirler ve doğrusal olmayan yer hareketlerini veya her yeni kampanya gözleminde oluşabilecek küçük sıçramaları tespit edemeyecek kadar yetersizdirler. Sabit GPS noktasında toplanan sürekli GPS verileri ile jeodezik ve jeodinamik amaçlar doğrultusunda hesaplamalar yapmak, yer kabuğu hareketlerine yönelik kinematik modelleme çalışmalarını gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada; sabit GPS istasyonları zaman serileri analizi ile hesaplanan periyodik etkilerin kampanya tipi ölçülerle elde edilen hızlara düzeltme olarak getirilerek daha gerçekçi hıza ulaşılması için uygun modeller ve kampanya çözümünden elde edilen hızların iyileştirilmesi için bir yaklaşımın elde edilmesi araştırılmıştır.

Verileri herkese açık olan Ankara, İstanbul, Trabzon, Mersin, Gebze ve Antalya sabit GPS istasyonlarından alınan GPS verileri Türkiye için test verisi olarak seçilmiştir. Sonuçları daha bölgesel bir alanda test etmek için TÜBİTAK-MAM tarafından işletilen MAGNET istasyonlarının verileri kullanılmıştır. Bu çalışmanın kapsamını oluşturan 2006 yılı başına kadar olan GPS veri değerlendirmeleri tamamlanarak zaman serileri analizine hazır hale getirilmiştir.

GPS veri değerlendirmeleri GAMIT-GLOBK yazılımı ile yapılarak ITRF2000'de zaman serileri üretilmiştir. Bu aşamada yapılan diğer bir çalışma, zaman serileri içerisinden uyuşumsuz ve kaba hatalı ölçülerin ayıklanması olmuştur. Zaman serilerine Pope Kaba Hata testi uygulanmış; uyuşumsuz olarak tespit edilen veriler zaman serilerinden çıkarılarak analize hazır hale getirilmiştir.

GPS zaman serilerinin stokastik gürültü özelliklerini araştırmak amacıyla; En Büyük Olabilirlik Analizi (EBOK) yapılmıştır. GPS zaman serileri, çeşitli gürültü modelleri ile test edilerek, test verisi olarak seçilen istasyonlara ait en uygun modelin Beyaz Gürültü ve Kırpışma Gürültüsünün birleşimi olduğu görülmüştür. Gürültü modelleri göz önüne alınmadan, yalnızca Beyaz Gürültü olduğu kabul edilerek, diğer bir deyişle yalnızca En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalarda, doğrusal tektonik hız parametresinin hatasının yatayda ortalama 7 kat, düşeyde ise ortalama 8 kat daha küçük hesaplanacağı bulunmuştur.

Konumsal olarak dağılmış SGPS istasyonlarında ortak bazı sinyallerin mevcudiyetini araştırmak için, test verilerinden elde edilen zaman serilerine Temel Bileşenler Analizi yapılmıştır. Daha sonra, zaman serileri içindeki anlamlı sinyallerin frekanslarını ve genliklerini istasyon bazında hesaplamak amacıyla GPS zaman serilerine, boşluklu veriler için oldukça uygun bir yöntem olan Lomb-Scargle algoritması uygulanmıştır. Tüm istasyonlarda ortak olarak senelik ve altı aylık etkilerin baskın olduğu tespit edilmiştir. Böylece, kampanya tipi GPS ölçü hızlarına düzeltme olarak getirilecek periyodik etkilerin hangilerinin modelleneceğine karar verilmiştir.

Senelik ve altı aylık etkilerin, hem deformasyon ölçüleri hem de TUTGA hızlarına nasıl ilave edilebileceğine dair bir algoritma geliştirilerek, kampanya tipi ölçülerden elde edilen hız alanının iyileştirilmesi için bir yöntem önerilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara ilişkin bir değerlendirme yapılarak, Türkiye genelinde ve bölgesel olarak nasıl uygulanabileceğine ilişkin yatay ve düşey hızlar için bir değerlendirme yapılmıştır.

## IMPROVING VELOCITY OBTAINED FROM CAMPAIGN TYPE GPS MEASUREMENTS VIA UTILIZING TIME SERIES ANALYSIS OF CONTINUOUS GPS STATIONS

## SUMMARY

Campaign type GPS measurements provide higher resolution spatial monitoring of region by supplying to the observer more station than of his receiver number. On the other hand, campaign type measurements return baseline measurements with very sparse temporal sampling. This may not be a major problem for studying only slow, steady interseismic deformations, but changes in this behavior which occur over timescales less than the separation in observations will be missed by field campaigns. It is possible to make geodetic and geodynamic calculations, carry out kinematic modeling of crustal movements via using continuous GPS measurements obtained from CGPS stations. In this study, an algorithm is investigated to receive more accurate velocity field and improve velocity obtained from campaign type GPS measurements by adding corrections to the velocities via utilizing time series analysis of continuous GPS stations.

Public data of Ankara, İstanbul, Trabzon, Mersin, Gebze and Antalya stations is used as test measurements for whole Turkey. To test the results in a more local area, MAGNET CGPS stations which are operated by TUBİTAK-MAM are used. Time series of related stations are prepared by completing the GPS process until the beginning of the year 2006 that constitutes the scope of this study. GPS processes were done by GAMIT-GLOBK software and time series are created in ITRF2000. Also, outliers were removed at this stage. Pope test was applied to the time series and they became ready to time series analysis.

Maximum Likelihood Estimation (MLE) was applied to investigate stochastic noise properties of GPS time series. Time series were tested by different noise models, and a combination of white noise+flicker noise was found best describing model. In case only white noise model used, in other words using solely Least Squares Adjustment, uncertainties would be underestimated 7 times at north and east component and 8 times at up component. Principal Component Analysis was applied to the time series to search for common signals at stations that are spatially distributed. Afterwards, Lomb-Scargle algorithm which is suitable for unequally spaced time series, was applied to investigate the amplitudes and frequencies of dominant signals on a station by station basis. Annual and semi-annual signals were determined dominant common to all sites. Thus, these periodical signals were chosen to be brought as corrections to campaign type GPS measurements.

An algorithm is suggested on how to apply annual and semi-annual effects in order to improve both deformation measurements and Turkish National Fundamental GPS Network (TNFGN) velocities. An assessment is given to evaluate the results obtained from this study on how to apply both locally and in the vicinity of Turkey for horizontal and vertical velocity fields.

# 1. GİRİŞ

Konumlama ve yer ölçmeleri alanlarında çığır açan uzay jeodezisi teknikleri; jeodezi, jeodinamik, mühendislik ölçmeleri ve ilgili disiplinlerde artan bir hızla kullanılmaktadır. Yer bilimleri ve mühendisliğin tüm alanlarında yoğun bir biçimde kullanılan hassas uydu teknikleri, klasik yöntemlere göre, doğruluk, zaman, uygulanabilirlik ve maliyet yönlerinden oldukça önemli üstünlükler sağlamaktadır.

Modern jeodezi, yer hareketlerinin sismik ve jeolojik zaman birimleri arasındaki bütün zamana bağlı bölgelerde oluşabileceğini kabul etmekte ve bu hareketleri en uygun alet ve donanımla ölçmeyi hedeflemektedir (Nikolaidis, 2002). GPS ilk dönemlerinde; yer hareketlerini ölçmekten çok, öncelikli olarak askeri kullanıcılar için global bir navigasyon aracı niteliği taşımıştır. Yeryüzü üzerindeki herhangi bir kullanıcının ihtiyaç duyabileceği mutlak nokta konumlaması için kesin mesafe ölçüleri ve gerçek zamanlı navigasyon hizmeti vermek üzere tasarlanmıştır.

Çok kısa bir süre sonra GPS'in yer hareketlerinin ölçümü için büyük bir potansiyele sahip olduğu açık hale gelmiştir. GPS'in jeodezik bir cihaz olarak yükselmesini, donanım ve veri değerlendirme tekniklerindeki bazı önemli gelişmeler takip etmiştir. 1980'li yılların başlarında, iyonosferik gecikme bilinmeyenini ortadan kaldıran çift frekanslı alıcıların kullanılmasına başlanmıştır. Bunun gibi donanımsal gelişmeler, yüksek duyarlıklı jeodezik uygulamalar için çok büyük önem taşıyan GPS yörünge belirlemesi, ağ tasarımı, faz belirsizliği çözümü ve atmosferik modelleme gibi konularda sayısız ilerlemelere yol açmıştır.

Günümüzde sabit GPS istasyonlarında toplanan verilerin değerlendirilmesiyle elde edilen jeodezik zaman serileri yer bilimleri ile ilgilenen birçok bilim dalı için oldukça cazip hale gelmiştir. Modern GPS alıcıları 20 Hz'e kadar veri toplama yeteneğine sahiptir. Gelişen uydu teknolojisi ve yörünge bilgisine paralel olarak sabit GPS istasyonlarında aynı zamanda GPS-sismometre uygulamaları başlamıştır.

GPS alıcılarının VLBI ve SLR tekniklerine göre daha düşük maliyetli ve taşınabilir yapıda olması, kabuk deformasyonu çalışmaları için GPS tekniğini önemli bir jeodezik araç haline getirmiştir. GPS, yüksek konumsal yoğunluktaki global ve bölgesel çalışmalar için kullanılabilmektedir. Global ve bölgesel çalışmalar için kullanılan alıcılar ve donanımlar arasında bir fark yoktur. Global çalışmalar için ilave olarak, konumsal olarak uygun dağılımlı global bir GPS istasyonları ağına ve GPS veri değerlendirmelerindeki bazı uyarlamalara ihtiyaç vardır. İnternet veri aktarımındaki modern gelişmelerin, serbest veri değişimine olanak veren uluslar arası işbirliği ile birleşmesiyle, söz konusu global ölçmeler sıradan bir hale gelmiştir.

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

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

## 1.1 Kampanya Tipi GPS Ölçmeleri ve Sabit GPS İstasyonları

Genel olarak kampanya tipi GPS ölçüleri daha önceden belirlenen bir bölgedeki GPS noktalarında yapılacak gözlemleri içerir. Tüm kampanya süresi, noktalarda yapılacak ölçü süresine bağlı olarak (birkaç saatten birkaç güne kadar) günler veya haftalar sürebilir. Bu gözlemler, ağı oluşturan baz uzunluklarının hesaplanabilmesi için genellikle günlük çözümler halinde beraberce değerlendirilirler. Daha sonra günlük çözümler birleştirilerek ilgili kampanyaya ait her nokta için tek bir çözüm elde edilir. Kabuk deformasyonu ölçüleri için genel olarak, belirli bir kampanya ölçmesi 6 aylık veya senelik ve belki de daha uzun periyotlarda tekrar edilmekte fakat daha kısa sürelerde ölçme yapılmamaktadır. Kampanya tipi gözlemler kullanıcıya elindeki alıcı

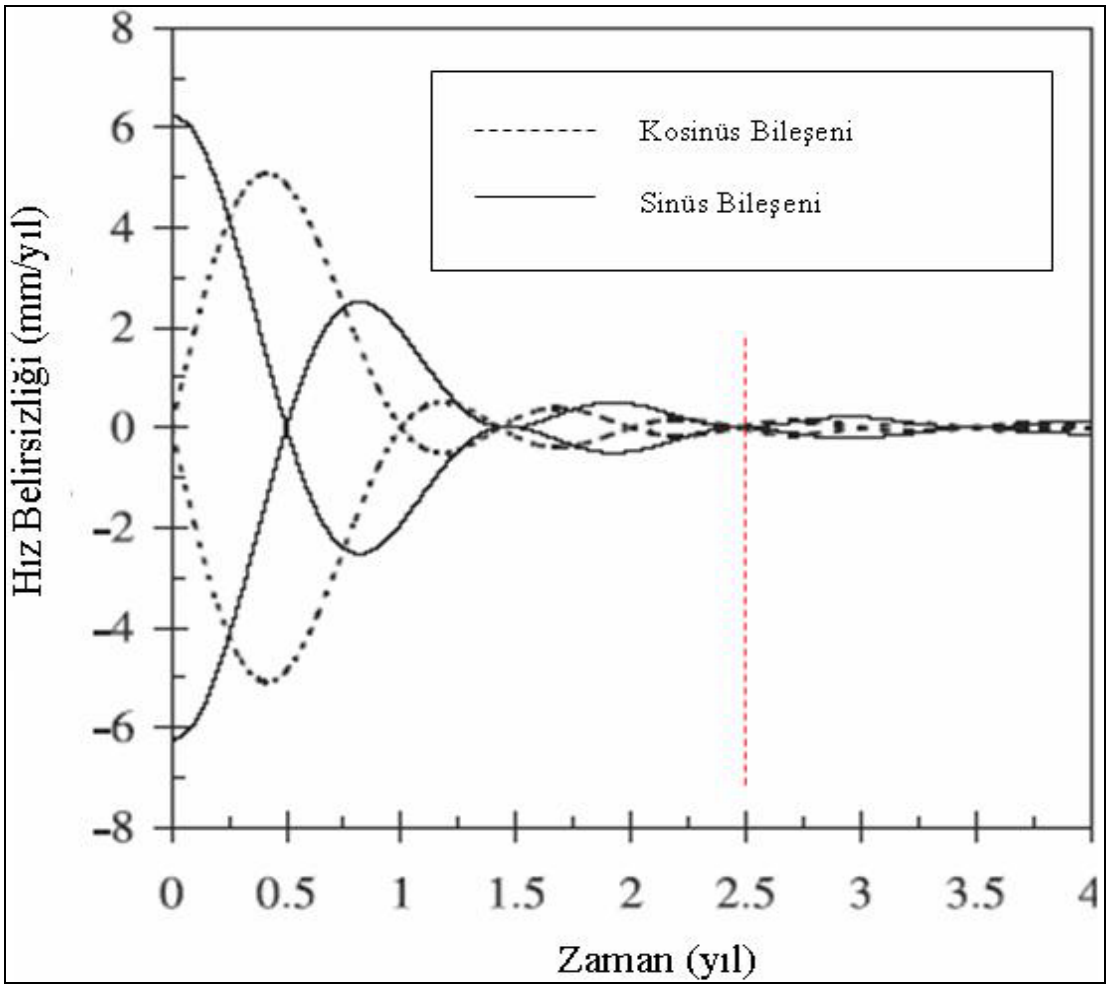
sayısından daha fazla sayıda noktada gözlem yapma imkânı vererek ölçü bölgesinin daha yüksek konumsal çözünürlükle izlenmesine olanak sağlamaktadır. Diğer taraftan, kampanya tipi veriler zamansal olarak seyrektirler ve doğrusal olmayan yer hareketlerini veya her yeni kampanya gözleminde oluşabilecek küçük sıçramaları tespit edemeyecek kadar yetersizdirler.

Bu noktada sabit GPS istasyonları, uzun süreli olarak kesintisiz nokta konumlarını sağlayarak bu tür problemlerin üstesinden gelebilmektedirler. Sabit GPS istasyonları dünyada ve Türkiye genelinde dağılmış noktalarda 365 gün 24 saat kesintisiz olarak askeri ve sivil kullanıma yönelik jeodezik ve jeodinamik amaçlar doğrultusunda uydu bilgileri toplayan sistemlerdir. Sabit GPS noktasında toplanan sürekli GPS verileri ile jeodezik ve jeodinamik amaçlar doğrultusunda hesaplamalar yapmak, yer kabuğu hareketlerine yönelik kinematik modelleme çalışmalarını gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. Sabit GPS istasyonlarındaki veri kayıtlarının artmasıyla, GPS ölçülerindeki hata, gürültü özellikleri ve periyodik etkilerin anlaşılmasını kolaylaştıran zaman serileri analizleri mümkün hale gelmiştir.

GPS ölçü kampanyaları tasarım açısından oldukça esnek ve düşük maliyetli olmasının avantajına sahiptir. Fakat nokta koordinatlarını oldukça kaba bir zaman aralığında verirler. Bu durum yalnızca yavaş ve sabit intersismik deformasyonların araştırılmasında büyük bir sorun olmayabilir, fakat kampanya aralıklarından daha yüksek frekansa sahip değişimlerin kaçırılmasına sebep olacaktır. Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı (TUSAGA) gibi bir ağda yapılan sabit GPS gözlemlerinden, herhangi bir bölgedeki kampanya tipi ölçmelerden daha fazla bilgi elde edilebilir. Söz konusu sabit GPS istasyonlarından elde edilen zaman serilerindeki hatalar, kampanya tipi GPS ölçmeleri ile elde edilen ölçmelerin hatalarıyla benzerlikler göstermektedir.

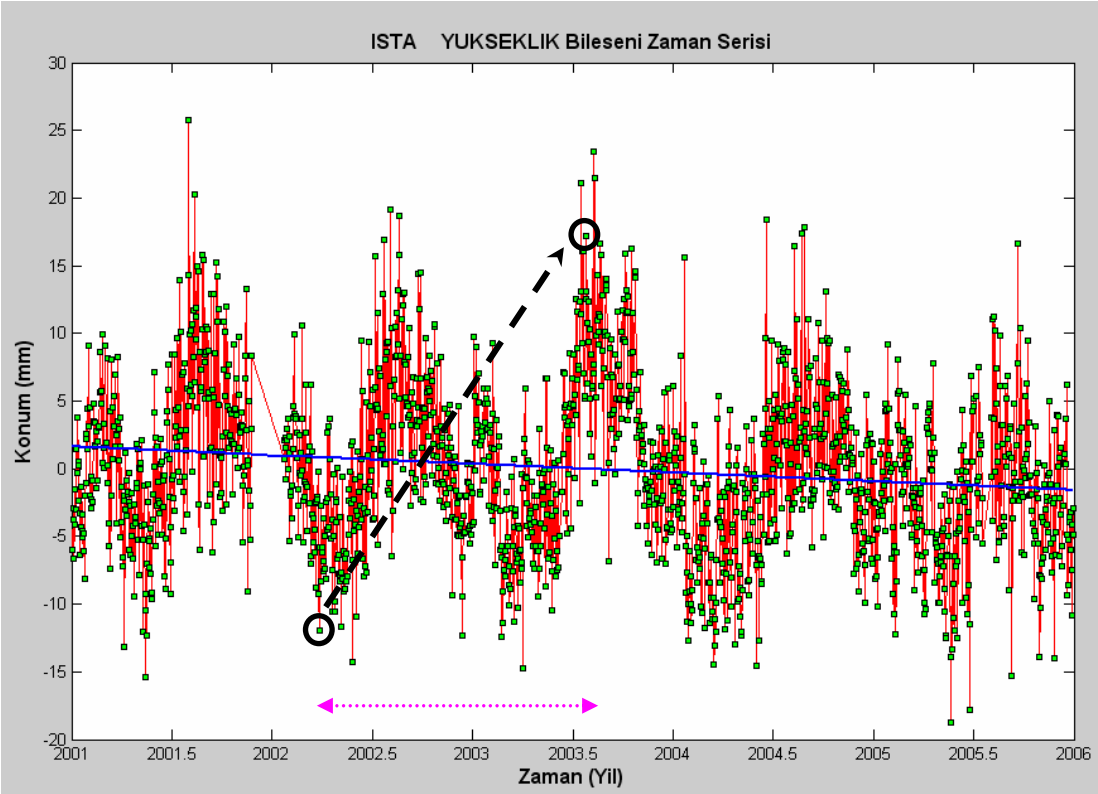
Kısacası kampanya tipi ölçülerle bölgesel deformasyon hakkında daha yüksek çözünürlüklü fakat düşük frekansta bilgi toplarken, sabit GPS istasyonlarından elde edilen verilerle düşük çözünürlüklü fakat yüksek frekansta veri sağlanmaktadır. Sabit GPS (SGPS) istasyonları veri analizleri ile kampanya tipi ölçülerin geliştirilmesi yaklaşımı, yüzey deformasyonları ve doğrusal tektonik hızın daha doğru ve gerçekçi hesaplanmasını sağlayacaktır.

Blewitt ve Lavalle (2002)'e göre, jeodezik zaman serilerinden hız analizi yapmak için gerekli süre minimum 2.5 yıldır. Aksi halde düşük frekanslı sinyallerin etkisinin seriden çıkarılması gerekmektedir. Şekil 1.1'de zamana bağlı olarak doğrusal hız belirsizliğindeki azalma görülmektedir.




**Şekil 1.1:** Yıllık periyodik etki içeren zaman serilerinde, hız belirsizliğinin zamana göre azalması (Blewitt ve Lavalle, 2002).

Şekil 1.2'de İstanbul SGPS istasyonunun yükseklik bileşenine ait zaman serisi görülmektedir. Bu zaman serisinde spektral analiz ile senelik etkinin genliği 4.3 mm hesaplanmıştır. Eğer kampanya ölçüsü bu nokta yakınında sinyal fazının en düşük olduğu yerde yapılır ve diğer zaman anı da bundan tam bir sene sonra yapılırsa, doğrusal hızın kestiriminde yapılacak hata 8.6 mm olacaktır. Genellikle düşey kabuk hareketinin hızının, yatay bileşene göre düşük olduğu göz önüne alınırsa, hızın yönünün de hatalı hesaplanması kaçınılmaz olacaktır.




**Şekil 1.2:** İstanbul SGPS istasyonu yükseklik bileşeni zaman serisi.

Kampanya tipi GPS ölçmeleri ile belirlenen hızların dikkatli bir biçimde incelenmesi gerekir. Özellikle de kampanyalar arası süre 2 yıldan az ise yukarıda açıklanan hataya düşülmemesi ancak rastlantılara bağlı olacaktır.

Hızların bir diğer önemli kullanımı, jeodezik amaçlı ağ sıklaştırmalarıdır. Dinamik jeodezik ağ yönteminde noktaların koordinatları ile birlikte hızları da belirlenir ve kullanılır. Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Yönetmeliğine göre, TUTGA (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı)'ya dayalı nokta sıklaştırmalarında, C1 ve C2 derece noktaların hızları TUTGA noktalarının hızlarına bağlı olarak hesaplanmakta ve kullanılmaktadır. Farklı zamanlarda gerçekleştirilecek nokta sıklaştırma çalışmalarında, zaman birliği sağlamak için koordinatlar hızlarla bir $t_o$ referans zaman anına ötelenirler. Bu hızlarla herhangi bir ölçme zaman anındaki (t) hızların birbirleriyle uyumu önemlidir. GPS gibi yüksek doğruluklu konumların elde edildiği jeodezik ağlarda, her türlü dönüşümde kullanılacak gerçek ve güvenilir hızların hesaplanması bu nedenle önem kazanmıştır. TUTGA ve buna bağlı nokta hızlarının kampanya çözümlerinden hesaplanması durumunda yukarıdaki bölümlerdeki problemler burada da söz konusu olacaktır.

## 1.2 Tezin Kapsamı ve Test Bölgesinin Tanıtılması

Sabit GPS istasyonları zaman serilerinin geliştirilmesi ile ilgili ilk çalışma Wdowinski ve diğ. (1997) tarafından yapılmıştır. Bu yaklaşım, istasyonlara ait koordinat bileşenlerinden genel bir kayıklığı çıkarmaktadır. Genel kayıklığın hesabı için öncelikle, Zhang ve diğ. (1997) tarafından hesaplanan doğrusal regresyon analizi parametrelerini kullanarak, gün bazında gözlenen ve kestirilen konum değerlerinin farklarını alarak artık hataları oluşturmuşlardır. Gün gün hesaplanan hataları tüm istasyonlar için toplayıp ortalamasını alarak genel bir kayıklık hesaplamışlardır. Elde edilen kayıklığı zaman serilerine uygulayarak bölgesel bir filtreleme gerçekleştirmişlerdir. Bu yaklaşım, birkaç yüz kilometre içerisindeki istasyonlar için uygun çözümler vermiş olup, daha büyük bölgeler için kullanılamamıştır. Dong ve diğ. (2006) benzer bir çalışmayı Temel Bileşenler Analizi ve Karhunen-Loeve açılımı yaklaşımı kullanarak yapmışlardır. Bu çalışmada, istasyonları konumsal olarak alt ağlara ayırarak filtreleme için gerekli kayıklık değerini farklı bölgeler için ayrı ayrı hesaplamışlardır. Her iki çalışmada da yalnızca sabit GPS istasyonları zaman serilerinin filtrelenerek iyileştirilmesi önerilmiş, fakat kampanya tipi GPS ile elde edilebilecek çözümler için bir öneri getirilmemiştir.

Bu çalışmada; kampanya ölçülerinin yapıldığı zaman anlarındaki GPS zaman serileri analizi ile hesaplanan periyodik etkilerin ilgili zaman anlarına düzeltme olarak getirilerek daha gerçekçi hıza ulaşılması için uygun modeller ve kampanya çözümünden elde edilen hızların iyileştirilmesi için bir yol haritasının (yaklaşımın) elde edilmesi araştırılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, verileri herkese açık olan Ankara, İstanbul, Trabzon, Mersin, Gebze ve Antalya sabit GPS istasyonlarından alınan GPS verileri test verisi olarak seçilmiştir. İstasyonların dağılımı Şekil 5.1'de verilmektedir. Sonuçların daha küçük bir alanda değerlendirilebilmesi amacıyla, TÜBİTAK-MAM (Marmara Araştırma Merkezi) tarafından işletilen MAGNET (Marmara Sürekli GPS Gözlem Ağı) sabit GPS istasyonları kullanılmıştır. Bu çalışmanın kapsamını oluşturan 2006 yılı başına kadar olan GPS veri değerlendirmeleri tamamlanarak zaman serileri analizine hazır hale getirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde kabuk ve plaka hareketleri sonucu oluşan ve belirlenmek istenen tektonik hızla ilgili detaylı bilgi sunulmuştur. Hesaplamaların yapıldığı Uluslararası Yersel Referans Sistemi ve Ağının güncel durumu hakkında bilgi verilmiş ve doğrusal hızın nasıl hesaplandığından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde; tektonik hareketlerin zaman serileri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu aşamada, zaman serileri genel anlamda ele alınarak deprem öncesi, deprem esnası atımlar ve deprem sonrası hareketler incelenmiştir. Depremlerden etkilenen İstanbul ve Tübitak sabit GPS istasyonlarının yatay bileşenlerine kısa dönemli üssel bir gevşeme modeli uygulanarak deprem sonrası atımın genliği ve yarılanma ömrü belirlenmiştir. Bu şekilde zaman serileri analizi öncesi, bu etkiye maruz kalan verilerin analizden çıkarılması incelenmiş ve uygulanmıştır.

GPS zaman serilerinin stokastik gürültü özelliklerini araştırmak amacıyla; En Büyük Olabilirlik Analizi (EBOK) uygulanmıştır. EBOK analizinin başlıca amaçlarından birisi, tektonik hızın hatasının kestiriminde gerçekçi yaklaşımda bulunmaktır. Çünkü yalnızca beyaz gürültünün kabul edildiği ve diğer faktörlerin ihmal edildiği bir modelde, tektonik hızın belirsizliğinin daha küçük hesaplanarak yanlış bir kestirimde bulunma olasılığı bulunmaktadır. Diğer yandan serilerin, zamana bağlı olmayan durağan süreçler (beyaz gürültü) ve zamana bağlı durağan olmayan (renkli) süreçlerden hangi ölçüde etkilendikleri ve en uygun gürültü modelinin belirlenmesine çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde; zaman serileri analizinde kullanmak için Temel Bileşenler Analizi ve Spektral Analiz yöntemleri incelenmiştir. Temel Bileşenler Analizinin başlıca amacı, konumsal olarak dağılmış istasyonlar arasında ortak bazı sinyallerin olup olmadığını belirlemektir. Diğer önemli bir yararı ise verinin varyansındaki değişimi yeterli derecede temsil eden Temel Bileşenler dışındaki bileşenleri çıkartarak, verinin boyutunda azalma sağlamasıdır.

Boşluklu verilerin spektral analizi için bu amaca uygunluğu Langbein ve Johnson (1997), Zhang ve diğ. (1997) ve Mao ve diğ. (1999)'de de ifade edilen Lomb-Scargle algoritması, öncelikle sentetik veri ve gerçek veri üzerinde Fourier Tekniği ile karşılaştırması yapılarak test edilmiştir.

Beşinci bölümde; elde mevcut test verilerinin değerlendirilmesine geçilmiştir. GPS veri değerlendirmeleri GAMIT-GLOBK (V 10.2) yazılımı ile yapılmıştır. Öncelikle günlük çözümler oluşturulmuş ve daha sonra yine aynı yazılımla, global IGS istasyonlarından yararlanarak ITRF2000'de zaman serileri üretilmiştir. Bu aşamada yapılan diğer bir çalışma, zaman serileri içerisinden uyuşumsuz ve kaba hatalı ölçülerin ayıklanması olmuştur. MATLAB (V 6.5) ortamında hazırlanan yazılımla, En Küçük Kareler Dengelemesi kullanılarak dengeleme sonrası artıklara Pope Kaba Hata testi uygulanmıştır. Uyuşumsuz ölçü olarak tespit edilen veriler zaman serilerinden çıkarılarak analize hazır hale getirilmiştir.

Konumsal olarak dağılmış SGPS istasyonlarında ortak bazı sinyallerin varlığını araştırmak amacıyla, test verilerinden elde edilen zaman serilerine Temel Bileşenler Analizi uygulanmıştır. Daha sonra, zaman serileri içindeki anlamlı sinyallerin frekanslarını ve genliklerini istasyon bazında hesaplamak amacıyla GPS zaman serilerine Lomb-Scargle algoritması uygulanmıştır. Böylece, kampanya tipi GPS ölçü hızlarına düzeltme olarak getirilecek periyodik etkilerin hangilerinin modelleneceğine karar verilmiştir.

Altıncı bölümde; senelik ve altı aylık etkilerin, hem deformasyon ölçüleri hem de TUTGA hızlarına nasıl ilave edilebileceğine dair bir yöntem önerilmektedir. Bunun için öncelikle tüm sabit GPS istasyonlarının her üç bileşeni için hesaplanan senelik ve altı aylık etkiler, Türkiye geneli için 1˚x1˚ grid noktalarında enterpolasyonla belirlenmiştir. Ayrıca tek bir istasyondan elde edilen düşey yöndeki senelik etkinin mesafeye bağlı olarak kullanılabilirliği araştırılmış; son olarak SGPS istasyonlarından elde edilen senelik ve altı aylık etkilerin daha bölgesel bir kampanya alanında uygulanması için MAGNET istasyonlarında yatay ve düşey yöndeki hızların geliştirilmesi araştırılmıştır.

Son bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlara ilişkin bir değerlendirme yapılarak, Türkiye genelinde ve bölgesel olarak nasıl uygulanabileceğine ilişkin yatay ve düşey hızlar için bir değerlendirme örneği geliştirilmiştir ve önerilmektedir.

# 2. TEKTONİK HAREKETLER VE HIZLAR

Jeodinamik, oldukça geniş ve hızlı gelişen bir alandır. Uydu jeodezisinden elde edilen sonuçlar, bu alana önemli katkıda bulunmaktadır. Güncel levha hareketleri, yersel veya uzay teknikleri tabanlı jeodezik ölçmelerle doğrudan izlenebilmektedir. Yersel ölçmeler klasik fakat oldukça hassas sonuçlar veren elektronik-lazer ölçme cihazlarıyla yapılmaktadır. Levha hareketleri global boyutlarda olduğu için en iyi şekilde uydu tabanlı yöntemlerle belirlenmektedir.

## 2.1 Kabuk Hareketleri

Uydu tabanlı jeodezik konumlama tekniklerinin doğruluğunun artmasıyla, kampanya tipi veya sürekli gözlemler ile tektonik levha kinematiği üzerinde bilgi edinmek mümkün olmaktadır. Levha tektoniği modeline göre, yer kabuğu birbirine göre hareket eden katı levhalara bölünmüştür. Levhalar sürekli olarak okyanus sırtları boyunca hareket etmektedirler. Levhalar arasındaki çarpışma bölgelerinde dağ sıraları, derin deniz çukurları ve ada dizileri oluşur. Deniz çukurlarında, "batma" olarak adlandırılan bir süreçle, bir levha diğerinin altına girerek batma bölgeleri oluşur. Levha sınırları sismik aktivite ile tanımlanırlar ve aynı zamanda volkanlarla da karakterize edilebilirler.

Bu bağlamda, çeşitli büyük tektonik levhalar belirtilebilir: Pasifik, Kuzey Amerika, Güney Amerika, Avrasya, Hindistan, Afrika, Avustralya ve Antarktika levhaları. Bunlara ilave olarak, Karayipler, Nazka, Kokos ve Arap levhaları gibi çeşitli küçük levhalar da mevcuttur. Levha hareketlerinin toplam modeli oldukça karmaşıktır ve özellikle okyanuslar içinde kısa ömürlü mikro-levhaların oluşmasına neden olmaktadır. Söz konusu levhaların kinematik davranışları hakkındaki detaylı bilgi, mekanizmalarının anlaşılmasına temel teşkil eder ve sismik aktivitenin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunur. Aynı zamanda yersel referans koordinat sistemlerinin yaşatılmasında da büyük öneme sahiptir.

Global tektonik levha modelleri, jeolojik, paleomanyetik ve sismik araştırmalar temel alınarak oluşturulabilir ve büyük zaman periyotlarındaki birikmiş hareketlerden türetilebilirler. Genel olarak bilinen bir model, Jordan Minster tarafından yayınlanmış ve çeşitli zamanlarda iyileştirilmiştir. Bu modeldeki hızlar 1 cm/yıl ile 10 cm/yıl arasında değişmektedir. Modern uydu teknikleri yardımıyla bu tahminlerin ispatlanması mümkün olmuştur ve levha hareketlerinin günümüzde devam edip etmediği kontrol edilebilmektedir. 1980'den beri yapılan çalışmalar, birkaç yıllık ortalamayla elde edilen jeodezik ölçmeler ile hesaplanan tektonik levha hareketlerinin, birkaç milyon yıla orantılanarak elde edilen jeolojik ölçmlerle bulunan tektonik levha hızlarına eşit olduğunu göstermiştir. Levha hızları için kullanılan jeodezik yöntemler aşağıdadır:

- Çok uzun baz interferometrisi (Very Long Baseline Interferometry-VLBI),
- Uydu lazer ölçmeleri (Satellite Laser Ranging-SLR),
- Global konumlama sistemi (Global Positioning System-GPS) ölçmeleri,
- DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositionig Integrated by Satellite) gözlemleri.

## 2.2 Levha Hareketi

Tektonik levha hareketi, $\Omega_x$, $\Omega_y$, $\Omega_z$ bileşenlerinden oluşan bir kartezyen dönme vektörü ile tanımlanabilir. Levha hareketini tanımlayan mutlak bir referans sistemi üretmek için, katı mezosfere göre dönen litosferik levhaların açısal momentumlarının sıfır olduğu bir koşul (yerin dönme ekseninin değişmemesi koşulu) tanımlanabilir. Bu koşul, *no-net-rotation* olarak adlandırılmaktadır. Çoğunlukla kullanılan ve bu koşul temel alınarak kullanılan model NNR-NUVEL-1A (DeMets ve diğ., 1994) modelidir. Bu model aynı zamanda IERS tarafından da kullanılmaktadır. Söz konusu model, elde hiçbir nokta hız bilgisi olmadan, eski nokta konumlarından yeni nokta konumlarının üretilmesinde kullanılabilmektedir. NNR-NUVEL-1A kinematik modeline göre levhalar için kartezyen dönme vektörü bileşenleri Çizelge 2.1'de verilmiştir (McCarthy, 2000).

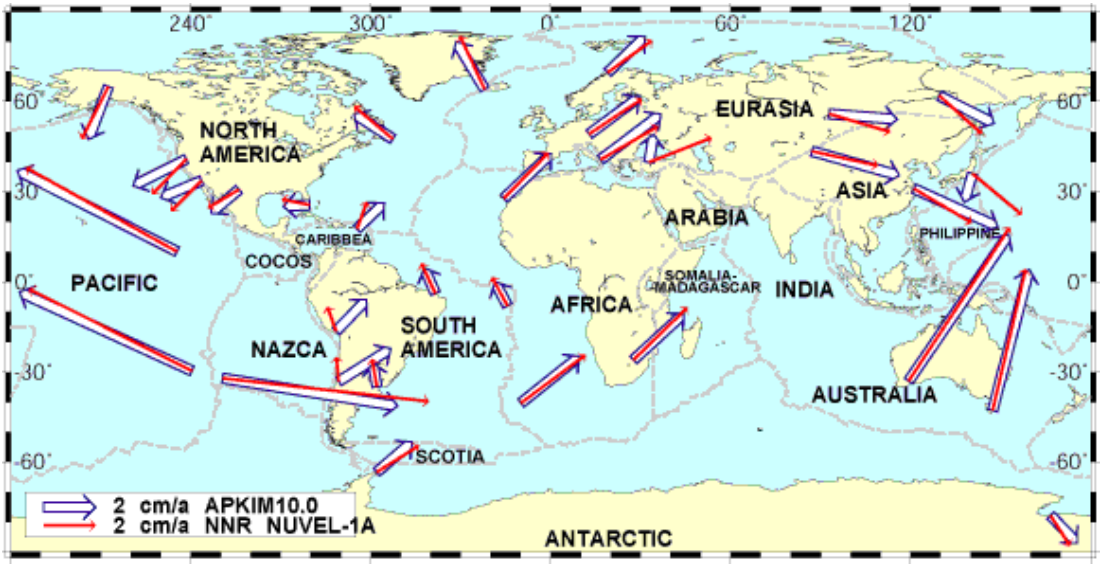
NUVEL-1A modeli, yaklaşık son 3 milyon yıldaki manyetik deniz tabanı-saçılımı anomalilerini esas almaktadır ve yalnızca katı levhaları kapsamaktadır. Bu modele

alternatif bir yaklaşım, VLBI, SLR ve GPS gibi güncel jeodezik gözlemlerden Gerçek Levha Kinematiği ve Deformasyon Modeli (Actual Plate Kinematic and Deformation Model – APKIM) oluşturmaktır. En son çözüm olan APKIM2000'in çözümünde, 12 levha dönme vektörünün hesaplanması için yaklaşık 280 nokta hızı kullanılmıştır. Dengeleme süreci, katı levhalar ile deformasyon bölgelerinin ayrılmasını sağlamaktadır. Genel olarak APKIM2000 ile NUVEL-1A modelleri arasındaki uyum oldukça yüksektir. Şekil 2.1 jeofiziksel model NNR-NUVEL-1A ve gerçek kinematik levha modeli APKIM modellerine göre oluşturulan levha hızlarına ilişkin fikir vermektedir.

Levhalar arasında kalan deformasyon bölgelerindeki hızların belirlenmesinde daha fazla rastlantısal etkiler ve belirsizlikler vardır.

**Çizelge 2.1:** NNR-NUVEL-1A kinematik modeline göre levhalar için kartezyen dönme vektörü bileşenleri (McCarthy, 2000).

| Levha | $\Omega_x$ (rad/My.) | $\Omega_y$ (rad/My.) | $\Omega_z$ (rad/My.) |
|---|---|---|---|
| Pasifik | -0.001510 | 0.004840 | -0.009970 |
| Kokos | -0.010425 | 0.021605 | 0.010925 |
| Nazka | -0.001532 | -0.008577 | 0.009609 |
| Karayipler | -0.000178 | -0.003385 | 0.001581 |
| Güney Amerika | -0.001038 | -0.001515 | -0.000870 |
| Antarktika | -0.000821 | -0.001701 | 0.003706 |
| Hindistan | 0.006670 | 0.000040 | 0.006790 |
| Avustralya | 0.007839 | 0.005124 | 0.006282 |
| Afrika | 0.000891 | -0.003099 | 0.003922 |
| Arabistan | 0.006685 | -0.000521 | 0.006760 |
| Avrasya | -0.000981 | -0.002395 | 0.003153 |
| Kuzey Amerika | 0.000258 | -0.003599 | -0.000153 |
| Juan de Fuca | 0.005200 | 0.008610 | -0.005820 |
| Filipin | 0.010090 | -0.007160 | -0.009670 |
| Rivera | -0.009390 | -0.030960 | 0.012050 |
| Scotia | -0.000410 | -0.002660 | -0.001270 |




**Şekil 2.1:** Ana levha sınırları ve beklenen hızlar (DGFI). Tektonik levha hareketlerinin jeodezik yöntemlerle belirlendiği APKIM10 modeli, jeolojik-jeofiziksel bir model olan NNR-NUVEL-1A'dan, özellikle levha sınırlarında önemli farklılıklar göstermektedir. (Güney Amerika, Akdeniz, Japonya)

## 2.3 Yerin Dönmesi, Referans Sistemleri ve IERS

Yersel referans sistemlerinin oluşturulması ve yer dönme modelleri için uydu gözlem tekniklerinin kullanımı her geçen gün artış göstermektedir. Geçen yüzyılın başından itibaren, kutup hareketi ve yerin dönüşü, uluslar arası kuruluşlar tarafından temel astronomik gözlem aletleriyle belirlenmektedir. Uluslar arası Kutup Hareketi Servisi (International Polar Motion Service-IPMS) ve Uluslar arası Zaman Bürosu (Bureau International de L'Heure-BIH) bu konuda sorumlu kuruluşlar olmuşlardı. Global olarak dağılmış yaklaşık 50 istasyon astrometrik gözlem aletleriyle düzenli olarak katkıda bulunmuşlardır.

ITRF2000, dünya üzerinde yaklaşık 500 noktada kurulmuş yaklaşık 800 istasyonda yapılan ölçmeler temel alınarak oluşturulmuştur. Çözümler, VLBI, LLR, SLR, GPS ve DORIS gözlemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Datum tanımlaması aşağıdaki şekilde yapılmıştır:

- Yer başlangıç merkezi hızı en kararlı SLR çözümlerinden üretilmiştir.
- Ölçek ve hızı VLBI ve SLR gözlemlerinden hesaplanmıştır.

- Dönüklük ITRF97'ye yönlendirilmiş ve hızı NUVEL-1A'ya göre no-net-rotation koşulunu sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

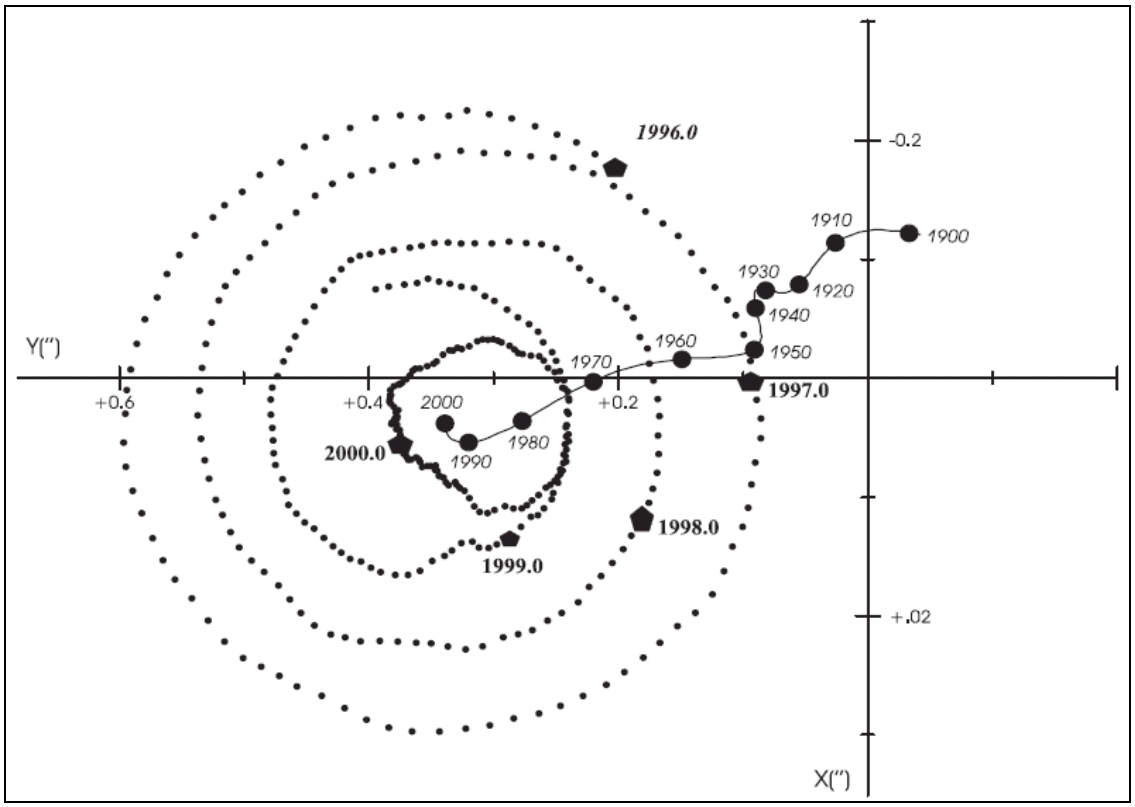
ITRF2000'in uzun dönemli kararlılığının, başlangıç merkezinin 4 mm'den ve ölçeğin 0.5 ppb'den daha iyi olacağı tahmin edilmektedir.

Yer dönme parametreleri, VLBI, SLR ve GPS gözlemlerinden hesaplanmaktadır. Çizelge 2.2 her tekniğin çözüme olan katkı miktarını göstermektedir. Açıkça görülmektedir ki, kutup hareketi ve yer dönmesindeki değişimlere en önemli katkıyı GPS gözlemleri yapmaktadır. Çizelge 2.2'deki LOD parametresi (Günün uzunluğu), astronomik gün ile atomik gün arasındaki farkı ifade etmektedir.

**Çizelge 2.2:** Sonuç IERS Yer Dönme Parametrelerine İlgili Uydu Tekniklerinin Katkıları (IERS,2001).

| Teknik | Kutup Gezinmesi (%) | UT1-UTC (%) | LOD (%) | Nutasyon Kayıklığı (%) |
|---|---|---|---|---|
| IERS VLBI | 20 | 100 | 10 | 100 |
| IERS SLR | 10 | - | - | - |
| IERS GPS | 70 | - | 90 | - |

1996 ve 2000 yılları arasındaki kutup gezinmesi ve son yüzyıl için ortalama kutup kayıklığı Şekil 2.2'de verilmiştir. Ürünlerinin daha geniş bir spektrumu yansıtması amacıyla, Nisan 2003'de IERS'in ismi International Earth Rotation and Reference Systems Service olarak değiştirilmiştir.




**Şekil 2.2:** 1996-2000 yılları arasındaki kutup gezinmesi ve 1900-2000 yılları arasındaki ortalama kutup kayıklığı (IERS, 2000).

## 2.4 Uluslararası Yersel Koordinat Referans Sistemi

Yer dinamiklerinin incelenmesi çalışmaları amacı için kabuk deformasyonlarının gözlemlenmesi, farklı bölge, zaman ve farklı gözlem teknikleri ile gerçekleştirilen ölçülerin global bir referans sisteminde ifade edilmesine ihtiyaç duyar. Bu tür uygulamalar için genellikle, yer yüzeyi ile beraber dönen bir yersel referans sistemi en uygun modeli oluşturmaktadır. Tüm modern jeodezik çalışmalar için seçilen özel yersel referans sistemi, 1988'den beri Uluslararası Yer Dönme Servisi (International Earth Rotation Service, IERS) tarafından yaşatılan Uluslararası Yersel Referans Koordinat Sistemi (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) olarak adlandırılmaktadır (Boucher ve diğ., 1999; Altamimi ve diğ., 2002).

IERS ITRF'i oluşturmak için, ağırlıklandırılmış Helmert dönüşümü içerisinde bütün varyans-kovaryans bilgisini kullanarak çeşitli uzay jeodezisi teknikleri ile belirlenmiş istasyon koordinat ve hızlarını birleştirmektedir (Boucher ve diğ., 1999). ITRF'i üretmek için kullanılan çözüm türleri Çok Uzun Baz Enterferometrisi (Very Long

Baseline Interferometry, VLBI), Ay ve Uydu Laser Ölçmeleri (Lunar Laser Ranging, LLR; Satellite Laser Ranging, SLR), Uydular üzerinde Dopler Yörünge Belirlemesi ve Radyo Konumlama Entegrasyonu (Doppler Orbit Determination and Radio Positioning Integrated on Satellites, DORIS) ve GPS'tir. Sayısız gözlem teknikleri ve analiz merkezlerinden sağlanan verilerin değerlendirilmesi ile birleştirilmiş çözümdeki bağımsız hatalar ayrı ayrı çözümlerdeki hatalardan küçük olacaktır. Aynı zamanda söz konusu birleştirme, her ölçü türünün hassasiyetinin ölçeklendirilmesi için bir araç teşkil etmektedir (Altamimi ve diğ., 2002).

ITRF tarafından gerçekleştirilen Uluslararası Yersel Referans Sistemi (International Terrestrial Referance System, ITRS), merkezi, ölçeği, eksen dönüklükleri ve dönüklük hızları ile tanımlanmaktadır. Üç boyutlu kartezyen koordinat eksenlerinin yönlendirilmesi; z ekseni 1900-1905 yılları arasındaki ortalama kutup hareketi ile çakıştırılmakta, x ekseni ve z ekseni Greenwich meridyeni düzleminde yer almaktadır. Geleneksel olarak, dönüklük hızı litosfere göre yatay hareketler için no-net-rotation koşulunu (inersiyal sistemin temel koşulu olarak; dönmelerin olmadığı, sadece öteleme hareketi) sağlamaktadır. Bu koşul NNR-NUVEL-1A modeline göre koordinat eksenlerinin yönlendirilmesi ile karşılanmaktadır (DeMets ve diğ., 1994). ITRS'in merkezi tüm dünyanın (okyanuslar ve atmosfer de dahil) dinamik ağırlık merkezi seçilmiştir ve SLR ölçüleri kullanılarak belirlenmektedir. Sistemin ölçeği ise VLBI ve SLR çözümlerinin birleştirilmesi ile belirlenmektedir.

ITRS, tüm dünyaya dağılmış istasyonların uygun olanlarının kartezyen XYZ koordinatları ve hızları ile gerçekleştirilmektedir. Sürekliliği sağlamak için IERS, her yeni birleştirilmiş çözümün eksenlerini bir önceki çözümün eksenlerine yönlendirmektedir. En son sürüm olan ITRF2000 Mart 2001'de yayınlanmıştır. Bununla birlikte bu analizin sonuçları 52 istasyonla temsil edilen ve bir önceki çözüm olan ITRF97'e bağlanmıştır (Boucher ve diğ., 1999).

IERS'in 1991'de yaptığı ilk GPS ölçmeleri, yeterli yoğunlukta kurulmuş bir ağda yüksek kalitede jeodezik konumlamalar sağlayabileceğini göstermiştir. 3 hafta süren kampanya 22 Ocak ve 13 Şubat 1991 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan noktaların çoğuna daha sonraları ITRF'i oluşturacak olan sabit GPS istasyonları kurulmuştur. 1991 yılında kurulmasına başlanan sabit GPS istasyonları dünya üzerinde oldukça seyrekti. Global sabit GPS istasyonları ağının kademeli

olarak sıklaştırılması, referans koordinat sisteminin zamana bağlı olarak sürekli değiştiğini vurgulamaktadır.

## 2.5 GPS Verilerinden Doğrusal Tektonik Hızın Hesaplanması

Bu çalışmada, levha hareketlerinden dolayı oluşan güvenilir ve gerçekçi doğrusal tektonik hıza ulaşılabilmesi için, GPS verilerinden elde edilen nokta konumları ve hızları incelenmektedir. Tektonik hızın belirlenmesi için bir diğer yöntem jeolojik ölçmelerdir. Bu yöntemde, arazide yapılan doğrudan ölçmelerle ve daha uzun bir zaman ölçeğinde levha hareketleri incelenebilmektedir. Uydu tabanlı ölçmeler ise çok çeşitli etkilere maruzdur. Bu etkilerin (atmosferik modeller, gel-git modelleri, okyanus yüklemesi, atmosferik yükleme, yörünge denklemleri için radyasyon modeli vb.) çoğu modellenebilmekte ve GPS veri değerlendirme yazılımlarının içinde bulunmaktadır. Modellenemeyen bazı etkiler ise hata olarak GPS zaman serilerinin içerisinde yer almakta ve bunlar çeşitli analiz yöntemleri ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmada, zaman serilerinin içinde yer alan periyodik sinyallerin karakterleri araştırılarak zaman serilerinden elde edilen doğrusal tektonik hızın geliştirilmesi ve aynı zamanda kampanya tipi ölçülerle belirlenen hızın iyileştirilmesi için bir yöntem araştırılmaktadır.

IERS sorumluluğunda üretilen ITRF sistemlerinde, nokta hızlarının da kullanıldığı dinamik bir yaklaşım mevcuttur. Yer kabuğu üzerindeki sabit bir noktanın t zaman anındaki anlık gerçek konumu ($\vec{X}(t)$) ve düzenlenmiş (Regularized) konumunu ($\vec{X}_R(t)$) ilişkilendiren genel model aşağıdaki gibidir (McCarthy ve Petit, 2003):

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_R(t) + \sum_i \Delta \vec{X}_i(t) \qquad \textbf{(2.1)}$$

Düzenlenmiş konumun ortaya konulmasının amacı; düzenli zaman değişimleri içeren bir koordinat elde etmek için, geleneksel düzeltmeleri ($\Delta\vec{X}_i(t)$) kullanarak yüksek frekanslı zaman değişimi (başlıca jeofiziksel etkileri) etkilerinin çıkarılmasıdır. Bu durumda $\vec{X}_R$, modeller ve sayısal değerler kullanılarak hesaplanabilmektedir. $t_o$ referans zaman anındaki koordinat ve hızı içeren aşağıdaki sonuç model doğrusaldır:

$$\vec{X}_R(t) = \vec{X}_o + \vec{X}.(t\text{-}t_o) \quad \textbf{(2.2)}$$

Yukarıdaki eşitlikte sayısal değerler $\vec{X}_o, \vec{X}$'dir. ITRF88 ve ITRF89 oluşturulduğu dönemlerde; tektonik levha hareketi modelinden türetilen geleneksel düzeltme değerleri ile birleştirilmiş şekilde, doğrusal hareket modeli için sabit sayısal değerler kullanılmıştır. Günümüzde kullanılan modeller ise katı Yer gel-gitleri, okyanus yüklemesi, kutup gel-gitleri, atmosferik yükleme ve yer merkezi hareketidir (McCarthy ve Petit, 2003).

Harita Genel Komutanlığı tarafından oluşturulan TUTGA noktalarında yapılan GPS ölçüleri BERNESE V4.0 ve GLOBK V10.03 yazılımları ile değerlendirilmiştir. GPS oturumlarındaki ölçülerin değerlendirilmesi ve yıllık çözümler BERNESE V4.0 yazılımı, bu çözümlerin birleştirilmesi, nokta koordinat ve hızlarının hesaplanması ise GLOBK V10.03 yazılımı ile yapılmıştır. TUTGA'yı ITRF referans sisteminde tanımlamak amacıyla Türkiye ve yakın çevresinde Avrupa ve Asya'da uygun dağılımdaki dokuz IGS noktası (ANKR, MATE, ONSA, WTZR, ZWEN, MADR, NICO, KIT3, BAHR) hesaplamalara dâhil edilmiştir (TUTGA 99A).

TUTGA-99 GPS kampanyaları ile birlikte 1992-1999 yılları arasında Harita Genel Komutanlığının çeşitli yurt dışı kuruluşlarla yürüttüğü jeodinamik amaçlı ortak projeler ve Harita Genel Komutanlığının kendi projeleri kapsamında ölçmesi yapılan toplam 23 GPS kampanyası GLOBK yazılımı ile birleştirilerek, TUTGA-99 nokta koordinatları ve inter-sismik hızları belirlenmiştir. Kalman Filtrelemesi yöntemini kullanan GLOBK yazılımı ile farklı zaman anlarında elde edilen nokta koordinatları, noktaların inter-sismik hızları kullanılarak 1998.0 zaman anına kaydırılmıştır. Bu GPS kampanyalarında toplam 171 noktada periyodik ölçü yapılmış olup bu noktalardan 96 tanesi aynı zamanda TUTGA-99 noktasıdır (TUTGA 99A).

Doğrusal tektonik hız, levhaların birbirine göre hareketi ile oluşan yatay ve düşey koordinat farklılıklarının zaman (yıl) ile orantılanmasından oluşmaktadır. Ayrıca bölgesel olarak yapılan bir deformasyon çalışmasında, levha hareketlerinden farklı olarak ölçülen (kayma, çökme vb.) koordinatlar arasındaki farkların zamanla orantılanmasından, deformasyon hızı belirlenmektedir. Genel olarak GPS veri değerlendirme yazılımlarında koordinatları etkileyen bazı fiziksel etkiler otomatik olarak veya seçime bağlı olarak verilmektedir. Örneğin bu etkiler;

- Atmosferik modeller,
- Yer dönme parametreleri,
- Gel-git modelleri (yer, kutup, okyanus, atmosfer),
- Yörünge denklemleri için radyasyon modeli,
- Okyanus yüklemesi ve atmosferik yükleme,

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

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

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

$$V = \frac{X(t_2) - X(t_1)}{t_2 - t_1} \qquad \textbf{(2.3)}$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada;

V : Doğrusal hız (mm/yıl)

$t_1$, $t_2$ : Ölçü zaman anları (yıl)

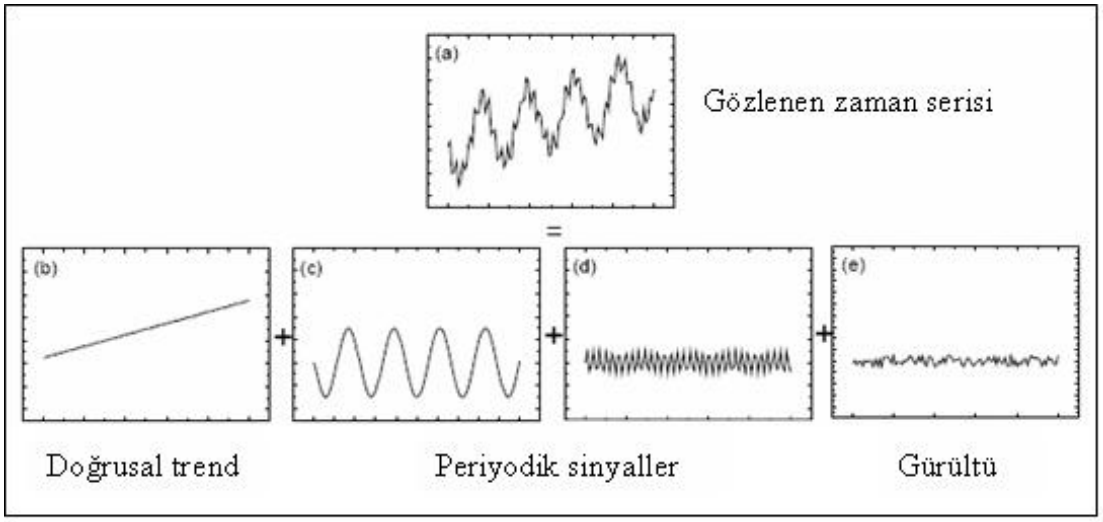
$X(t_1)$, $X(t_2)$ : İlgili zaman anlarındaki koordinat değerleri (mm)

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

GPS hızları, ilgili zaman anlarında belirlenen koordinat değerlerinden doğrudan etkilenirler. GPS değerlendirme yazılımı içerisinde herhangi bir jeofiziksel etki model olarak verilmemişse, o etki koordinat değerine ve dolayısıyla hız vektörüne doğrudan hata olarak gelmektedir.

# 3. GPS ZAMAN SERİLERİNE GENEL BİR BAKIŞ

GPS zaman serileri analizinin başlıca amacı doğrusal tektonik hızın ve hatasının en doğru bir şekilde belirlenebilmesini sağlamaktır. Şekil 3.1 gözlenen zaman serilerini ve bileşenlerini göstermektedir (Pytharouli ve diğ., 2004).




**Şekil 3.1:** Gözlenen zaman serilerinin bileşenleri (Pytharouli ve diğ., 2004).

## 3.1 Zaman Serilerinin Genel Yapısı

Tektonik olarak aktif bölgelerdeki kabuk deformasyonu genellikle dört aşamalı bir döngüden oluşur: deprem öncesi (intersismik), deprem hemen öncesi (pre-sismik), deprem esnası (ko-sismik) ve deprem sonrası (post-sismik) (Wdowinski ve diğ., 1997).

Deprem esnası atımı: Deprem esnası atımı belirlemek için Blewitt ve diğ. (1993) ve Bock ve diğ.(1993)'de benimsenen yaklaşım, deprem öncesi ve sonrası yaklaşık 30 günlük verinin ortalamasını alıp bu iki ortalamanın farkını almaktır. Böyle bir durumda bir aylık bir deprem öncesi hız göz ardı edilmektedir. Bu yaklaşım herhangi bir deprem sonrası deformasyon için karışık görünmektedir. Bu durumda, deprem

esnası atım, toplam yer değiştirmeden deprem sonrası yer değiştirme çıkarılarak hesaplanabilir. Yine de toplam yer değiştirmenin hesaplanması depremden sonra veri ve deprem öncesi ve sonrası günlük konumlardan doğrusal hızın çıkarılması ve deprem sonrası deformasyondan etkilenen verilerin çözümden çıkarılmasıyla yapılmaktadır. Bu nedenle, deprem esnası atımın belirlenmesi için daha genel ve dikkatli bir yaklaşım, depremden önceki ve sonraki veri setlerinden en uygun eğilimin alınmasıyla veya diğer bir deyişle deprem öncesi deformasyonun hesaplanmasıyla olacaktır.

Deprem esnası deformasyonun belirlenmesi doğrusal regresyon problemi şeklinde formüle edilebilir. Deprem esnası deformasyonu, deprem öncesi ve sonrası zaman serilerine uydurulan doğruların x ekseninin sıfır olduğu noktadaki y ekseni değerlerinin, başka bir deyişle kayıklık değerlerinin farklarının alınmasıyla oluşturulur. Bu noktada, deprem sonrası (post-sismik) deformasyondan etkilenen verilerin hesaplamaya dahil edilmemesi gerekir (Wdowinski ve diğ., 1997).

$$\Delta_{kosismik} = X_{o(\text{deprem sonrası})} - X_{o(\text{deprem öncesi})} \quad \textbf{(3.1)}$$

Zhang ve diğ., (1997) deprem esnası atımın varyansının yaklaşık olarak

$$\sigma^2_{kosismik} = \left.\frac{4a_1^2}{N_1}\right|_{\text{depremöncesi}} + \left.\frac{4a_2^2}{N_2}\right|_{\text{depremsonrası}} \quad \textbf{(3.2)}$$

göstermişlerdir.

Yukarıdaki eşitlikte “a” 24 saatlik GPS gözlemlerinin korelasyonsuz konum hatasını ve “N” günlük ölçülerin sayısını göstermektedir. 1 ve 2 indisleri sırasıyla deprem öncesi ve deprem sonrası değerlerini göstermektedir. Deprem öncesi ve sonrası 50 günlük veri için düşük frekanslı gürültünün toplam etkisi az olacağından bu hesaplamalarda göz ardı edilebilir. Bu formülasyon deprem öncesi ve deprem sonrası intersismik deformasyon hızının sabit olduğunu (eşit olmasını gerektirmez) ve deprem öncesinde herhangi bir deformasyonun olmadığını kabul eder (Wdowinski ve diğ., 1997).

## 3.2 Deprem Sonrası (Post-sismik) Yer Değiştirmeler

Deprem sonrası deformasyonun oldukça önemli bir kısmı, uzun dönemli doğrusal bir eğilimin üzerine yerleşmiş kısa dönemli üssel bir gevşeme ile ifade edilebilmektedir (Wdowinski ve diğ., 1997). Bu modelin matematiksel tanımı:

$$y(t) = a + b(t - t_{dep}) + c.e^{\left[-(t-t_{dep})/\tau\right]} \qquad \textbf{(3.3)}$$

olarak alınabilir. Burada;

y(t) : Göreli konum

t : Deprem anından itibaren ölçülen zaman.

$t_{dep}$ : Deprem zamanı (17 Ağustos depremi için 1999.6288 zaman anı)

a : Kayıklık (Doğrunun x eksenini kestiği nokta)

b : İstasyonun doğrusal hızı

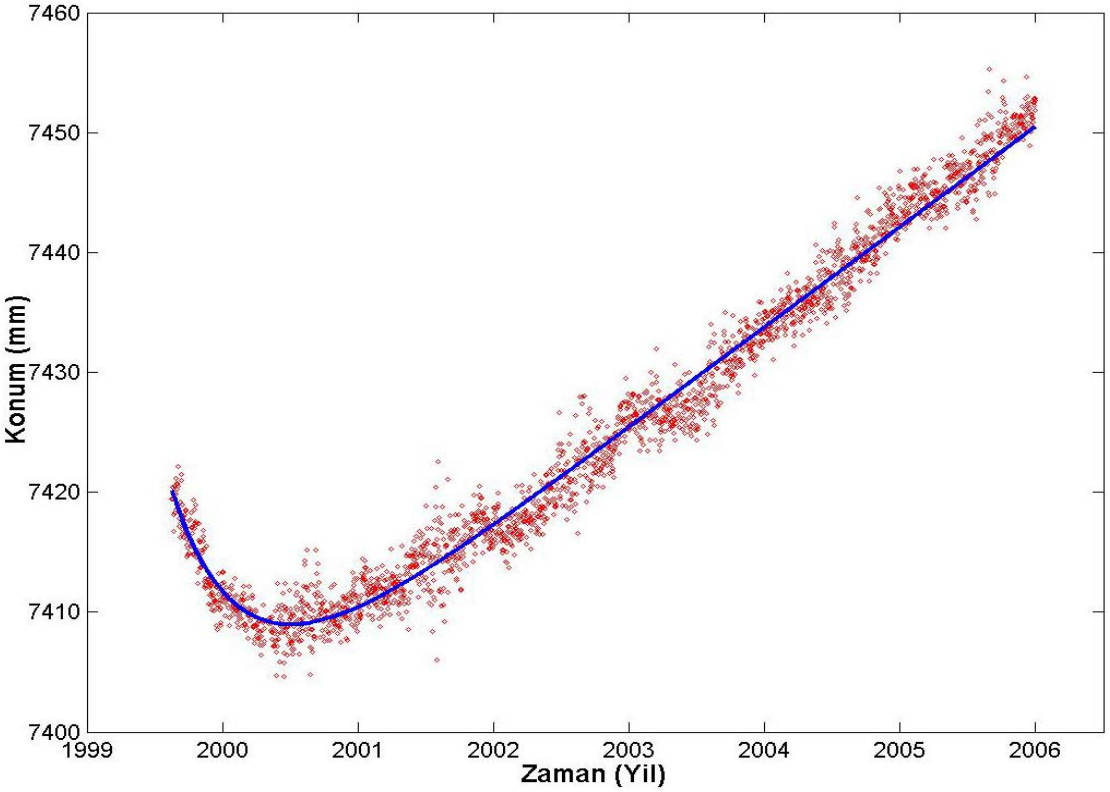
c : Deprem sonrası deformasyonun şiddeti

$\tau$ : Yarılanma ömrü

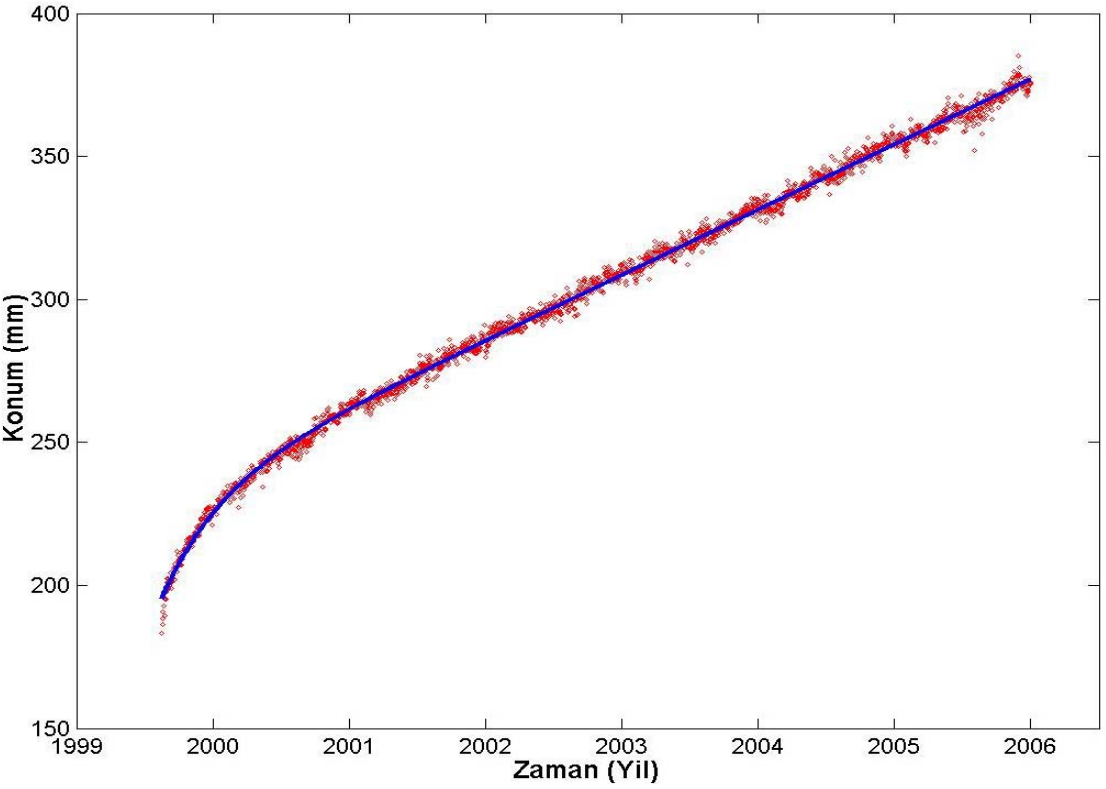
anlamındadır. Bu çalışma kapsamındaki sabit GPS istasyonlarından, 17 Ağustos depreminden etkilenenlerin zaman serilerinde, deprem sonrası etkiye maruz kalan istasyonlar ve bileşenleri öncelikle gözle yapılan kontrolde tespit edilmiştir. Daha sonra yukarıdaki matematiksel model ile en küçük kareler dengelemesi yapılarak söz konusu verilere uygun bir eğri geçirilmiştir. Deprem sonrası modelleme sonuçları Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Yine Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de zaman serileri ve model birlikte çizdirilmiştir.

**Çizelge 3.1:** Deprem sonrası modelleme ile bulunan sonuçlar.

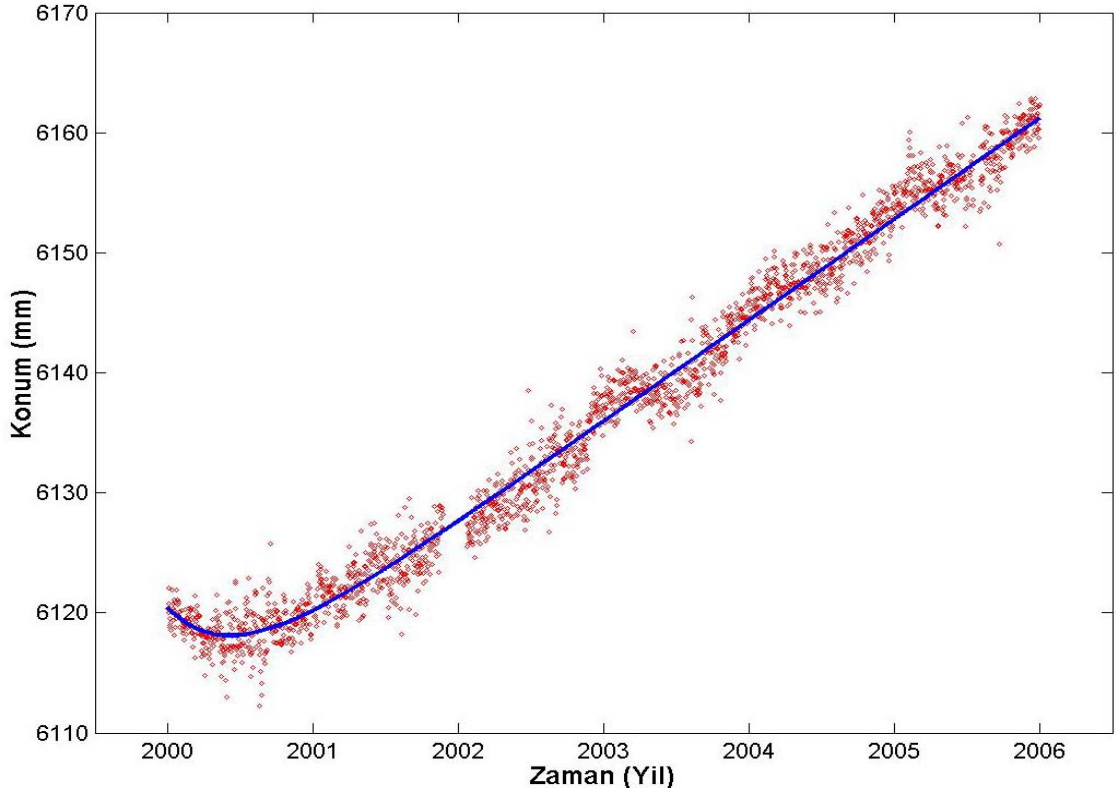
| İST. | KUZEY-GÜNEY | | | | DOĞU-BATI | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Def.Şiddeti (C) (mm) | $\sigma_C$ (mm) | Yarılanma Ömrü ($\tau$) (Gün) | $\sigma\,\tau$ (Gün) | Def.Şiddeti (C) (mm) | $\sigma_C$ (mm) | Yarılanma Ömrü ($\tau$) (Gün) | $\sigma\,\tau$ (Gün) |
| TUBI | 22.95 | ± 0.25 | 196 | ± 3.4 | -35.95 | ± 0.36 | 155 | ± 2.4 |
| ISTA | 22.25 | ± 1.28 | 166 | ± 7.1 | - | - | - | - |




**Şekil 3.2:** TUBI istasyonu kuzey-güney bileşenine ait deprem sonrası deformasyon ve üssel modellemesi




**Şekil 3.3:** TUBI istasyonu doğu-batı bileşenine ait deprem sonrası deformasyon ve üssel modellemesi




**Şekil 3.4:** ISTA istasyonu kuzey-güney bileşenine ait deprem sonrası deformasyon ve üssel modellemesi

## 3.3 GPS Zaman Serilerinin Gürültü Özellikleri

Yüzey deformasyonları veya gerilim birikimlerinin hesaplanması için yapılan jeodezik ölçülerin kullanıldığı jeofiziksel çalışmalar, sadece ilgili parametrelerin doğru tahminini değil aynı zamanda bu parametrelerin hatalarının da doğru tahmin edilmesini gerektirmektedir (Mao ve diğ., 1999).

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

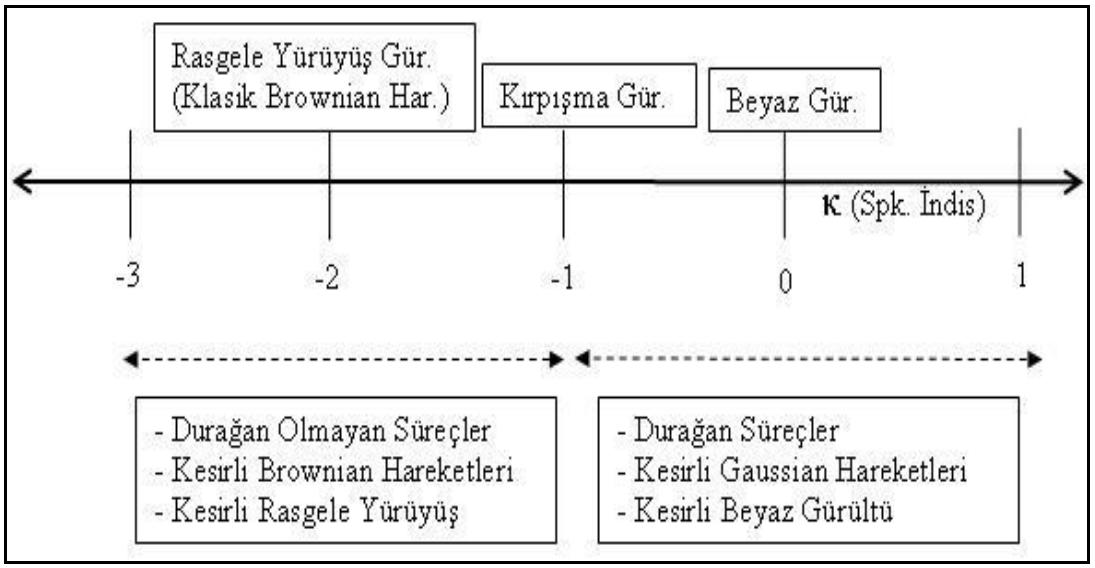
$$P_x(f)=P_o( f / f_o )^{\kappa} \quad \textbf{(3.4)}$$

f : Frekans.

$P_o$ , $f_o$ : Normalizasyon sabitleri.

$\kappa$ : Spektral indeks. Güç spektrumun logaritma-logaritma diyagramındaki eğimi.

Tabiat olayları ile meydana gelen süreçler yüksek frekanslarla karşılaştırıldığında, düşük frekanslarda daha çok gürültü oranına sahiptirler ve $-3 < \kappa < -1$ aralığında değişen negatif indis değerlerine sahiptirler. Bu şekildeki $\kappa = -2$ spektral indekse sahip durağan süreçler, klasik Brownian hareketi de (veya rastgele yürüyüş) dahil olmak üzere "Kesirli Brownian Hareketleri" olarak adlandırılırlar. Beyaz gürültünün (white noise, $\kappa = 0$) özel bir halini de içeren ve $-1 < \kappa < 1$ spektral indeks aralığında yer alan durağan süreçler "Kesirli Gaussian Süreçleri" olarak adlandırılırlar. "Kırpışma Gürültüsü" (flicker noise) olarak adlandırılan $\kappa = -1$ özel spektrum durumuna sahip süreçler genel olarak, güneş lekeleri değişimi, yerin kendi ekseninin durağansızlığı, yer altı suları ve atomik saatlerin ölçtüğü zamandaki hataları kapsayan geniş kapsamlı dinamik süreçler içerisinde gözlenmektedir (Mandelbrot, 1983). Zaman serilerindeki gürültülerin spektral indeks ekseni üzerindeki yerleri Şekil 3.5'de verilmiştir.




**Şekil 3.5:** Zaman serilerindeki gürültülerin spektral indeks ekseni üzerindeki yerleri.

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

yüksek frekanslı GPS verileri de aynı zamanda Beyaz+Kırpışma gürültüsü sergilemektedir (Nikolaidis, 2002).

Çeşitli çalışmalar, aynı zamanda GPS verileri içerisindeki Rastgele Yürüyüş Gürültüsü önemine dikkat çekmektedirler. Toprak ve havadan birikerek oluşan etkiler, jeodezik noktayı daha derin ve katı yerkabuğundan farklı hareket ettirirler (Langbein ve Johnson, 1997). Rastgele Yürüyüş Gürültüsünün tespit edilip edilememesi zaman serilerinin uzunluğuna, örnekleme frekansına ve diğer gürültü bileşenlerinin genliklerine bağlıdır. Rastgele Yürüyüş hatası, Wyatt (1982 ve 1989)'ın çalışmalarında sürekli gerilim-ölçer verisinde, iki renkli elektronik jeodezik ölçme cihazı verisinde (Langbein ve Johnson, 1995) ve 50 metrelik çok kısa baz uzunluğuna sahip GPS verisinde (Johnson ve Agnew, 2000) tespit edilmiştir. Rastgele yürüyüş hatalarının genlikleri bazı jeodezik veriler için 3 mm / $\sqrt{\text{yıl}}$ kadar yüksek olabilmektedir (Johnson ve Agnew, 1995). Bununla birlikte bu tip etkiler, Güney Kaliforniya'da kurulan temeli oldukça derine atılmış ve yanlardan desteklenmiş GPS istasyonlarında olduğu gibi çok dikkatli tasarlanan istasyonlarla azaltılabilmektedir (Wyatt, 1989; Bock ve diğ., 1997). Bu şekilde inşa edilen yapılarla, örneğin 50 metrelik PFO bazı için rastgele yürüyüş hatasının genliği sadece 0.4 mm / $\sqrt{\text{yıl}}$ bulunmuştur (Johnson ve Agnew, 2000).

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

Çizelge 3.2'de Dong ve diğ. (2002), istasyon koordinatlarında gözlenen yıllık düşey değişimlere, jeofiziksel kaynakların ve model hatalarının katkılarını göstermiştir.

**Çizelge 3.2:** İstasyon koordinatlarında gözlenen yıllık düşey değişimlere, jeofiziksel kaynakların ve model hatalarının katkıları (Dong ve diğ., 2002).

| Değişim Kaynakları | Etki Oranı (mm) |
|---|---|
| Kutup gelgiti | ~ 4 |
| Okyanus gelgiti | ~ 0.1 |
| Atmosferik kütle | ~ 4 |
| Gelgit dışındaki okyanus kütlesi | 2-3 |
| Kar kütlesi | 3-5 |
| Toprak nemi | 2-7 |
| Kayaların sıcaklık genleşmesi | ~ 0.5 |
| Yörünge, faz merkezi değişimi, troposfer modellerindeki hatalar | Henüz nicel sonuçlar yoktur. |
| Ağ Dengelemesindeki Hata (Ağa bağımlıdır) | ~ 0.7 |
| Değerlendirme yazılımlarındaki farklar | ~ 2-3; Bazı istasyonlarda 5-7 |

### 3.3.1 En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK) yöntemi

Zaman serilerindeki Beyaz ve Güç Yasası (Kırpışma, Rastgele Yürüyüş) gürültülerinin miktarlarını belirleyebilmek için Langbein ve Johnson(1997), Zhang ve diğ., (1997) ve Mao ve diğ. (1999) tarafından açıklanan En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK) yöntemi kullanılmıştır. EBOK yöntemi aynı zamanda veriyi en uygun tanımlayan gürültü modelinin belirlenmesini de sağlamaktadır. EBOK yöntemini kullanarak gürültü bileşenlerini kestirmek için olasılık fonksiyonu, (3.7) eşitliğindeki veri kovaryans matrisinin dengelenmesiyle maksimize edilmektedir (Williams ve diğ., 2004). Olabilirlik fonksiyonu;

$$\mathrm{lik}(\hat{v}, C) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}(\det C)^{1/2}} \exp\left(-0.5\hat{v}^T C^{-1}\hat{v}\right) \quad \textbf{(3.5)}$$

olarak verilmektedir. Bu fonksiyonun doğal logaritması alınarak;

$$\mathrm{EBO}=\ln[\,\mathrm{lik}(\hat{v}, C)] = -\frac{1}{2}[\,\ln(\det C) + \hat{v}^T C^{-1}\hat{v} + N\ln(2\pi)] \quad \textbf{(3.6)}$$

bulunur. Burada;

EBO : En Büyük Olabilirlik değeri,

lik : Olabilirlik fonksiyonu,

ln : Doğal logaritma,

N : Zaman anı sayısı,

C : Veri kovaryans matrisi,

$\hat{v}$ : Dengeleme sonrası artıklar (orijinal zaman serilerine doğrusal veya doğrusal olmayan bir model uygulandıktan sonra aynı C kovaryans matrisi ile ağırlıklandırılmış en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen)

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

$$C = a_w^2 I + b_\kappa^2 J_\kappa \quad \textbf{(3.7)}$$

yazılabilir. Burada;

$a_w$ : Beyaz gürültü genliği,

$b_\kappa$ : Güç Yasası Gürültüsü genliği,

I : Birim matris (NxN boyutlu),

$J_\kappa$ : κ spektral indisine sahip Güç Yasası Gürültüsünün kovaryans matrisi,

anlamındadır. En Büyük Olabilirlik problemi tipik olarak "Downhill Simplex Metodu" kullanılarak çözülmektedir (Williams ve diğ., 2004).

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

#### 3.3.1.1 Tam sayı spektral indis ile güç yasası gürültüsü ve beyaz gürültü

Zhang ve diğ. (1997), Mao ve diğ. (1999) ve Calais (1999)'un En Büyük Olabilirlik metodunu kullandıkları zaman serileri hata analizi çalışmalarında, Güç Yasası Gürültüsü, kovaryans matrislerinin modelleri mevcut olan iki özel durum ile sınırlandırılmıştır: Kırpışma gürültüsü (κ=-1) ve Rastgele Yürüyüş gürültüsü (κ=-2). Söz konusu çalışmalarda; sadece Beyaz Gürültü, Beyaz+Kırpışma Gürültüsü ve Beyaz+Rastgele Yürüyüş Gürültüsü olmak üzere üç model test edilmiştir. Beyaz ve Kırpışma Gürültüsünün birleşimi modeli, çoğu istasyon için en büyük olabilirlik değerine sahip model olarak bulunmuştur. Zaman serilerinin her bir bileşeninin güç spektrumlarına (kuzey-güney, doğu-batı, yükseklik) birer fonksiyon uydurularak spektral indisler hesaplanmıştır. Zhang ve diğ. (1997) tüm bileşenlerin güç spektrumlarına yalnız bir Güç Yasası Gürültüsü uydurmuştur ve ortalama olarak -0.4±0.1 spektral indisini elde etmişlerdir. Mao ve diğ. (1999) veriye Güç Yasası Gürültüsü ve Beyaz Gürültü birleşiminden oluşan bir eğri uydurmuşlardır. Her üç bileşen için kestirilen spektral indisin ağırlıklı ortalaması -0.89±0.28 olarak

hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Zhang ve diğ. (1997) ve Mao ve diğ. (1999) her ikisi de, güç spektrumlarından spektral indisi elde etme yönteminin özellikle spektral indisin doğru kestirimlerini üretmediğine dikkati çekmişlerdir. Bu görüş Langbein ve Johnson (1997) tarafından da kabul görmüştür. Özgün spektral indislerin seçilmesinin ana nedeni, daha önceki çalışmalarda Güç Yasası Gürültüsünün kovaryans matrisi için herhangi bir genel formun bilinmemesidir. Rastgele Yürüyüş Gürültüsü için kesin kovaryans matrisi Langbein ve Johnson (1997) tarafından ve Kırpışma Gürültüsü kovaryans matrisi için bir yaklaşım Zhang ve diğ. (1997) tarafından verilmiştir.

Tüm zaman serileri için gürültü modelinin özgün bir türünü kabul etmenin bazı üstünlükleri vardır. Birincisi, bir parametre veya gürültü modeli sabit tutulduğunda veri kümelerinin gürültü karakteristiklerini karşılaştırmak daha kolaydır. İkinci olarak, tüm istasyonların bir dereceye kadar; istasyon hareketi, atmosferik yükleme ve referans koordinat sistemi gibi aynı gürültü kaynaklarından etkilendiğini kabul etmek kolaylık sağlar ve sonuç olarak benzer güç spektrumlarına sahiptirler. Üçüncüsü, özellikle zaman serilerinin uzun olduğu veya çok fazla sayıda gürültü modeli parametrelerinin olduğu durumlarda En Büyük Olabilirlik Metodunun hesaplama yükü oldukça ağırdır. Bu hesaplama yükü, test edilecek model sayısını minimuma indirerek azaltılabilir (Williams, 2005).

Eğer amaç, örneğin istasyon hızı gibi doğrusal model parametreleri hakkında daha gerçekçi hata tahmininde bulunmaksa, o takdirde Beyaz Gürültü ile Kırpışma Gürültüsünün birleşimi modeli uygun olmayabilir. Fakat sadece Beyaz Gürültünün varsayıldığı sıfır hipotezinden daha iyi sonuç verecektir. Yukarıdaki sebeplerden ve önceki çalışmalarla karşılaştırmanın kolaylığından dolayı, bu çalışmada yukarıda bahsedilen üç gürültü modeli seçilerek EBOK analizleri yapılmıştır. (Sadece BG, BG+KG, BG+RYG)

#### 3.3.1.2 Hesaplanan spektral indis ile güç yasası gürültüsü ve beyaz gürültü

Yukarıda açıklanan tam sayı spektral indis ile gürültü modelinin belirlenmesinin yanında, spektral indis de aynı zamanda hesaplanabilir. İlk olarak, stokastik modeller zaman serilerini etkileyen fiziksel durumların araştırılması için ipuçları sağlayabilir. Örneğin, istasyon hareketine bağlı olarak oluşan Rastgele Yürüyüş Gürültüsünün

jeodezik zaman serilerindeki varlığı geniş bir kabul görmüştür. Yine de, Pinon Flat Observatory'deki (Johnson ve Agnew, 2000) 50 m'lik baz haricinde, belki de zaman serilerinin kısalığı ve diğer gürültü kaynaklarının baskınlığına bağlı olarak Rastgele Yürüyüş Gürültüsü GPS zaman serilerinde bulunmamıştır. Genellikle baskın olarak görülen gürültü sinyali, diğer bazı süreçler tarafından oluşturulan Kırpışma Gürültüsüne yakın bir sinyaldir ve konumsal olarak korelasyonludur (Williams ve diğ., 2004). Dolayısıyla analizlerde, Kırpışma Gürültüsüne benzer bir sinyalin varlığı beklenebilir.

İkinci olarak, herhangi bir spektral indis için Güç Yasası kovaryans matrisinin türetilmesi için Williams ve diğ. (2004) tarafından geliştirilen bir yöntem mevcuttur. Güç yasası kovaryans matrisi $J_\kappa$, Kesirli Fark Alma/İntegrasyon Metodu (Johnson ve Wyatt,1994) ile hesaplanabilmektedir ve bu yöntem Williams (2003)'de açıklanmıştır. Üçüncüsü, günümüz bilgisayarlarının hesaplama kapasitelerinin artmasıyla, eskiden hesaplama yükü olarak görülen şeyler şu anda problem olarak görülmemektedir. Sonuç olarak bu çalışmada aynı zamanda, En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK) yöntemi, zaman serilerindeki spektral indisi hesaplamak için uygulanmıştır. Yine de hesaplama yükünün devam ettiği belirlenmiştir.

Langbein ve Johnson (1997), ve Mao ve diğ. (1999) En Büyük Olabilirlik Kestirimi tekniğinin, gürültü miktarlarının ve hatalarının doğru ve hassas tahminlerini hesaplayabildiğini sentetik veri üzerinde göstermişlerdir. Aynı zamanda, spektral indisin tahmini için zaman serilerinin güç spektral analizini de test etmişlerdir. Langbein ve Johnson (1997), EBOK tekniğinin test verisindeki renkli gürültüyü hesaplayabilirken, spektral indis kestirimlerinin yanlı (biased) olarak düşük ve rastgele yürüyüş bileşeninin çok doğru olmadığı sonucuna vardılar. Mao ve diğ. (1999), 2 yıl ve daha uzun süreli zaman serilerinden güvenilebilir spektral indis elde edilebileceğini buldular. Yine de 15 yıllık zaman serilerinin güç spektrumlarından kestirilen indislerin bile yanlı olduğu görülmüştür. Güç spektrumu kullanmanın kullanışlılığı Beran (1994)'de tartışılmıştır.

Williams ve diğ. (2004) EBOK yöntemini çeşitli uzunluklardaki sentetik zaman serileri üzerinde test etmişlerdir. Kısa zaman serileri için ortalama spektral indisi yanlı olarak küçük bulmuşlardır. 2000–3000 günlük verilik zaman serilerinde bu yanlılığın ihmal edilebilir seviyede olduğunu görmüşlerdir. Yine aynı testlerde,

Rastgele Yürüyüş Gürültüsünün hesaplanabilmesi için veri uzunluğunun daha da fazla olması gerektiğini tespit etmişlerdir.

Spektral indisin yanlı (biased) hesaplanmasına üç faktör etki etmektedir (Williams ve diğ., 2004). Bunlar, iki gürültü genliğinin oranı ($b_\kappa/a$), veri uzunluğu ve zaman serilerindeki tektonik harekete bağlı eğim ve gürültüden kaynaklanan eğim arasındaki dengedir.

İki gürültü genliğinin oranı ($b_\kappa/a$), iki sürecin eşit güce sahip olduğu geçiş frekansı (crossover frequency) için bir önceliktir. Eğer bir zaman serisinin iki gürültü kaynağını ihtiva ettiği kabul edilirse, serinin toplam uzunluğu en az geçiş (crossover) periyodundan uzun olmalıdır. Özellikle zaman serileri, Güç Yasası Gürültüsünün Beyaz Gürültü üzerinden görülebileceği kadar yeterli uzunluğa sahip olmalıdır. Kırpışma gürültüsü ile Beyaz Gürültünün birleşimi modeli için $b_{-1}/a \approx 11$ gibi bir oran, geçiş frekansının günlük örnekleme frekansına eşit olduğu bir değere götürür ve bunun sonucunda Kırpışma Gürültüsü baskın olur (Williams ve diğ., 2004). Bu orandan ($b_{-1}/a \approx 11$) daha küçük olan oranlar, geçiş frekansının zaman serilerindeki frekanslardan daha küçük veya eşit olduğunu göstermektedir.

Zaman serilerinden doğrusal eğilimin çıkarılması, düşük frekanslardaki spektral kestirimlerden önemli miktarlarda gücü ortadan kaldırmaktadır (Langbein ve Johnson, 1997), (Johnson ve Agnew,2000). Jeodezik hız olarak da tanımlayabileceğimiz eğilim, gerçek veriden hesaplanmaktadır, çünkü verilerin yada zaman serilerinin tektonik hareketi temsil ettiği kabul edilmektedir. Yine de bir seride, Güç Yasası Gürültüsü aynı zamanda bir hıza da sahip olacaktır ve eğilimi bu iki bileşenine ayırmanın bir yolu yoktur. Zaman serisine bir hız uydurarak, kestirilen spektral indiste sıfıra çok yakın düşük bir yanlılığa sebep olarak sadece tektonik özelliklere sahip görünecektir.

### 3.3.2 CATS yazılımı

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

CATS, sabit GPS istasyonu koordinatları gibi zaman serilerine, çok parametreli bir model uydurmak için En Büyük Olabilirlik Kestirimini kullanan bir yazılımdır. Bu yazılımda EBOK algoritmasının hesaplama hızını artırmak için iki aşamalı bir çözüm uygulanmaktadır. "İç" aşama, yukarıda verilen sabit modellerle aynı tarzda, sabit bir spektral indis için gürültü parametrelerini bulmak için "downhill simplex" algoritmasını kullanmaktadır. "Dış" aşama, en büyük olabilirlik değerini veren spektral indisi hesaplamak için "Brent Metodunu" kullanmaktadır (Williams, 2005).

Yazılım tüm parametreleri aynı anda çözmektedir fakat hızı artırmak için iki kısımdan oluşmaktadır.

Doğrusal kısım;

- Kayıklık ve eğim,
- Depremler veya diğer tektonik hareketlerden kaynaklanan ani sıçramalar,
- Yıllık ve altı aylık vb. sinüzoidal terimlerden

oluşmaktadır. Doğrusal olmayan kısım aşağıda verilen çeşitli özgün gürültü modellerini ve birleşimlerini çözmektedir:

- Beyaz gürültü
- Güç yasası gürültüsü
- Birinci Derece Gauss Markov gürültüsü
- Band-Geçirgenliği gürültüsü
- Genelleştirilmiş Gauss Markov Gürültüsü
- Değişken Beyaz Gürültü
- Basamak-Değişkenli Beyaz Gürültü
- Zamanla Değişen Beyaz Gürültü

### 3.3.2.1 Tam sayı spektral indis analizi sonuçları

Önceki çalışmalarda Zhang ve diğ. (1997), Mao ve diğ. (1999) ve Williams ve diğ. (2004) her istasyon, her bileşen ve her üç model için En Büyük Olabilirlik tabloları üretmişlerdir. Tam sayı spektral indisler kullanılarak yapılan EBOK analizi sonuçları Çizelge 3.3'de sunulmuştur. Türkiye'deki İstanbul, Gebze, Trabzon, Ankara, Mersin ve Antalya istasyonlarına ait kuzey-güney, doğu-batı ve yükseklik bileşenleri ayrı ayrı EBOK analizine sokulmuştur. Tüm çözümler için, Beyaz Gürültü+Kırpışma Gürültüsü veya Beyaz Gürültü+Rastgele Yürüyüş Gürültüsü modelleri yalnız Beyaz Gürültü modeline göre tercih edilen modeller olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.3'de En Büyük Olabilirlik (EBO) değerleri, üç gürültü modeli içerisinde, Zhang ve diğ. (1997), Mao ve diğ. (1999), Calais (1999) ve Williams ve diğ. (2004)'de de önerildiği gibi Beyaz Gürültü+Kırpışma Gürültüsü modelinin en baskın model olduğunu doğrulamaktadır. Yine tüm istasyonlar için Beyaz+Kırpışma Gürültü modelinin, Beyaz+Rastgele Yürüyüş modeline göre daha uygun olduğu bulunmuştur.

Yatay koordinatların gürültü bileşenlerinin düşey koordinatlarınkine oranla ortalama 2.5 kat daha düşük çıktığı gözlenmiştir. Ayrıca Doğu bileşenindeki gürültü oranının kuzey bileşenine göre yaklaşık 1.5 kat daha fazla olduğu dikkati çekmektedir. Aynı sonuç Williams ve diğ. (2004) analizlerinde de bulunmuştur ve bu durumun eksik veya tamamlanmamış tam sayı faz belirsizliklerinden oluşabileceği ifade edilmiştir.

Beyaz gürültü genlik farklarının oluşmasının nedeni olarak, istasyonlardaki farklı GPS alıcılarının kullanılmasının olduğu değerlendirilmektedir. Kırpışma gürültüsü genliklerinin önemli bir miktarının; mevsimsel atmosferik kütle dağılımları (Dong ve diğ., 2002), atmosferik gürültü (Williams ve diğ., 1998) veya ikinci derece iyonosferik etkiler (Kedar ve diğ., 2003) gibi daha genel fiziksel tabanlı süreçleri yansıttığı değerlendirilmektedir. Kırpışma gürültüsünün çok küçük bir miktarı da atmosferik etkiler gibi daha bölgesel ölçekli süreçlerden kaynaklanmaktadır (Williams ve diğ., 2004). Watson ve diğ., (2001) belli GPS istasyonlarında, geniş alana yayılmış yer altı kaynak sularının ve petrol rafinerilerindeki pompalama çalışmalarının ölçülen tektonik hızı bozduğunu tespit etmişlerdir.

Williams ve diğ. (2004), global bir referans koordinat sistemi belirlemek için nokta sayısı arttıkça zaman serilerindeki gürültü miktarının düşeceğini ifade etmektedir.

**Çizelge 3.3:** Tamsayı spektral indis EBOK analizi sonuçları.

| Kuzey-Güney | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Yalnızca BG | | BG+KG | | | BG+RYG | | |
| | EBO | a (mm) | EBO | a (mm) | $b_{\kappa=-1}$ (mm) | EBO | a (mm) | $b_{\kappa=-2}$ (mm) |
| ISTA | -3410 | 1.73 ±0.03 | -3139 | 1.11 ±0.05 | 3.85 ±0.26 | -3169 | 1.39 ±0.03 | 4.25 ±0.60 |
| TRAB | -4242 | 1.95 ±0.03 | -3922 | 1.24 ±0.05 | 4.36 ±0.27 | -3954 | 1.57 ±0.03 | 4.29 ±0.53 |
| ANKR | -3330 | 2.00 ±0.03 | -2946 | 1.15 ±0.05 | 4.18 ±0.27 | -2965 | 1.46 ±0.03 | 4.54 ±0.58 |
| TUBI | -3666 | 1.85 ±0.03 | -3329 | 1.17 ±0.05 | 3.88 ±0.26 | -3356 | 1.44 ±0.03 | 4.18 ±0.54 |
| MERS | -3374 | 3.17 ±0.06 | -2675 | 0.84 ±0.12 | 6.97 ±0.36 | -2684 | 1.64 ±0.04 | 7.85 ±0.88 |
| ANTA | -1540 | 2.01 ±0.05 | -1472 | 1.55 ±0.07 | 3.66 ±0.45 | -1477 | 1.76 ±0.05 | 3.14 ±0.68 |
| Doğu-Batı | | | | | | | | |
| | Yalnızca BG | | BG+KG | | | BG+RYG | | |
| | EBO | a (mm) | EBO | a (mm) | $b_{\kappa=-1}$ (mm) | EBO | a (mm) | $b_{\kappa=-2}$ (mm) |
| ISTA | -3871 | 2.26 ±0.04 | -3690 | 1.57 ±0.06 | 5.01 ±0.33 | -3712 | 1.89 ±0.04 | 6.16 ±0.66 |
| TRAB | -4838 | 2.62 ±0.04 | -4626 | 1.89 ±0.06 | 5.37 ±0.34 | -4651 | 2.19 ±0.03 | 6.97 ±0.68 |
| ANKR | -3785 | 2.70 ±0.05 | -3558 | 1.77 ±0.07 | 5.94 ±0.41 | -3581 | 2.17 ±0.05 | 6.93 ±0.86 |
| TUBI | -3965 | 2.19 ±0.04 | -3758 | 1.45 ±0.06 | 5.14 ±0.32 | -3790 | 1.79 ±0.03 | 6.94 ±0.73 |
| MERS | -3376 | 3.18 ±0.06 | -3232 | 2.27 ±0.09 | 6.53 ±0.52 | -3247 | 2.67 ±0.06 | 7.09 ±0.98 |
| ANTA | -1944 | 3.60 ±0.09 | -1843 | 2.47 ±0.13 | 7.39 ±0.75 | -1848 | 2.92 ±0.09 | 8.42 ±1.44 |
| Yükseklik | | | | | | | | |
| | Yalnızca BG | | BG+KG | | | BG+RYG | | |
| | EBO | a (mm) | EBO | a (mm) | $b_{\kappa=-1}$ (mm) | EBO | a (mm) | $b_{\kappa=-2}$ (mm) |
| ISTA | -5569 | 6.02 ±0.10 | -5090 | 2.99 ±0.16 | 13.96 ±0.73 | -5110 | 4.10 ±0.09 | 18.44 ±1.89 |
| TRAB | -6676 | 6.45 ±0.10 | -6174 | 2.98 ±0.20 | 16.72 ±0.79 | -6221 | 4.44 ±0.10 | 25.07 ±2.31 |
| ANKR | -4991 | 5.83 ±0.10 | -4573 | 3.15 ±0.16 | 12.55 ±0.78 | -4594 | 4.10 ±0.09 | 14.96 ±1.67 |
| TUBI | -5615 | 5.46 ±0.09 | -5351 | 3.07 ±0.19 | 14.53 ±0.85 | -5400 | 4.31 ±0.10 | 19.32 ±2.29 |
| MERS | -4597 | 8.07 ±0.16 | -4365 | 5.09 ±0.22 | 17.27 ±1.14 | -4372 | 6.20 ±0.14 | 20.57 ±2.37 |
| ANTA | -2303 | 5.83 ±0.15 | -2218 | 4.09 ±0.23 | 12.17 ±1.29 | -2227 | 4.90 ±0.15 | 12.56 ±2.98 |

### 3.3.2.2 Kestirilen spektral indis ile güç yasası gürültüsü ve beyaz gürültü

Tüm zaman serilerinin üç bileşeni için CATS yazılımı kullanılarak kestirilen spektral indisler Çizelge 3.4'de sunulmuştur. Hesapla bulunan spektral indisler, Beyaz Gürültünün yanında Güç Yasası Gürültüsünün varlığını doğrulayarak, -0.66'dan -1.28'e kadar değişmektedir. Kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri için spektral indis ortalamaları sırasıyla -0.96, -0.90 ve -0.99 bulunmuştur. Daha uzun zaman serilerine sahip bu çalışmada, Zhang ve diğ. (1997), Mao ve diğ. (1999) ve Williams ve diğ., (2004)'de olduğu gibi GPS zaman serilerindeki gürültü süreçleri, Beyaz Gürültü+Kırpışma Gürültüsü birleşimi modeli ile yeterli bir biçimde tanımlanabilmektedir.

**Çizelge 3.4:** Hesapla bulunan spektral indis EBOK analizi sonuçları.

| Kuzey-Güney | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | EBO | Beyaz Gürültü | Güç yasası gürültüsü | Spektral indis |
| | | a (mm) | $b_\kappa$ (mm) | κ |
| ISTA | -3137 | 0.93 ±0.07 | 3.67 ±0.22 | -0.82 |
| TRAB | -3921 | 0.99 ±0.08 | 4.17 ±0.23 | -0.80 |
| ANKR | -2946 | 1.18 ±0.05 | 4.23 ±0.28 | -1.04 |
| TUBI | -3328 | 1.03 ±0.06 | 3.77 ±0.23 | -0.86 |
| MERS | -2670 | 1.29 ±0.06 | 7.55 ±0.49 | -1.28 |
| ANTA | -1472 | 1.52 ±0.08 | 3.65 ±0.43 | -0.95 |
| Doğu-Batı | | | | |
| | EBO | Beyaz Gürültü | Güç yasası gürültüsü | Spektral indis |
| | | a (mm) | $b_\kappa$ (mm) | κ |
| ISTA | -3689 | 1.38 ±0.08 | 4.75 ±0.28 | -0.82 |
| TRAB | -4625 | 1.76 ±0.07 | 5.15 ±0.31 | -0.86 |
| ANKR | -3557 | 1.64 ±0.09 | 5.75 ±0.37 | -0.89 |
| TUBI | -3757 | 1.15 ±0.10 | 4.70 ±0.26 | -0.77 |
| MERS | -3232 | 2.14 ±0.11 | 6.40 ±0.48 | -0.90 |
| ANTA | -1843 | 2.61 ±0.11 | 7.63 ±0.84 | -1.14 |
| Yükseklik | | | | |
| | EBO | Beyaz Gürültü | Güç yasası gürültüsü | Spektral indis |
| | | a (mm) | $b_\kappa$ (mm) | κ |
| ISTA | -5089 | 3.32 ±0.13 | 14.68 ±0.83 | -1.13 |
| TRAB | -6174 | 2.58 ±0.25 | 16.11 ±0.73 | -0.92 |
| ANKR | -4573 | 3.19 ±0.15 | 12.62 ±0.79 | -1.02 |
| TUBI | -5344 | * ± * | 12.47 ± * | -0.66 |
| MERS | -4363 | 5.64 ±0.17 | 18.58 ±1.44 | -1.27 |
| ANTA | -2218 | 3.91 ±0.26 | 11.91 ±1.20 | -0.92 |

* Yazılım çözümleri yakınsayamamıştır.

### 3.3.2.3 Tektonik doğrusal hızın hatası

En küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanan hız parametrelerinin hataları ve EBOK analizinde tercih edilen model olarak kullanılan Beyaz Gürültü+Kırpışma Gürültüsünün kullanılması ile elde edilen tektonik hızların hatalarının karşılaştırılması Çizelge 3.5'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.5:** EBOK analizi ve EKKY ile bulunan doğrusal hızların hatalarının karşılaştırılması.

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

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

# 4. GPS ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ

GPS zaman serileri analizinin öncesini GPS veri değerlendirmeleri ve günlük çözümlerin üretilmesi oluşturmaktadır. Bu aşamada veri değerlendirme yazılımında kullanılan stratejilerin ve seçilen modellerin önemi büyüktür. Çünkü modellenmeyen her parametre zaman serilerinin içinde periyodik bir etki olarak kendini göstermekte ya da gürültünün artmasına neden olarak doğrusal hızın hesabını olumsuz yönde etkilemektedir.

Deprem sonrası post-sismik etkiye maruz kalmış bir istasyonun zaman serileri için uygulanması gereken en önemli husus üssel gevşeme modelinin tanımlanmasıdır. Bu sayede hem post-sisimik etkinin şiddeti belirlenmekte hem de sönüm zamanı ortaya çıkarılabilmektedir.

Zaman serilerinin gürültü modelini tespit edebilmek ve doğrusal hızın hatasının belirlenmesinde daha gerçekçi yaklaşımlarda bulunmak amacıyla 3'üncü Bölüm'de de açıklandığı gibi, En Büyük Olabilirlik Kestirimi uygulanmaktadır. Gürültü modeli belirlemeden yalnızca beyaz gürültü varsayımıyla hesaplanan hızın hatası yaklaşık 7-8 kat küçük hesaplanmaktadır.

Temel Bileşenler Analizi (TBA) ile konumsal olarak farklı dağılım gösteren istasyonların zaman serileri arasında ortak bazı sinyallerin araştırılması olanaklıdır. TBA ile elde edilen bileşenler tamamen birbirinden bağımsızdır ve konumsal olarak istasyonların bulunduğu tüm bölgeyi temsil etmektedirler. Temel Bileşenler arasından verideki değişimi toplam olarak en çok temsil eden bileşenleri alıp diğer bileşenleri çıkararak veri indirgemesi yapılabilmektedir.

GPS zaman serileri ilk üretildikleri halleri ile zaman-konum uzayında yer almaktadır. Bu yapı, zaman serilerinin içindeki periyodik etkilerin anlaşılması için olanaklı değildir. Zaman serilerini frekans-güç alanında incelemeye imkân veren analiz yöntemi spektral analizdir. Spektral analiz yöntemi ile verinin içindeki anlamlı etkiye sahip frekanslar ve genlikleri tespit edilebilmektedir.

## 4.1 Temel Bileşenler Analizi

Temel Bileşenler Analizi, çok değişkenli veri analiz metotlarından birisidir ve çok boyutlu ve büyük veri kümelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. TBA'nin kullanımı, çok değişkenli bir veri kümesinde, değişimin çoğunluğunu koruyarak değişkenlerin sayısının azaltılmasına izin verir. Bu azalma, p adet değişkendeki ($X_1$, $X_2$,…, $X_p$) kombinasyonları hesaplayarak aralarında korelasyon olmayan temel bileşenleri ($TB_1$, $TB_2$,…, $TB_p$) üreterek sağlanmaktadır. Bu temel bileşenler aynı zamanda özvektörler olarak da adlandırılmaktadır. Temel Bileşenler arasında korelasyonun olmaması, Temel Bileşenlerin verideki farklı boyutları ölçtükleri anlamına gelen kullanışlı bir özelliktir.

Temel Bileşenler Analizi, aralarında korelasyon olması muhtemel çok sayıda değişkeni, "Temel Bileşenler" olarak adlandırılan ve aralarında korelasyon olmayan daha az sayıda değişkene dönüştürmede kullanılan bir veri analiz yöntemidir. Birinci temel bileşen mümkün olduğu kadar verideki değişkenliğin çoğunluğunu açıklar. Takip eden diğer bileşenler de geriye kalan değişkenliği barındırırlar.

Temel Bileşenler Analizinin amaçları;

- Veri kümesinin boyutunu azaltmak,
- Verinin altında yatan, anlamlı yeni değişkenleri belirlemek,

olarak sıralanabilir.

Temel Bileşenler Analizi veri içerisindeki bilinmeyen sinyaller ve eğilimlerin ortaya konulmasında oldukça güçlü bir araçtır. Verinin içindeki örneklerin ortaya çıkarılmasında ve benzerlikleri ve farklılıkları aydınlatacak bir şekilde veriyi açıklamaktadır. Grafiksel bir gösterimin mümkün olmadığı yüksek boyutlu bir verideki özellikleri bulmak zor olduğu için, Temel Bileşenler Analizi veri analizinde oldukça güçlü bir araçtır.

Temel Bileşenler Analizi için ana iki yöntem vardır. Bunlardan birincisi "Tekil Değer Ayrışımı" ve diğeri de kovaryans matrisinin özdeğer yaklaşımıdır. Her iki yöntem de tamamen aynı sonuçları vermektedir. Bu çalışmada tekil değer ayrışımı yöntemi kullanılmıştır.

### 4.1.1 Tekil değer ayrışımı

Tekil değer ayrışımı yönteminde, zaman serileri kolonları oluşturacak şekilde veri matrisi oluşturulur.

$$A_{(mxn)}=\begin{bmatrix} ZSl_1 & ZS2_1 & . & . & ZSn_1 \\ ZSl_2 & ZS2_2 & . & . & ZSn_2 \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ ZSl_m & ZS2_m & . & . & ZSn_m . \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.1)}$$

Herhangi bir A matrisi aşağıdaki gibi üç matrise ayrılabilir:

$$A_{mxn} = U_{mxm} * L_{mxn} * V^t_{nxn} \quad \textbf{(4.2)}$$

(4.2) eşitliğindeki U ve V ortanormal bileşenler, L ise diyagonal matristir. U ve V matrisleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$U= [u_1\ u_2\ .\ .\ .\ u_m] \qquad V= [v_1\ v_2\ .\ .\ .\ v_n] \quad \textbf{(4.3)}$$

Yukarıdaki eşitliklerde, $u_i$ değerleri mx1 boyutunda kolon vektörleri, $v_i$ değerleri ise nx1 kolon vektörleri göstermektedir. L matrisi ise aşağıdaki formlardan birisine sahip olacaktır.

$$m<n;\ L=\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & . & . & . & 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & \lambda_2 & . & . & . & 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ . & . & . & & & . & . & . & & & . \\ . & . & & . & & . & . & & . & & . \\ . & . & & & . & . & . & & & . & . \\ 0 & 0 & . & . & . & \lambda_m & 0 & . & . & . & 0 \end{bmatrix} \qquad m>n;\ L=\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & \lambda_2 & . & . & . & 0 \\ . & & . & & & . \\ . & & & . & & . \\ . & & & & . & . \\ 0 & 0 & . & . & . & \lambda_m \\ 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ . & . & . & & & . \\ . & . & & . & & . \\ . & . & & & . & . \\ 0 & 0 & . & . & . & 0 \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.4)}$$

A veri matrisinin (4.2)'deki gibi ayrıştırılması, "Tekil Değer Ayrışımı" olarak adlandırılır. $\lambda_i$ değerleri tekil değerlerdir. Bazı durumlarda U matrisinin kolonları sol tekil değerler ve V'nin kolonları sağ tekil değerler olarak adlandırılır. $v_i$ vektörleri ve $u_i$ vektörleri de birbirine göre ortogonaldır.

Ayrışım süreci $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \ldots > \lambda_m$ koşulunu sağlayacak şekilde oluşur. En büyük tekil değerlere karşılık gelen kolon ve satır vektörleri geometrik olarak aşağıdaki gibi yorumlanabilir (Hautula, 2005):

$\lambda_1$ : Veriye en iyi uyan ölçek faktörü.

$u_1$ : A veri matrisinin kolonlarına en çok paralellik gösteren vektör.

$v_1$ : A veri matrisinin satırlarına en çok paralellik gösteren vektör. Birinci özdeğer vektörüdür. $v_2$ ikinci öz değer vektörünü ifade eder ve bu şekilde devam eder.

$u_1 * \lambda_1$ : Birinci temel bileşeni gösterir. $u_2 * \lambda_2$ ikinci temel bileşen ve bu şekilde diğerleri gelir.

Her bir temel bileşenin verideki değişimi gösterme oranı ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{i'nci Temel Bileşenin verideki değişimi yansıtma oranı} = \frac{\lambda_i^2}{\sum_{j=1}^{m} \lambda_j^2} \qquad \textbf{(4.5)}$$

Tekil değer ayrışımı MATLAB yazılımında "svds" fonksiyonu kullanılarak kolayca yapılabilmektedir.

### 4.1.2 Kovaryans matrisinin özdeğer yaklaşımı

Bu yöntemde, öncelikle eldeki veri setinin tüm sütunlarından sütun ortalamaları çıkartılarak sıfır ortalamalı veri kümesi elde edilir. (4.1)'deki $A_{mxn}$ veri matrisinde "m" veri sayısını, "n" her veri içerisindeki zaman boyutunda gözlemleri ifade etmektedir. Daha sonraki adım $A_{mxn}$ matrisinin kovaryans matrisinin hesaplanmasıdır. C kovaryans matrisi "n-1" ile normalize edilerek aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$C_{nxn} = (A^{t}_{nxm} x A_{mxn}) / (n-1) \quad \textbf{(4.6)}$$

Kovaryans matrisi kare bir matris olduğu için, bu matrisin özdeğer ve özvektörlerini hesaplayabiliriz.

$$C_{nxn} \text{ x } V_{nxn} = V_{nxn} \text{ x } \lambda_{nxn} \quad \textbf{(4.7)}$$

Yukarıdaki eşitliği sağlayan V matrisinin sütunları özdeğer vektörleri ve ilgili sütunlara karşılık gelen λ matrisinin diyagonal elemanları ise özdeğerlerdir. (4.7) eşitliğini "I" birim matrisi temsil edecek şekilde aşağıdaki gibi tekrar yazabiliriz:

$$( C_{nxn} - \lambda_{nxn} \text{ x } I ) V_{nxn} = 0 \quad \textbf{(4.8)}$$

V'nin sıfır vektörü olmaması için, ( $C_{nxn}$ - $\lambda_{nxn}$ x I ) eşitliğinin tersinin alınamaması gerekir ve bunun sonucu da ($C_{nxn}$ - $\lambda_{nxn}$ x I)'nın determinantı sıfırdır. ($C_{nxn}$ - $\lambda_{nxn}$ x I) ifadesi C'nın karakteristik polinomu olarak adlandırılır ve $\lambda_{nxn}$ değerleri C'nın karakteristik polinomunun kökleridir. $\lambda_{nxn}$ 'nın çözümünden sonra bu değerleri (4.8)'de yerine koyup oluşan lineer denklem sistemini çözerek V özdeğer vektörü elde edilir.

Sonuçta "n" adet özvektör mevcuttur ve V özvektör matrisini orijinal veri kümesi ile çarpımı sonucu Temel Bileşenler matrisi oluşur. Temel Bileşenler matrisinin her sütunu sırasıyla ilgili temel bileşeni ifade eder.

$$TB_{mxn} = (V_{nxn} x A^{t}_{mxn})^{t} \quad \textbf{(4.9)}$$

Her bir temel bileşenin verideki değişimi gösterme oranı ise yine (4.5) eşitliği ile hesaplanır.

### 4.1.3 Temel Bileşenler Analizinin istatistiksel anlamı

Temel Bileşenlerin istatistiksel anlamı, öz değerleri arasındaki ayrımın derecesine dayanmaktadır. Temel bileşenlerin konumsal ortogonalliği, bileşenler üzerine kısıtlamalar getirmektedir. Temel Bileşenler toplam varyansı açıklama miktarlarına göre sıralanırlar. Tüm bileşenler, hiyerarşik olarak kendisinden önce gelen bileşenlere dik olmak zorundadır. Herhangi bir Temel Bileşenin özdeğerinin derecesi ne kadar düşükse, o kadar fazla bileşene dik olmak zorunda kalacak ve içerdiği

özellikler fiziksel veya dinamik etkilerden ziyade, matematiksel kısıtlamalardan etkilenecektir. Bu sebeple kümülatif olarak %90-%95'lik kısmı açıklayacak kadar TB dikkate alınmaktadır. Geriye kalan bileşenler yeni oluşan veri kümesinden çıkarıldığında veri boyutu azalmaktadır.

Dong ve diğ. (2006) bölgesel GPS ağlarının analizinde koordinat zaman serilerinin hassasiyetini yükseltmek amacıyla TBA'ni konumsal filtreleme aracı olarak kullanmışlardır. Bu sayede "Genel Mod Hataları" olarak adlandırdıkları hataları zaman serilerinden elimine ederek, daha zayıf deformasyon sinyallerinin belirlenebilmesi için daha yüksek duyarlılıkta ve geliştirilmiş zaman serileri oluşturmayı amaçlamışlardır.

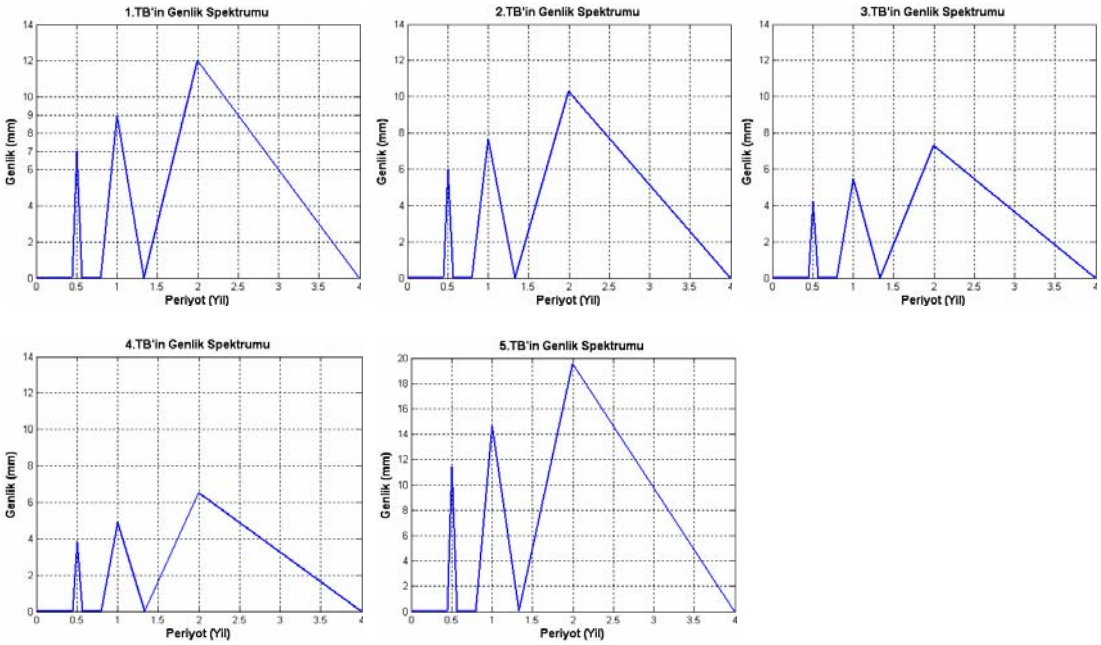
### 4.1.4 Temel Bileşenler Analizinin sentetik veri ile test edilmesi

Temel Bileşenler Analizini sentetik veri üzerinde test etmek amacıyla 1999-2003 yılları arasında 5 adet zaman serisi üç farklı durum için oluşturulmuştur. Birinci durumda, eldeki tüm zaman serileri eşit, ikinci durumda zaman serilerinde aynı sinyaller fakat farklı genlik ve faz açılarına sahip, son durumda ise serilerde farklı genlik ve fazlara sahip sinyaller eklenerek TBA uygulanmıştır. Birinci durum en ideal durum olup, tüm serilerin tek bir temel bileşen ile ifade edilmesini sağlayıp sağlayamayacağını göstermekte ve aynı zamanda yazılımın da analizin de kontrolünü yapmaktadır. İkinci durum, gerçek duruma biraz daha yakın bir durum olup, aynı periyotlu fakat değişik miktarlarda genlik ve fazları ihtiva eden sinyallerin temel bileşenlere dağılımını göstermektedir. Üçüncü durumda, gerçek zaman serilerinde olabileceği gibi, farklı sinyaller içeren fakat gürültünün ihmal edildiği daha ideal boyuttaki zaman serilerinin TBA analizi sonucunda, temel bileşenlerin karakterlerini sergilemektedir.

Birinci durumda, tüm zaman serileri aynı kabul edilerek temel bileşenler analizi gerçekleştirilmiştir. Zaman serileri içerisinde periyotları sırasıyla 0.5, 1 ve 2 yıl olan üç sinyal yerleştirilmiştir. Sinyallerin genlikleri sırasıyla 7, 9 ve 12; fazları ise $(+\pi/5)$, $(+\pi/4)$ ve $(-\pi/25)$ seçilmiştir. Test amacıyla oluşturulan zaman serisi:

$$ZS(1,2,3,4,5)= 7*\sin(4*\pi*t+(\pi/5))+9.0*\sin(2*\pi*t+(\pi/4))+12.0*\sin(\pi*t-(\pi/25))$$

TBA sonucunda elde edilen 1.TB'in verideki toplam değişimin %100'ünü yansıttığı ve 1. özvektörün tüm elemanlarının aynı olduğu tespit edilmiş; zaman serilerindeki karakteristik özelliklerin tüm serilere eşit olarak dağıldığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen temel bileşenlerin Lomb-Scargle algoritması ile spektral analizi yapılarak baskın sinyallerin genliklerinin 1.TB'de serilerde oluşturulduğu gibi çıktığı gözlenmiştir. Bunun yanında diğer temel bileşenlerin de spektral analizi yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.1'de sergilenmiştir.




**Şekil 4.1:** 1.Test durumu için elde edilen temel bileşenlerin genlik spektrumları.

TB'den elde edilen genlik spektrumları incelendiğinde, 1.TB'in zaman serilerindeki ortak olan tüm sinyalleri genlikleri ile beraber yansıttığı görülmektedir. Diğer TB'lerin genlik spektrumlarında ise ortak sinyallerin hepsinin mevcut, fakat farklı genlik değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir.

İkinci durumda, aynı periyotlu fakat değişik miktarlarda genlik ve fazları ihtiva eden sinyallerden oluşan aşağıdaki zaman serileri oluşturulmuştur. Bu durum, gerçeğe biraz daha yakın görünmektedir. Çünkü GPS zaman serilerindeki ortak sinyallerin genlikleri ve fazları değişim gösterebilmektedir. Oluşturulan zaman serileri:

$$ZS1 = 7.0*\sin(4*\pi*t+\pi/5) + 1.0*\sin(2*\pi*t+\pi/4) + 12.0*\sin(\pi*t-\pi/25)$$

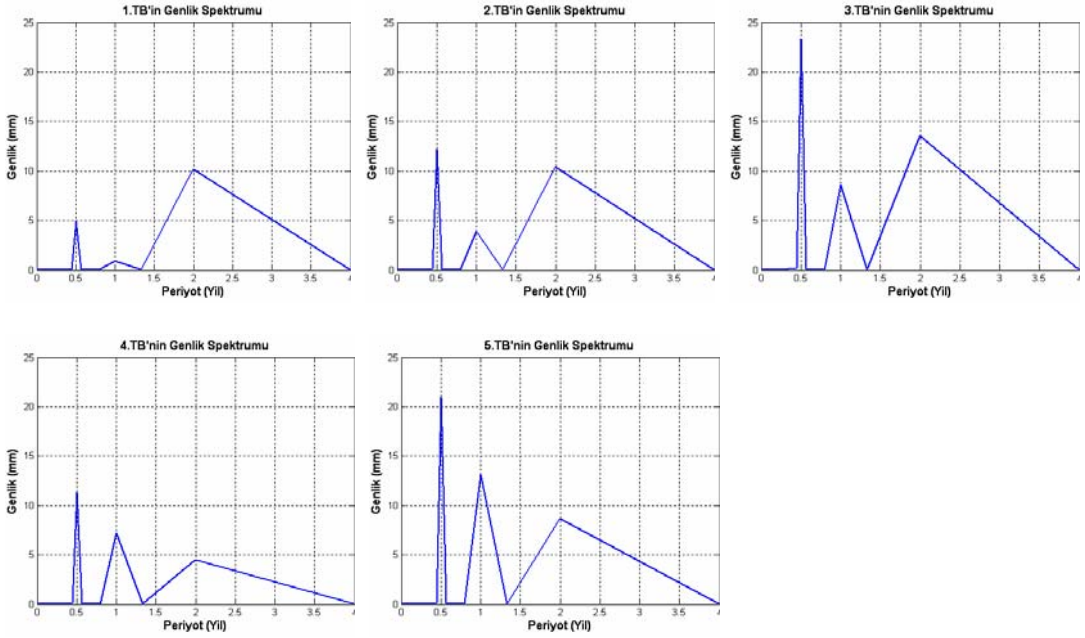
$$ZS2 = 12.0*\sin(4*\pi*t-\pi/12) + 8.0*\sin(2*\pi*t) + 5.0*\sin(\pi*t+\pi/25)$$

ZS3= 17.0*sin(4*π*t-π/2) +3.0*sin(2*π*t-π/36) + 2.0*sin(π*t+π/5)

ZS4= 19.0*sin(4*π*t-π/5) +15.0*sin(2*π*t-π/7) + 8.0*sin(π*t+π/6)

ZS5= 21.0*sin(4*π*t+π/3) +4.0*sin(2*π*t+π/14) +16.0*sin(π*t-π/2)

Yukarıdaki zaman serilerinin eğilimleri alınarak TBA uygulandığında, temel bileşenlerin verideki toplam değişimi açıklama yüzdeleri sırasıyla %50, %42, %5, %2 ve %1 olarak bulunmuştur. TB'ler sırasıyla Lomb-Scargle algoritmasıyla spektral analize tabi tutulduklarında elde edilen genlik spektrumları Şekil 4.2'de verilmiştir.




**Şekil 4.2:** 2.Test durumu için elde edilen temel bileşenlerin genlik spektrumları.

İkinci test durumunda 1.TB'nin verideki toplam değişimi açıklama oranı %50 ve ancak 2.TB'in açıklama oranının %41 olduğu görülmektedir. Bu durumda yalnızca birinci TB'in değil, ikinci bileşen ile beraber oranının %91'e ulaştığı görülmektedir. Oluşturulan TB'ler doğaları gereği tamamen birbirinden ve başlangıçtaki zaman serilerinden bağımsızdırlar. Bu sebeple, temel bileşenlerdeki baskın sinyallerin başlangıç zaman serilerindeki sinyallerin genliklerine sahip olmaları beklenmemektedir. Burada elde edilen en önemli gösterge, tüm temel bileşenlerde sentetik verilerde yer alan sinyallerin varlıklarının hissedilmesidir. Eğer toplam veriyi temsil etmek için bir tercih yapılması gerekirse, veriyi açıklama oranları kümülatif olarak %97 olan ilk üç temel bileşen seçilebilecektir.

Üçüncü test durumunda, zaman serilerinin içine farklı sinyaller ekleyerek TBA uygulanmıştır. Bu testin amacı konumsal olarak dağılmış, farklı genlik-faz değerlerine sahip sinyalleri içeren zaman serilerini en iyi açıklayan temel bileşenlerin yapısını anlamaktır. Böyle bir durumda ilk temel bileşenler hangi baskın sinyalleri içerecektir? Bu durumla ilgili bize nasıl bir bilgi verecektir? Sentetik verilere uygulanacak bu testin, gerçek duruma oldukça yakın olacağı değerlendirilmektedir. GPS zaman serilerinde ortak sinyaller bulunabileceği gibi (ortak sinyaller farklı karakterlere de sahip olabilirler) farklı frekansta baskın sinyaller de bulunabilmektedir. Bu amaçla oluşturulan zaman serileri aşağıdaki gibidir:

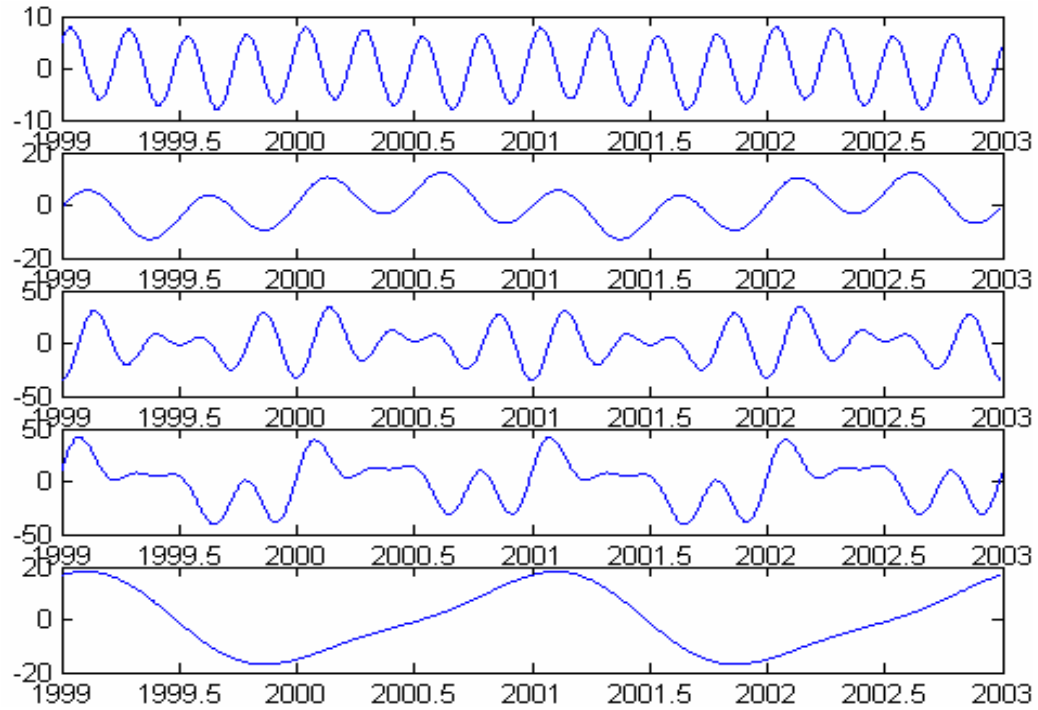
$ZS1 = 7.0*\sin(8*\pi*t+\pi/5) + 1.0*\sin(2*\pi*t+\pi/4)$

$ZS2 = 8.0*\sin(4*\pi*t) + 5.0*\sin(\pi*t+\pi/25)$

$ZS3 = 17.0*\sin(8*\pi*t-\pi/2)+17.0*\sin(6*\pi*t-\pi/2)+3.0*\sin(2*\pi*t-\pi/36)+2.0*\sin(\pi*t+\pi/5)$

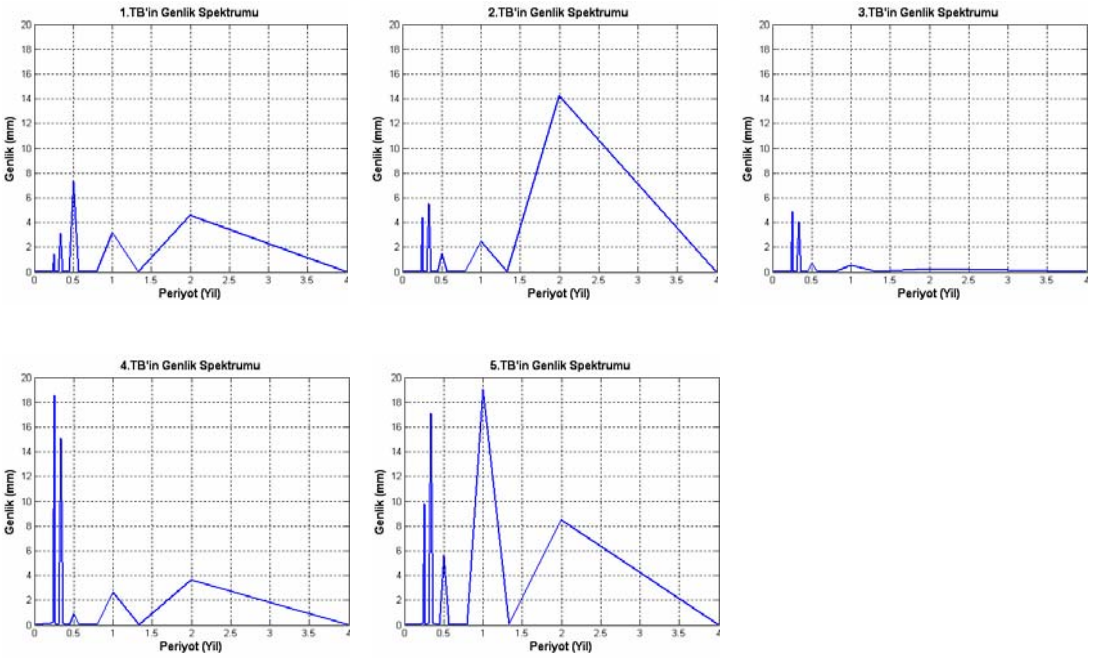
$ZS4 = 12.0*\sin(8*\pi*t+\pi/7)+17.0*\sin(6*\pi*t-\pi/10)+5.0*\sin(4*\pi*t+\pi/4)$
$+19.0*\sin(2*\pi*t+\pi/14) + 5.0*\sin(\pi*t-\pi/6)$

$ZS5 = 4.0*\sin(2*\pi*t+\pi/14) + 16.0*\sin(\pi*t-\pi/2)$




**Şekil 4.3:** TBA 3.Test durumu için oluşturulan sentetik zaman serileri.

Yukarıdaki sentetik zaman serilerine TBA uygulandığında, temel bileşenlerin verideki toplam değişimi açıklama yüzdeleri sırasıyla %48, %32, %14, %5 ve %1 olarak bulunmuştur. TB'ler sırasıyla Lomb-Scargle algoritmasıyla spektral analize tabi tutulduklarında elde edilen genlik spektrumları Şekil 4.4'de verilmiştir.




**Şekil 4.4:** 3.Test durumu için elde edilen temel bileşenlerin genlik spektrumları.

Üçüncü test durumunda birbirinden bağımsız oluşan temel bileşenlerin ilk üçünün veriyi açıklama oranı toplam %94 bulunmuştur. Bu test için oluşturulan zaman serilerinin gerçek duruma en yakın olduğu değerlendirilmektedir. Çünkü tüm seriler farklı sinyaller içermektedir. Şekil 4.4'de temel bileşenlerin spektral analizi sonuçları verilmiştir. Sentetik olarak zaman serilerine eklenen ve TBA sonucu elde edilen temel bileşenlerde baskın olarak ortaya çıkan sinyallerin hepsi temel bileşenlere dağılmışlardır. TBA ile elde edilen TB'ler doğaları gereği tamamen birbirinden ve başlangıçtaki zaman serilerinden bağımsızdırlar. Sonuç olarak tüm temel bileşenlerin spektral analizinde, zaman serilerine farklı olarak dağıtılan sinyaller görülmektedir.

## 4.2 Spektral Analiz

### 4.2.1 Fourier analizi

Zaman serilerinin güç spektrumunu elde etmek için ve periyodik etkileri anlamak için kullanılan en genel teknik Fourier Analizidir. Fourier teoremine göre herhangi bir periyodik sinyal, frekansları sinyalin temel frekansının harmonikleri olan uygun seçilmiş genlik ve faz açısına sahip sinüs dalgalarının toplamından oluşur.

Spektral analiz için kullanılabilecek temel fonksiyonlardan biri Ayrık Fourier Dönüşümüdür. $\{X(t_j),j=1,2,...,N\}$ olarak tanımlanan bir veri kümesi için Fourier Dönüşümü,

$$FD_X(\omega) = \sum_{j=1}^{N_o} X(t_j) e^{(-i\omega t_j)} \qquad \textbf{(4.10)}$$

ile tanımlanabilir. Buradan periodogram (güç spektrumu) aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$P(f_n) = \frac{1}{N}\left[\left(\sum_{j=1}^{N} x_j \cos 2\pi f_n j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{N} x_j \sin 2\pi f_n j\right)^2\right] \qquad \textbf{(4.11)}$$

$f_n=n/T$, T=Temel periyot n=1,2,...,N/2

Yukarıdaki eşitlikte verilen fonksiyon Klasik Periodogram'dır. Periodogram ve güç spektrumu, birbirinin yerine çok sık kullanılan kavramlardır. Aynı şeyi ifade etmekle beraber aralarındaki temel ayrım şudur: Güç spektrumu sürekli zaman üzerinden alınan integralle tanımlanan teorik bir değerdir. Periodogram ise sadece sonlu miktardaki kesikli veriden elde edilen bir tahmin değeridir.

Yine (4.11)'de verilen eşitlikte $X_j$ değişkeni zamandan bağımsız bir hata içeriyorsa (beyaz gürültü) periodogram değerleri beyaz gürültünün varyansına eşit üssel olarak dağılmış rastgele değişken olacaktır. Spektrumun genlik değerleri her frekans için bağımsızdır.

### 4.2.2 Lomb-Scargle algoritması

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

Bu çalışmada Lomb algoritması kullanılacaktır. Lomb algoritması, veriye doğrudan sinüs dalgaları uydurarak spektrumu hesaplamak için doğrusal olmayan en küçük kareler tekniğini kullanmaktadır (Mao ve diğ., 1999). Bu algoritma Lomb (1976) tarafından bulunmuş ve Scargle (1982) tarafından geliştirilmiştir. Bu sebeple günümüzde Lomb-Scargle metodu olarak anılmaktadır. N sayıda verisi olan bir seri için verilen f frekansı için model:

$$x_j + \varepsilon_j = a \cos 2\pi (t_j - \tau)f + b \sin 2\pi (t_j - \tau)f \qquad \textbf{(4.12)}$$

Yukarıdaki eşitlikte $\varepsilon_j$ hataları bağımsız ve sıfır ortalamaya sahiptirler. a ve b bilinmeyenler ve $\tau$ ;

$$\tan(4\pi f\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N} \sin 4\pi f t_j}{\sum_{j=1}^{N} \cos 4\pi f t_j} \qquad \textbf{(4.13)}$$

eşitliği ile hesaplanır. Periodogram ise aşağıdaki gibi türetilebilir:

$$P(f) = \frac{1}{2}\left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^{N} x_j \cos 2\pi f(t_j - \tau)\right]^2}{\sum_{j=1}^{N} x_j \cos^2 2\pi f(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^{N} x_j \cos 2\pi f(t_j - \tau)\right]^2}{\sum_{j=1}^{N} x_j \sin^2 2\pi f(t_j - \tau)} \right\} \qquad \textbf{(4.14)}$$

Scargle (1982), sonuç periodogram değerlerinin eşit dağılımlı veri ile aynı olasılık dağılımına sahip olduğunu ispatlamıştır. Gerek sayısal testlerle gerekse teorik olarak

incelendiğinde Fourier Dönüşümü ve Lomb algoritmasının aynı sonuçları verdiği görülmektedir (Scargle , 1982).

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

Lomb-Scargle algoritması, spektral analizde yoğun olarak kullanılan Fourier Analizi gibi tekniklere göre, boşluklu veriyi analiz edebilmesi ve önemli sinyalleri tespit edebildiği çeşitli hesaplama avantajlarına sahiptir. Zaman serileri dikkate değer fakat bilinmeyen periyotlu sinyalleri de barındırırlar.

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

Astronomide çeşitli yıldızlar üzerine çalışan Lomb, düzenli olmayan verideki periyodik hareketlerin tespiti için bir yol aramıştır. Astronomlar, jeodezik ölçmelerdeki problemlere benzerlik gösteren gözlem zamanlarını, gözlem aletlerini ve gök cisimlerinin konumlarını her zaman kontrol edemezler. Boşluk oluşturan gözlemlerin yerine veri doldurmaktansa Lomb (1976), sinüsoidal veri modellerine en küçük karelerle eğri uydurmak için istatistiksel hesaplamalar yapmıştır. Lomb (1976), güç spektrumundaki en yüksek zirvenin olasılık dağılımını bulmaya çalışmıştır. Scargle (1982) Lomb'un çalışmasını genişleterek "Yanlış Bulunma Oranı (False Discovery Rate)" olarak adlandırılan "Yanlış Alarm Olasılığı"nı ilâve etmiştir. Bu oran, spektrumda zirve yüksekliği (gücü) verilen bir noktanın anlamlı olup olmadığının tahmini vermektedir. Scargle, düzgün olarak normalize edildiklerinde Lomb-Scargle periodogramındaki zirve yüksekliklerinin üssel bir olasılık dağılımı izlediklerini ve bunun için en uygun normalizasyon işleminin, güç değerlerinin verinin toplam varyansına bölünmesiyle elde edilebileceğini göstermiştir.

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

Elimizde eşit aralıklı yada boşluklu yapıda $t_1, t_2,\ldots,t_N$ zaman anlarında gözlenmiş N adet veri noktası olsun. İlgili zaman anlarına karşılık gelen veri noktaları da $h_1,h_2,h_3,\ldots,h_N$ olsun. Eğer veri kesikliği varsa, tek yapılması gereken ilgili noktayı seriden çıkarmaktır. Başka bir müdahaleye gerek yoktur. Bu algoritmadaki ilk adım ortalamayı ve verinin varyansını hesaplamaktır.

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \ldots + h_N}{N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} h_i \qquad \textbf{(4.15a)}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N} (h_i - \bar{h})^2 \qquad \textbf{(4.15b)}$$

Lomb-Scargle periodogramı M adet frekansta değerlendirilecektir.( $f_1,f_2,f_3,\ldots,f_M$) Bu frekanslara karşılık gelen açısal frekanslar ve "$\tau$" değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\omega_k = 2\pi f_k \qquad \textbf{(4.16)}$$

$$\tan(2\omega_k \tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sin(2\omega_k t_i)}{\sum_{i=1}^{N} \cos(2\omega_k t_i)} \qquad \textbf{(4.17)}$$

Normalize edilmiş spektral güç yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$SPD(\omega_k) = \frac{1}{2.\sigma^2}\left\{\frac{\left[\sum_{i=1}^{N}(h_i - \bar{h})\cos[\omega_k(t_i - \tau)]\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\cos^2[\omega_k(t_i - \tau)]} + \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}(h_i - \bar{h})\sin[\omega_k(t_i - \tau)]\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\sin^2[\omega_k(t_i - \tau)]}\right\} \quad \textbf{(4.18)}$$

Lomb-Scargle periodogramı, yatay eksende frekans ($f_k$) ve düşey eksende normalize edilmiş spektral güç yoğunluğunun bir grafiğidir. Bu grafikte kullanılan frekans sayısı olan M hakkında kesin bir şey yoktur. İhtiyaç duyulan parametrelerden bir diğeri de bağımsız frekans sayısıdır. Bununla ilgili olarak Brett Shoelsen tarafından; N_Bağımsız=hifac*N (hifac=1 alındığında bağımsız frekans sayısı veri sayısına eşittir.) önerilmiştir.

Eğer N_Bağımsız kadar frekans incelendiğinde ve z=SPD($\omega_k$) değerinde bir zirve bulunduğunda; başka hiçbir zirvenin daha büyük bir değer verme olasılığı $[1-\exp(-z)]^{N_{bağımsız}}$ olarak bulunur. Sonuç olarak "Hatalı Bulma Oranı (FDR)" aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$p=P(>z)=1-[1-\exp(-z)]^{N_{independent}} \quad \textbf{(4.19)}$$

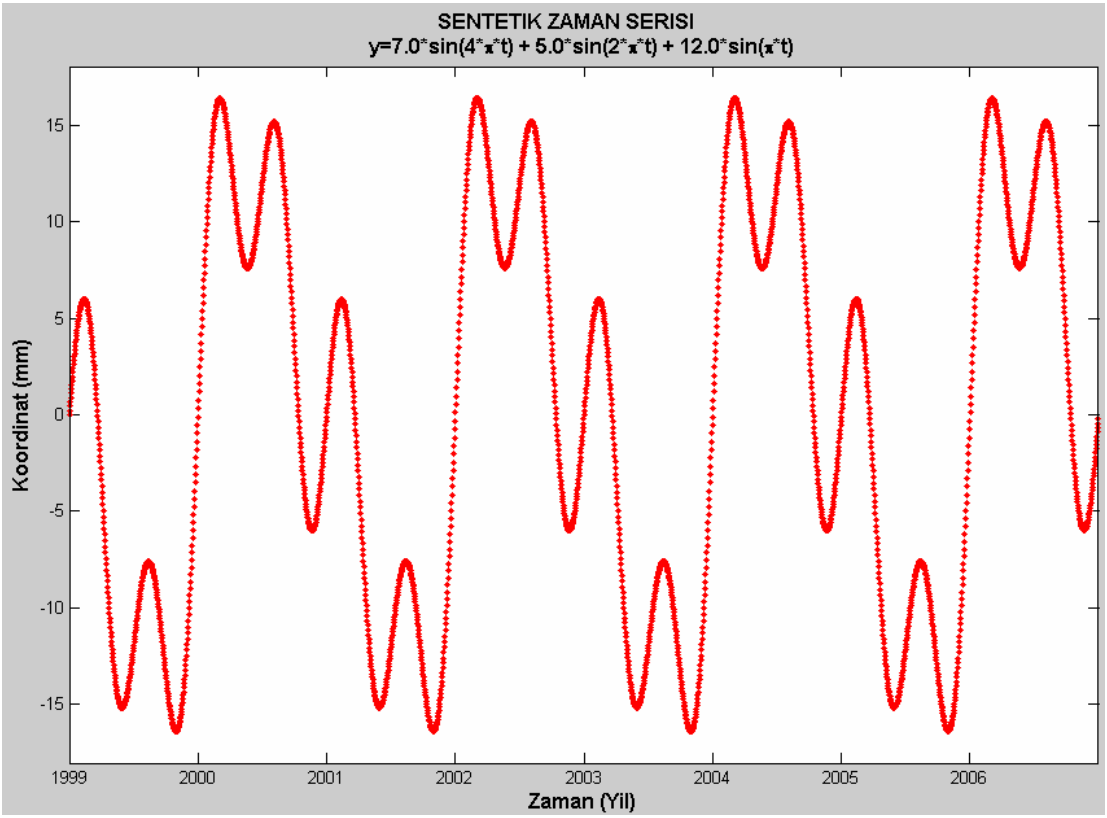
### 4.2.3 Lomb-Scargle algoritması ile Fourier analizinin karşılaştırılması

Lomb-Scargle yöntemini test etmek amacıyla, 1999–2007 yılları arasında her gün ölçü olacak şekilde sentetik veri oluşturulmuştur. Sentetik verinin içine periyotları ve genlikleri;

$T_1$=0.5 yıl $A_1$= 7.0 mm

$T_2$=1.0 yıl $A_2$= 5.0 mm

$T_1$=2.0 yıl $A_3$=12.0 mm




**Şekil 4.5:** Lomb-Scargle algoritmasını test etmek amacıyla oluşturulan sentetik zaman serisi.

olan sinyaller ilave edilmiştir. Söz konusu sentetik veri modeli aşağıdaki gibi kurulmuştur:

y = 7.0*sin(4*pi*t) + 5.0*sin(2*pi*t) + 12.0*sin(pi*t)

Oluşturulan sentetik verinin görünümü Şekil 4.5'de verilmiştir. Bu fonksiyonda yukarıda genlik ve periyotları verilen sinüzoidal sinyaller mevcuttur. Oluşturulan sentetik veri kümesi hem FFT hem de Lomb-Scargle ile yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen güç spektrumları Şekil 4.6'da sunulmuştur.

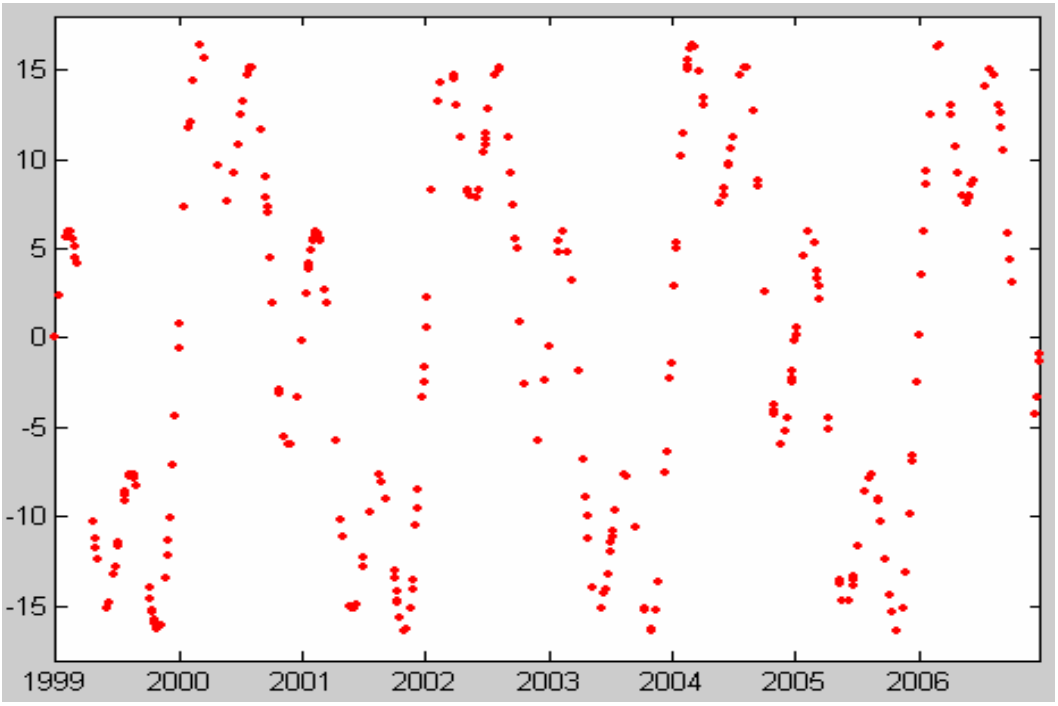



**Şekil 4.6:** Sentetik verinin L-S ve FFT yöntemleri ile analizi sonucundaki güç spektrumları.

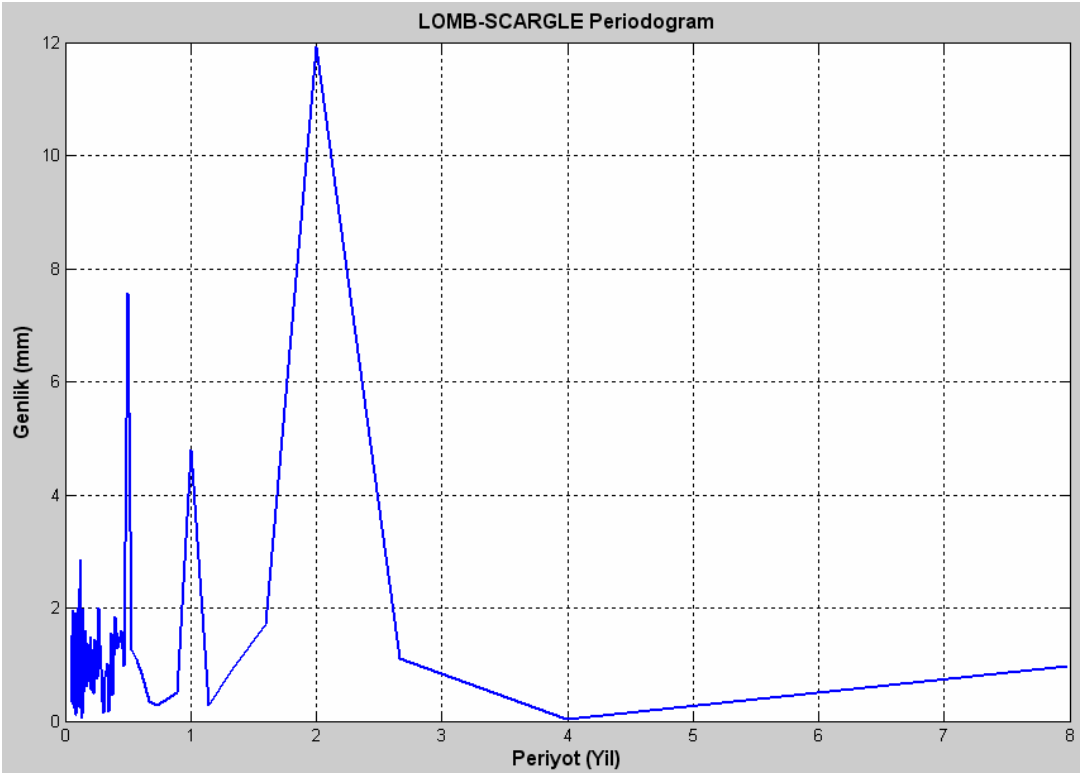
Şekil 4.6'da görüldüğü gibi her iki yöntem arasında hiçbir fark bulunmamıştır. Fourier Yöntemi boşluklu veri için çalışmamaktadır. Lomb-Scargle (L-S) metodunun avantajı bu noktada ortaya çıkmaktadır. Bu yöntem ile yukarıda oluşturulan sentetik verinin içinden belli oranlarda veri rastgele çekilerek boşluklu veri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1:** Sentetik veride rastgele boşluklar oluşturularak L-S yöntemi ile analiz sonuçları.

| | $T_1$ (Gün) | $A_1$ (mm) | $T_2$ (Gün) | $A_2$ (mm) | $T_3$ (Gün) | $A_3$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Boşluksuz veri | 730.3 | 12.0035 | 365.1 | 4.9913 | 182.6 | 6.9997 |
| % 10 boşluklu veri | 730.3 | 12.0140 | 365.1 | 5.1058 | 182.6 | 7.0179 |
| % 20 boşluklu veri | 730.0 | 11.9616 | 365.0 | 4.9240 | 182.5 | 7.2343 |
| % 30 boşluklu veri | 730.3 | 12.1328 | 365.1 | 4.8735 | 182.6 | 7.1258 |
| % 40 boşluklu veri | 730.3 | 12.0672 | 365.1 | 5.0162 | 182.6 | 7.0780 |
| % 50 boşluklu veri | 730.3 | 11.8198 | 365.1 | 5.3738 | 182.6 | 7.1156 |
| % 60 boşluklu veri | 730.3 | 12.2384 | 365.1 | 4.6500 | 182.6 | 7.2369 |
| % 70 boşluklu veri | 729.3 | 12.3240 | 364.6 | 4.9901 | 182.3 | 7.3548 |
| % 80 boşluklu veri | 730.0 | 12.1778 | 365.0 | 4.6515 | 182.5 | 7.3524 |
| % 90 boşluklu veri | 729.3 | 11.8380 | 364.6 | 4.3306 | 182.3 | 7.7017 |

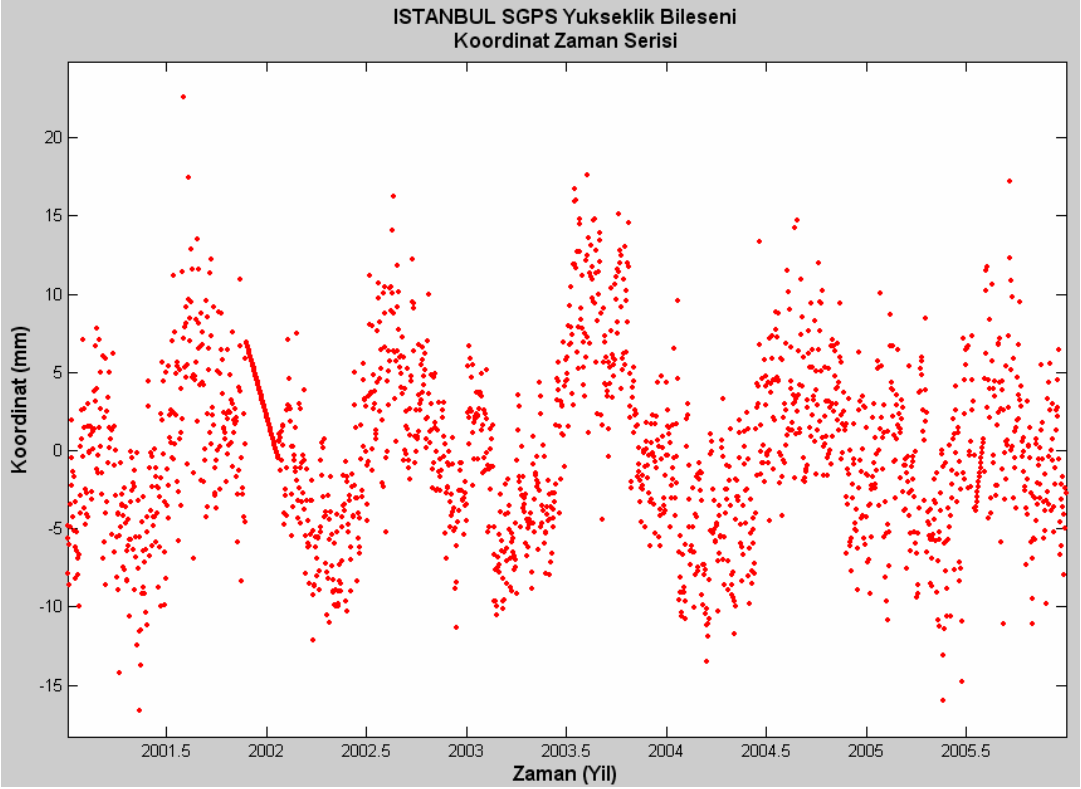



**Şekil 4.7:** %90'ı boşaltılmış sentetik zaman serisinin görünümü.



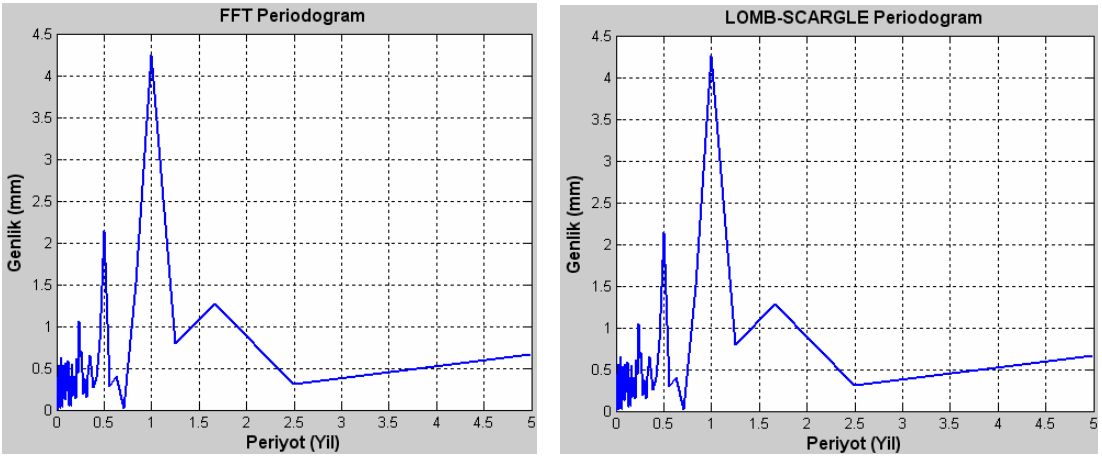

**Şekil 4.8:** %90'ı boşaltılmış sentetik zaman serisinin Lomb-Scargle yöntemi ile analizi sonucunda elde edilen güç spektrumu.

Lomb-Scargle algoritması ile Fourier Analizi yöntemlerini gerçek GPS zaman serisi üzerinde karşılaştırmak amacıyla, İstanbul SGPS istasyonunun yükseklik bileşeni verisi kullanılmıştır. Söz konusu veri 5 senelik bir uzunluğa sahiptir ve içerisinde bazı boşluklar mevcuttur. Fourier analizini yapabilmek için öncelikle bu boşluklar doğrusal enterpolasyonla doldurulmuştur. Lomb-Scargle algoritması için böyle bir zorunluluğa gerek yoktur. Fakat karşılaştırmanın gerçekçiliği açısından boşlukları doldurulmuş olan veri her iki yöntemle de analiz edilmiştir. Boşlukları doldurulmuş İstanbul SGPS istasyonunun zaman serisinin görünümü Şekil 4.9'da verilmiştir.




**Şekil 4.9:** İstanbul SGPS istasyonunun boşlukları doldurulmuş yükseklik bileşeni zaman serisi.

Gerçek verinin her iki yöntemle de analizinden elde edilen güç spektrumları incelendiğinde, Şekil 4.10'dan de görüldüğü gibi birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumda Lomb-Scargle algoritması sadece boşluklu veride değil, boşluksuz veri için de kullanılabilecek alternatif bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.




**Şekil 4.10:** İstanbul SGPS istasyonunun boşlukları doldurulmuş Yükseklik Bileşeni Zaman Serisi L-S ve FFT yöntemleri ile analizi sonucundaki güç spektrumları.

Lomb-Scargle algoritmasının en önemli avantajlarından birisi, spektrum değerleri içinde bulunan değerler arasından, istatistiksel olarak anlamlı olan frekansları ortaya koyabilme gücüdür. Yukarıda açıklanan Hatalı Bulunma Oranı (False Discovery Rate-FDR) yöntemini kullanarak yüzlerce frekans içerisinden, kullanıcının belirleyeceği bir güven aralığında (örn. %90, %95) anlamlı frekansları belirlemektedir.

Şekil 4.10'da görsel olarak sunulan spektrumları rakamsal olarak da karşılaştırabilmek için, Lomb-Scargle algoritması ile anlamlı bulunan ve Çizelge 4.2'de verilen 4 adet frekansın, FFT yöntemi ile bulunan karşılıklarının genlikleri içinden tespit edilerek aradaki farklar Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.2:** İstanbul SGPS istasyonunun yükseklik bileşeni için yapılan analizde, Lomb-Scargle Yöntemi ile bulunan anlamlı sinyallerin frekans ve genliklerinin FFT yöntemi ile bulunanlarla karşılaştırılması.

| Periyot | Lomb-Scargle ile bulunan Genlik (mm) | FFT ile bulunan Genlik (mm) | Fark (mm) |
|---|---|---|---|
| 608.0 gün | 1.278 | 1.276 | **0.002** |
| 364.8 gün | 4.252 | 4.249 | **0.003** |
| 182.4 gün | 2.139 | 2.143 | **-0.004** |
| 86.9 gün | 1.049 | 1.056 | **-0.007** |

Lomb-Scargle ile FFT tekniği çözümleri arasındaki fark mm'nin binde biri seviyesindedir. Ayrıca, FFT tekniğinde yüzlerce frekans arasından hangilerinin baskın olduğunu anlamanın kolay bir yöntemi yoktur. Lomb-Scargle algoritmasının boşluklu veride sağladığı avantajı gerçek zaman serisi üzerinde test etmek amacıyla, yine İstanbul SGPS istasyonunun yükseklik bileşeni kullanılmıştır.

İstanbul sabit GPS istasyonunun orijinal verisi %5 oranında veri kaybına sahiptir. Zaman serisinde, Çizelge 4.3'de verilen oranlarda rastgele boşlular oluşturularak Lomb-Scargle algoritması ile spektral analize tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'de sunulmuştur. %90'a kadar boşluk oluşturulan veride baskın olarak tespit edilen sinyaller ve genlikleri arasında ihmal edilebilir seviyede farklar bulunmuştur.

**Çizelge 4.3:** İstanbul SGPS istasyonunun Lomb-Scargle yöntemi ile çeşitli boşluklu veri aralıklarında yapılan analizinde bulunan anlamlı periyotlar ve karşılık gelen genlik değerleri.

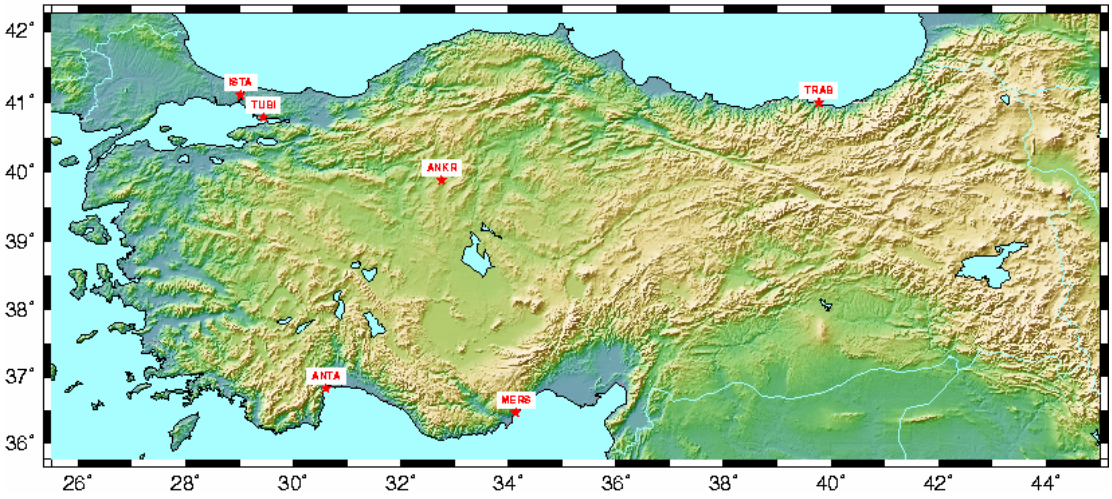
| İstanbul SGPS istasyonu yükseklik bileşeni. | $T_1$ (Gün) | $A_1$ (mm) | $T_2$ (Gün) | $A_2$ (mm) | $T_3$ (Gün) | $A_3$ (mm) | $T_4$ (Gün) | $A_4$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Boşluksuz veri | 608 | 1.28 | 365 | 4.25 | 182 | 2.14 | 87 | 1.05 |
| **% 5 boşluklu veri (Gerçek veri)** | **-** | **-** | **365** | **4.32** | **182** | **2.36** | **87** | **1.01** |
| % 10 boşluklu veri | 608 | 1.37 | 365 | 4.28 | 182 | 2.063 | 87 | 1.12 |
| % 20 boşluklu veri | 608 | 1.43 | 365 | 4.39 | 182 | 2.16 | 87 | 0.94 |
| % 30 boşluklu veri | 608 | 1.15 | 365 | 4.01 | 182 | 2.09 | 87 | 1.15 |
| % 40 boşluklu veri | 608 | 1.23 | 365 | 4.49 | 182 | 2.31 | 87 | 1.20 |
| % 50 boşluklu veri | 607 | 1.16 | 365 | 4.33 | 182 | 2.34 | - | - |
| % 60 boşluklu veri | - | - | 365 | 4.35 | 182 | 2.16 | 87 | 1.34 |
| % 70 boşluklu veri | - | - | 365 | 4.29 | 182 | 1.89 | 87 | 1.67 |
| % 80 boşluklu veri | 605 | 2.02 | 363 | 4.64 | 182 | 1.96 | - | - |
| % 90 boşluklu veri | - | - | 364 | 4.74 | 182 | 2.48 | - | - |

## 5. TEST VERİLERİ VE DEĞERLENDİRMESİ

Bu çalışmada test verisi olarak, herkese açık olan Ankara, İstanbul, Trabzon, Mersin, Gebze ve Antalya istasyonlarından elde edilen GPS verileri seçilmiştir. Bu kapsamda öncelikle sabit GPS istasyonlarının verileri GPS değerlendirme yazılımı olan GAMIT/GLOBK (V10.2) yazılımı ile değerlendirilmiştir.

**Çizelge 5.1:** Çalışma kapsamında değerlendirilen sabit GPS İstasyonlarına ait bilgiler.

| İstasyon Adı | 4 Karakter Kodu | Kuruluş Tarihi | Alıcı ve Anten Tipi | Sorumlu Kurum |
|---|---|---|---|---|
| Ankara | ANKR | 1991 | TURBO ROGUE SNR 8000 ACT<br>AOA DORNE MARGOLİN T | HGK / BKG |
| Mersin | MERS | 2000 | TURBO ROGUE SNR 8000<br>AOA DORNE MARGOLİN T | HGK / ODTU<br>MIT / UNAVCO |
| İstanbul | ISTA | 1999 | ASHTECH Z-XII3<br>ASH700936D_M SNOW | ITÜ / BKG |
| Trabzon | TRAB | 1999 | ASHTECH Z-XII3<br>ASH700936D_M SNOW | KTÜ / BKG |
| Gebze | TUBI | 1998 | TRIMBLE 4700<br>DORNE MARGOLIN TRIM | TÜBİTAK-MAM |
| Antalya | ANTA | 2003 | ASHTECH Z-XII3<br>ASH700936D_M SNOW | HGK / ESEAS |




**Şekil 5.1:** Çalışma kapsamında değerlendirilen sabit GPS istasyonlarının konumsal dağılımı.

## 5.1 Günlük Çözümlerin Oluşturulması

GAMIT GPS analiz yazılımı, yer kontrol noktalarının ve uydu yörüngelerinin üç boyutlu konumlarının hassas olarak belirlenebilmesi için MIT ve SCRIPPS'te geliştirilen çok yönlü bir bilimsel araştırma yazılımıdır. GAMIT'in temel çıktısı, parametre tahmini ve kovaryanslardan oluşan gevşek koşullu bir çözüm dosyasıdır. Bu dosya daha sonra nokta koordinatlarının, hızlarının, uydu yörüngesi ve yer dönme parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla verilerin birleştirilebilmesi için GLOBK aşamasında kullanılmaktadır. GAMIT veri değerlendirme yazılımı, çok sayıda modülden oluşmaktadır. Bu modüllerin oluşturduğu ana değerlendirme aşamaları şunlardır:

- Uydular için referans yörüngelerin oluşturulması
- Değerlendirme için verilerin hazırlanması
- Gözlemlerin kapanmalarının ve kısmi türevlerinin hesaplanması
- GPS verilerinin içindeki kaba hataların ve sinyal kesikliklerinin tespit edilmesi
- Parametre tahmini için en küçük kareler dengelemesinin yapılması

Türkiye'de faaliyet gösteren ve verileri herkese açık olan 6 adet sabit GPS istasyonunun 2005 yılı sonuna kadar olan veri değerlendirmeleri GAMIT/GLOBK (V10.2) yazılımı ile yapılarak günlük çözümleri elde edilmiştir.

Günlük istasyon koordinatları GPS ölçülerinden GAMIT V10.2 (King ve Bock, 2004) ve GLOBK V5.11 (Herring, 2003) yazılımları kullanılarak üretilmiştir. L1 ve L2 faz gözlemlerinin çiftli farkları üretilmiş, iyonosferden bağımsız lineer kombinasyonları kullanılarak her gün için ağırlıklandırılmış en küçük kareler çözümleri oluşturulmaktadır. Artık hatalara otomatik temizleme algoritması olan "AUTCLN" modülü uygulanarak faz kayıklıkları onarılmakta ve problemli veriler tespit edilmiştir. Düzeltilmiş verileri iyileştirmek için elle herhangi bir müdahalede bulunulmamıştır. GPS verileri 30 saniye veri aralığında temizlendikten sonra sonuç çözüm için 2 dakikalık veri aralığına düşürülmektedir. Gözlem ağırlıkları uydu yükseklik açısı ile değişmekte ve her nokta için ilk hazırlık çözümü sonrası artık hataların dağılımına göre üretilmiştir.

Her günlük çözüm için üretilen parametreler, her nokta için 3 boyutlu kartezyen koordinatlarını, her uydu için 6 yörünge elemanını (ana ekseninin yarıçapı, eksentrisite, eğim, yükselen düğüm noktasının boylamı, yerberi argümanı, ortalama bozukluk), Yer Yönlendirme Parametrelerini (kutup parametreleri ve hızı UT1 hızı) ve tam faz belirsizliklerini kapsamaktadır. Ayrıca zayıf modellenmiş troposferi iyileştirmek amacıyla her istasyon için 2 saatte bir atmosferik zenit gecikmeleri hesaplanmakta ve her gün için azimutsal asimetriyi gidermek için 3 doğu-batı ve kuzey-güney atmosferik bileşen hesaplanmıştır. Veri değerlendirmesi için minimum uydu yükseklik açısı $10^{\circ}$ alınmakta ve alıcı antenlerinin faz merkezi değişimlerini belirlemek amacıyla IGS'in yükseklik açısına bağlı anten modelleri kullanılmaktadır. Aynı zamanda katı yer gelgit modelleri ve okyanus yüklemesi modelleri (Scherneck) kullanılmaktadır. Uydu yörünge bilgileri için IGS tarafından üretilen yörüngeler sıkı koşullu olarak kullanılmıştır.

GAMIT yazılımı günlük çözüm aşamasında çeşitli kontrol tabloları kullanmaktadır. Programda kullanılacak parametreler, kullanıcı tarafından ilgili tablolarda kontrol edilebilmektedir. Bu tablolar yazılımın değerlendirmeyi hangi parametrelere göre yapacağına karar vermesini sağlayan kontrol kısımlarından oluşmaktadır. Bu tabloların en önemlilerinden biri olan *sesstbl* tablosu (Çizelge 5.2) GAMIT analiz komutlarını ihtiva etmektedir. Diğer bir kontrol tablosu olan *sittbl* (Çizelge 5.3) istasyonlara özgü kontroller içermektedir.

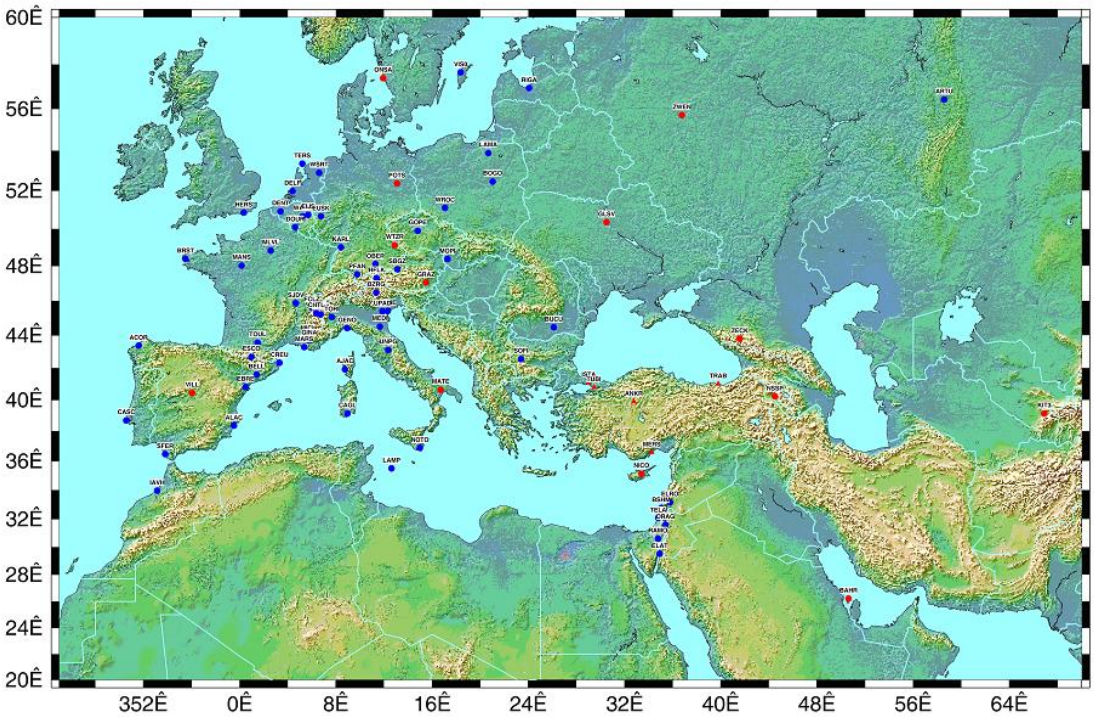
**Çizelge 5.2:** GAMIT yazılımı ile GPS veri değerlendirme aşamasında kullanılan *sesstbl* tablosundaki bazı önemli parametreler.

| Parametre | Değer | Parametre | Değer |
|---|---|---|---|
| Satellite Constraint | 0.01 | Amb.Res. WL | 0.15 0.15 1000. 99. 1000. |
| Ion. Constraints | 0.0 mm+8.00 ppm | Amb.Res. NL | 0.15 0.15 1000. 99. 1000. |
| Interval Zen | 2 | Ref. Sys.for ARC | IGS92 |
| Zenith Constraints | 0.50 | Initial ARC | YES |
| Zenith Model | PWL | Earth Rotation | 7 |
| Zenith Variation | 0.02 100. | Estimate EOP | 15 |
| Elevation cutoff | 10 | Wobble Con | 0.01 0.01 |
| Atmospheric grad. | YES | UT1 Con | 0.00001 0.01 |
| Number Grad | 1 | Etide model | IERS92 |
| Gradient Constraints | 0.01 | Tides applied | 15 |
| Gradient Variation | 0.01 100. | Antenna Model | ELEV |
| Output met | NO | Station Error | ELEVATION 10. 0.0001 |
| Station Constraint | Y | | |

**Çizelge 5.3:** GAMIT yazılımı ile GPS veri değerlendirme aşamasında kullanılan *sittbl* tablosundaki bazı önemli parametreler.

| Parametre | Değer | Parametre | Değer |
|---|---|---|---|
| COORD.CONSTR | 100. 100. 100. | DMAP | NMFH |
| EPOCH | 001- * | WMAP | NMFW |
| CUTOFF | 10.0 | MET. VALUE | 1013.25 20.0 50.0 |
| APHS | ELEV | SAT. | YYYYYYYY |
| CLK | NNN | ZCNSTR | 0.500 |
| KLOCK | 3 | ZENVAR | 0.020 |
| DZEN | SAAS | ZENTAU | 100. |
| WZEN | SAAS | | |

Sabit GPS istasyonlarının günlük çözümlerine, Türkiye'nin yakın çevresinden, koordinatları ve hızları ITRF2000'de (International Terrestrial Reference Frame – 2000) tanımlı 13 global IGS istasyonunun verisi de dahil edilerek koordinat ve hız datumları belirlenmektedir. Kullanılan IGS istasyonları Şekil 5.2'de verilmiştir. Yörünge bilgisi olarak IGS (International GPS Service) final yörünge bilgileri ve yer dönme parametreleri olarak da USNO (United States Naval Observatory) tarafından üretilen Bulletin-B (Bülten-B) değerleri kullanılmıştır. Günlük çözüm dosyası, 24 saat esasına dayalı olarak değerlendirilen verilerden elde edilen gevşek koşullu parametre tahmini ve varyans-kovaryanslardan oluşmaktadır.




**Şekil 5.2:** Sabit GPS istasyonları analizlerinde kullanılan IGS istasyonlarının dağılımı (Kırmızı noktalar).

## 5.2 Günlük Çözümlerin Birleştirilmesi

Günlük çözümler GAMIT/GLOBK (V 10.2) yazılımının otomatik programları aracılığıyla gevşek koşullu olarak üretilmektedir. Gevşek koşullu çözümde istasyon koordinatları ve uydu koordinatları sıkı bir şekilde belirlenmez. Yine bu çözümlerde istasyon ve uydu koordinatları, iyi belirlenmiş bir referans sisteminin içinde değildir. Sadece baz bileşenleri çok yüksek doğrulukta belirlenmektedir. Bu sistem istenildiği gibi döndürülebilir ve taşınabilir. Günlük serbest çözümler oluşturulduktan sonra, ITRF2000 koordinatı ve hızı hassas olarak bilinen IGS noktalarının koordinatları sabit alınarak, GAMIT/GLOBK'in "glorg" modülü aracılığıyla koordinatlar ve nokta hızları için datum tanımlaması yapılmaktadır. Yine "glred" modülü kullanılarak günlük koordinat tekrarlılıkları ve zaman serileri oluşturulmaktadır. Glred ve glorg modüllerinin kullandığı tablolarda seçilen parametrelere ilişkin değerler Çizelge 5.4'de verilmiştir.

**Çizelge 5.4:** GLOBK yazılımı ile zaman serilerinin oluşturulması aşamasında kullanılan glred ve glorg tablolarındaki bazı önemli parametreler.

| Glred modülü Parametre | Değer | Glorg modülü Parametre | Değer |
|---|---|---|---|
| in_pmu | pmu.bull_b | apr_file | itrf00.apr |
| apr_file | itrf00.apr | stab_site | pots onsa wtzr vill mate graz zwen kit3 bahr nico glsv nssp |
| max_chi | 30 50 2000.0 | pos_org | xrot yrot zrot xtran ytran ztran scale |
| apr_neu | all 10 10 10 0 0 0 | stab_min | 1.0 1.0 |
| apr_wob | .25 .25 .001 .001 0 0 0 0 | cnd_hgtv | 100 100 5 5 |
| apr_ut1 | .25 .25 .001 .001 0 0 | stab_ite | 4 0.5 4 |

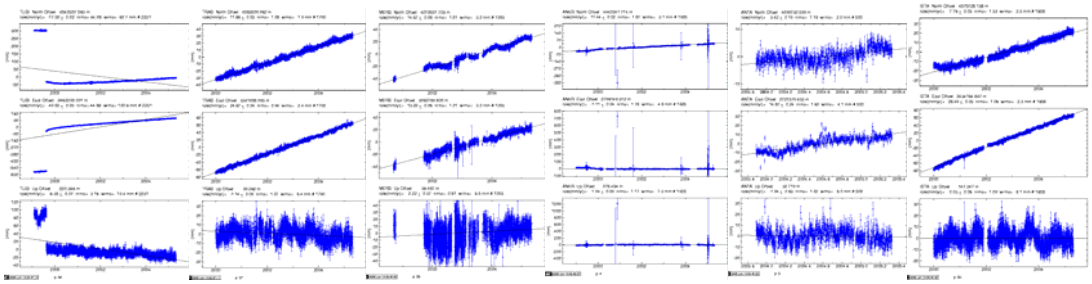
GLOBK, jeodezik verilerin değerlendirilmesi sonucu oluşan çözümleri birleştirmek için kullanılan bir Kalman filtreleme tekniğidir. GLOBK'in temel girdi kütüğü GAMIT değerlendirmesi sonucu oluşan gevşek koşullu (h-dosyaları) çözümlerdir. "Globk" modülünün kullanıldığı 3 temel uygulama bulunmaktadır:

1. Kaba hatalı herhangi bir ölçü veya istasyonu belirlemek ve temizlemek amacıyla zaman serilerinin oluşturulması (koordinat tekrarlılıklarının test edilmesi)

2. Birden fazla günde ölçüsü olan kampanyaların günlerinin birleştirilerek istasyon koordinatlarının ortalama bir değerini hesaplamak amacıyla tek bir çözüm haline getirmek.
3. Çeşitli yıllara ait gözlemlerden elde edilen ortalama nokta koordinatlarının birleştirilmesi ile istasyon hızlarının elde edilmesi.

GLOBK istasyon hızlarının lineer değiştiğini kabul etmektedir. Gevşek koşullu başlangıç günlük çözüm dosyasındaki hiçbir hatayı gideremez. GLOBK yerel günlük çözümleri SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) global çözümleri ile birleştirebilir. SOPAC çözümleri global IGS ağındaki noktaların gevşek koşullu çözümlerinden oluşmaktadır. Yine GLOBK çözümleri genellikle gevşek koşullu olarak üretilmektedir, fakat güvenilir IGS istasyonlarının koordinatlarına sıkı koşul uygulayarak "glorg" modülü aracılığıyla referans sistemi tanımlanabilmektedir.

Bu kapsamda 2006 yılı başına kadar istasyonların zaman serileri oluşturulmuştur. Şekil 5.3'de üretilen ham zaman serileri görülmektedir.



**Şekil 5.3:** SGPS istasyonu verilerinden üretilen günlük koordinat zaman serileri.

## 5.3 Zaman Serilerindeki Kaba Hataların Ayıklanması

Günlük çözümlerden zaman serilerinin oluşturulmasından sonraki aşama, veri içerisindeki uyuşumsuz veya kaba hatalı ölçülerin çıkarılmasıdır. Çünkü daha sonraki analizlerde bu ölçüler analizin sonuçlarını hatalı olarak etkileyecektir.

### 5.3.1 GPS zaman serilerindeki kaba hataların sebepleri

GPS koordinat zaman serilerindeki kaba hatalar aşağıda verilen nedenlerin karmaşık bir bileşiminden kaynaklanabilir:

- GPS veri kalite problemleri
- Çok yolluluk ve istasyona özgü diğer hatalar
- Atmosferik refraksiyon
- Yanlış tamsayı faz bilinmeyenlerinin seçilmesi

Atmosferik refraksiyon modelleri düşük yükseklik açısında oldukça zayıf olduğu için verilerdeki 10-100 m artığa sahip sapmalar, uydular doğduktan sonra uydu yükseklik açısını geçer geçmez oluşur. Genel olarak tüm GPS uygulamalarında düşey yöndeki koordinat hataları yatay yöndeki hatalardan büyüktür.

Çözülen baz uzunluğuna bağlı olarak veri dağınıklığının ve kaba hataların sayılarının artması, verinin tek bir zaman anı için doğru tamsayı belirsizliklerinin çözümünü zorlaştırmaktadır. Yanlış seçilen tamsayı faz belirsizlikleri düşey zaman serilerinde küçük bir hataya, yatay zaman serilerinde ise basamak şeklinde giden sistematik bir kayıklığa sebep olur. Diğer taraftan, çok yolluluk ve troposferik refraksiyonun karşılıklı etkileşimi, yatay ve düşey koordinat zaman serilerinde düşeyde daha önemli bir büyüklüğe sahip daha rastlantısal bir dağılıma sebep olurlar.

### 5.3.2 Kaba hataların ayıklanması

Günlük çözümlerin birleştirilmesiyle elde edilen zaman serileri Şekil 5.3'den de görüldüğü gibi kaba hata içermektedir. Özelikle Ankara istasyonunda gözle dahi izlenmesi mümkün olan uyuşumsuz verilerin zaman serilerinden çıkarılması gerekmektedir. Zaman serilerinde çeşitli nedenlerden kaynaklanan kaba hatalı ölçülerin bulunduğu gözlenmektedir. İstasyona ait o günkü verilerin kesikli olması veya istasyonda bulunan GPS alıcısından kaynaklanan hatalar nedeniyle GPS veri değerlendirmesi sonucunda bazı istasyonların ilgili günlerinde problem bulunabilmektedir. Bu ölçülerin temizlenebilmesi ve zaman serileri analizine hazır hale getirebilmek için istatistiksel kaba hata ayıklama testleri kullanılmaktadır. En çok kullanılan kaba hata ayıklama teknikleri Baarda ve Pope testleridir.

Baarda testi ölçülerin öncül hatalarını bilinen kabul eden bir tekniktir. Zaman serilerindeki jeodezik koordinat hataları dikkatlice incelendiğinde istasyonun veri kesikliği yaşadığı günlerde hatasının yüksek fakat genel eğime yakın; ölçü kesikliği olmayıp hatasının küçük fakat genel hız eğiminden uzak olduğu veriler

gözlenmektedir. Modellendirilemeyen bu verilerin genel hız eğimine katkısını azaltmak için tüm günlük çözümlerin hatalarının eşit alınmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir. Bu sebeple zaman serilerine Pope kaba hata testi uygulanmaktadır. Dengelemede kullanılan lineer regresyon modeli:

$$x(t_i) = x_0 + r\, t_i + \varepsilon_x(t) \qquad \textbf{(5.1)}$$

$x(t_i)$ : $t_i$ zaman anlarındaki zaman serileri

$x_0$ : Doğrunun x eksenini kestiği nokta

r : Eğim

$\varepsilon_x(t)$ : Hata miktarı

Pope testi, ölçülerin öncül hatalarının bilinmesini gerektirmediği için kaba hata testinde kullanılmıştır. Pope testinin aşamaları şunlardır:

- Kapanma hatalarının standardize edilmesi: Apostriori varyans faktörünün dengeleme sonrası hataların kovaryans matrisi ile çarpılıp diagonal elemanların karekökleri alındıktan sonra kapanma hatalarına bölünmesi ile elde edilir. ($u_i=v_i / s_i$ )

- Eğer $u_i > \tau_{(v,1-\alpha)}$ ise o ölçü kaba hatalı bir ölçüdür. Burada n-u serbestlik derecesi, $\alpha_0 = 1 - (1-\alpha)^{1/n}$ olmak üzere $\alpha$ güven aralığını ifade etmektedir.

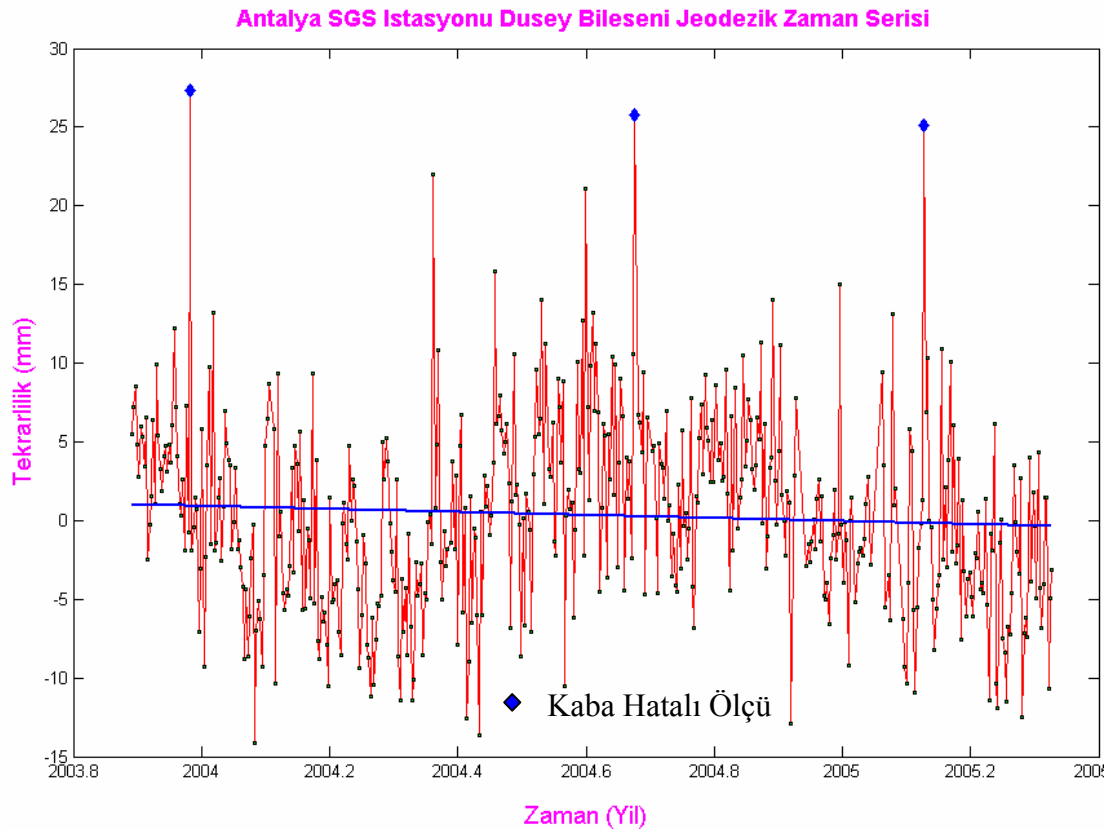
- $\tau$ istatistik değeri, serbestlik derecesi, gözlem sayısı ve güven aralığına bağlı 3 boyutlu bir değişkendir.

- $\tau$ istatistik değeri ve Student (t) dağılımlarının ihtimal yoğunluk fonksiyonları integralleri arasındaki ilişki (5.2a) ve (5.2b)'de verilmiştir.

$$\xi_{\tau_{(v,1-\alpha)}} = \frac{\sqrt{v}\cdot\xi_{t_{(v-1,1-\alpha_o/2)}}}{\sqrt{v-1+\xi^2_{t_{(v-1,1-\alpha_o/2)}}}} \qquad \textbf{(5.2a)}$$

$$\alpha_o = 1-(1-\alpha)^{1/n} \qquad \textbf{(5.2b)}$$

Glred ile elde edilen jeodezik zaman serileri MATLAB yazılımında geliştirilen dengeleme programı kullanılarak yukarıda verilen doğrusal regresyon modeline ve dolaylı ölçüler metoduna göre analiz edilmektedir. Bu dengeleme aşamasında eş zamanlı olarak Pope kaba hata testi de uygulanarak kaba hatalı ölçüler temizlenmektedir. Kaba hata testi ile görsel olarak çizdirilen ve dosyaya kaydedilen ölçülere ilişkin örnek Şekil 5.4'de verilmektedir.



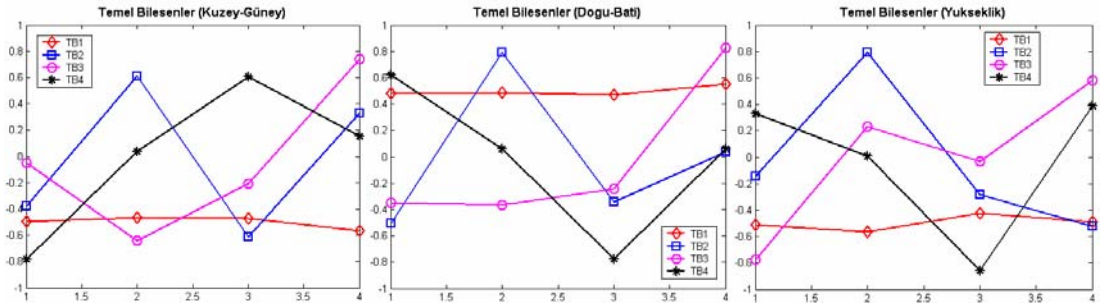

**Şekil 5.4:** Antalya SGPS istasyonu zaman serisinin dengeleme sonrası gözlenen koordinat tekrarlılıkları ve kaba hatalı ölçüleri.

Kaba hata testi yaparken dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus da kaba hatalı ölçüler ayıklanırken bu işlemi birer birer yapmak gerekmesidir. Yani önce belirlenen aralığın dışında kalan en büyük gözlem atıldıktan sonra tekrar dengeleme yapılır. Bu şekilde kaba hatalı ölçü kalmayana kadar dengelemeyi tekrar etmek gereklidir.

## 5.4 SGPS İstasyonları Zaman Serilerinin Temel Bileşenler Analizi

TBA'den önce analiz edilecek verilerin aynı süreyi kapsayacak kısımlarının seçilmesi gerekmektedir. Bu noktada en kısa ölçü süresine bağlı kalma durumu ortaya çıkmaktadır. Antalya istasyonunun 2 sene gibi bir veriye sahip olmasından dolayı ilk aşamada bu analize dahil edilmemiştir. Mersin istasyonu da analize girecek veri boyutunu 8.5 ay gibi bir süre kısalttığı için, ilk aşamada 4 istasyon (Ankara,İstanbul,Tübitak,Trabzon) TBA'ne dahil edilmiştir.

Söz konusu istasyonların üç bileşenine (kuzey-güney, doğu-batı ve yükseklik) Bölüm 4.1'de açıklanan TBA uygulanmıştır. Analiz için zaman aralığı tmin=2001.004110 tmax= 2005.995212, yani 5 senelik bir süredir. Bu süre içindeki zaman serilerindeki boşluklar doğrusal regresyon ile doldurularak analize hazır duruma getirilmiştir. TBA sonucunda her üç bileşen için öz vektörlerin dağılımı Şekil 5.5'de verilmiştir.

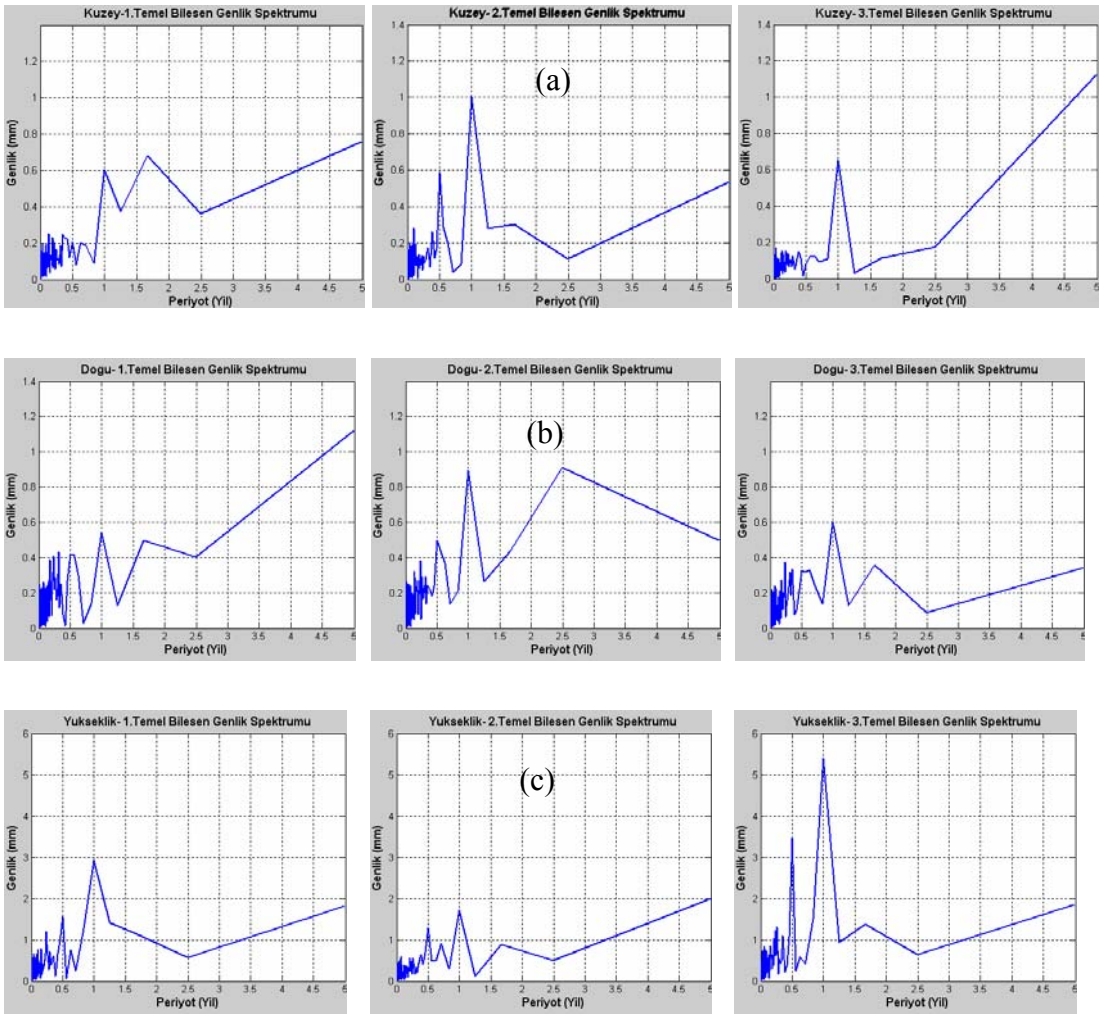



**Şekil 5.5:** TBA sonucunda oluşan temel bileşenlerin istasyonlara göre dağılımı.

Şekil 5.5'de görüldüğü üzere, her üç bileşen için de 1.TB'nin öz vektörleri istasyonlara eşit olarak dağılmıştır. 1.TB'ler tüm serilerde yaklaşık olarak verilerin yarısını temsil ettiği göz önüne alındığında, zaman serilerindeki periyodik değişimlerin konumsal olarak dağılmış istasyonlarda aynı frekanslı sinyallerin baskın olarak yer aldığı değerlendirilmektedir. Zaman serilerindeki varyansı, ilk üç temel bileşen yaklaşık %90-%95 seviyesinde açıklayabilmektedir (Çizelge 5.5). Geriye sadece bir temel bileşen kalmaktadır. Dolayısıyla veri boyutunda büyük oranda bir indirgeme sağlanmamıştır. Çok daha fazla sayıda istasyon olması durumunda sağlayabileceği kolaylık burada karşımıza çıkmamaktadır. Sadece bir ön analiz ile konumsal olarak dağılmış istasyonlar arasında ortak bazı periyodik etkilerin varlığını göstermesi açısından fayda sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı doğrultusunda tüm istasyonlar için eğer birinci temel bileşende %95 seviyesinde varyans değişimini

temsil eden bir durum ortaya çıksaydı, tek bir bileşenin analizi ile tüm istasyonlar için bir genelleme yapmak söz konusu olabilecekti.

TBA sonucunda elde edilen ilk üç temel bileşene Bölüm 4.2.2'de açıklanan Lomb-Scargle algoritması ile spektral analiz uygulanmıştır. Spektral analiz sonucu elde edilen genlik spektrumları Şekil 5.6'da, yine aynı algoritma ile bulunan baskın sinyaller ve periyotları Çizelge 5.5'de sunulmuştur.




**Şekil 5.6:** Ankara, İstanbul, Tubitak ve Trabzon istasyonlarının (a) Kuzey-Güney (b) Doğu-Batı (c) Yükseklik Bileşenlerinin TBA analizi sonucu elde edilen 1,2 ve 3.Temel Bileşenlerin L-S algoritmasına ait genlik spektrumları.

**Çizelge 5.5:** Ankara, İstanbul, Trabzon ve Tubitak SGPS istasyonlarının Temel Bileşenler Analizi ile hesaplanan 1,2 ve 3. TB'in L-S algoritması ile anlamlı bulunan periyotları ve genlikleri.

| KUZEY-GÜNEY BİLEŞENİ | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T_1$ (Yıl/Gün) | $A_1$ (mm) | $T_2$ (Yıl/Gün) | $A_2$ (mm) | $T_3$ (Yıl/Gün) | $A_3$ (mm) | $T_4$ (Yıl/Gün) | $A_4$ (mm) | $T_5$ (Yıl/Gün) | $A_5$ (mm) | Varyansı Temsil Etme Oranı |
| TB1 | 1.66/ 608 | 0.68 | 0.9982/ 365 | 0.60 | - | - | - | - | - | - | % 48 |
| TB2 | - | - | 0.9982/ 365 | 1.00 | 0.499/ 182.3 | 0.58 | 0.3839/ 140.2 | 0.26 | 0.1019/ 37.2 | 0.28 | % 26 |
| TB3 | - | - | 0.9982/ 364.6 | 0.65 | - | - | - | - | - | - | % 17 |
| DOĞU-BATI BİLEŞENİ | | | | | | | | | | | |
| | $T_1$ (Yıl/Gün) | $A_1$ (mm) | $T_2$ (Yıl/Gün) | $A_2$ (mm) | $T_3$ (Yıl/Gün) | $A_3$ (mm) | $T_4$ (Yıl/Gün) | $A_4$ (mm) | $T_5$ (Yıl/Gün) | $A_5$ (mm) | Varyansı Temsil Etme Oranı |
| TB1 | - | - | 0.9982/ 364.6 | 0.54 | 0.5546/ 202.6 | 0.42 | 0.2377/ 86.8 | 0.41 | 0.1783/ 65.1 | 0.38 | % 60 |
| TB2 | 2.4956/ 911.5 | 0.91 | 0.9982/ 364.6 | 0.89 | 0.4991/ 182.3 | 0.50 | 0.2377/ 86.8 | 0.38 | - | - | % 17 |
| TB3 | 1.6637/ 607.7 | 0.36 | 0.9982/ 364.6 | 0.60 | 0.6239/ 227.9 | 0.33 | 0.3565/ 130.2 | 0.33 | - | - | % 17 |
| YÜKSEKLİK BİLEŞENİ | | | | | | | | | | | |
| | $T_1$ (Yıl/Gün) | $A_1$ (mm) | $T_2$ (Yıl/Gün) | $A_2$ (mm) | $T_3$ (Yıl/Gün) | $A_3$ (mm) | $T_4$ (Yıl/Gün) | $A_4$ (mm) | $T_5$ (Yıl/Gün) | $A_5$ (mm) | Varyansı Temsil Etme Oranı |
| TB1 | - | - | 0.9982/ 364.6 | 2.93 | 0.4991/ 182.3 | 1.56 | 0.2377/ 86.8 | 1.20 | - | - | % 64 |
| TB2 | 1.6637/ 607.7 | 0.88 | 0.9982/ 364.6 | 1.71 | 0.7130/ 260.4 | 0.91 | 0.4991/ 182.3 | 1.29 | 0.3839/ 140.2 | 0.64 | % 15 |
| TB3 | 1.6637/ 607.7 | 1.38 | 0.9982/ 364.6 | 5.40 | 0.4991/ 182.3 | 3.47 | 0.3565/ 130.2 | 1.10 | 0.2377/ 86.8 | 1.21 | % 11 |

Çizelge 5.5'de her üç bileşende de senelik ve 6 aylık etkilerin yoğun olarak bulunduğu gözlenmektedir. Bunların yanında 608 gün ve 2.5 sene periyotlu bazı sinyallerin varlığı dikkati çekmektedir. Fakat bunlar tüm TB'lere ortak olarak dağılmamıştır.

TBA veri boyutu indirgemelerinde oldukça güçlü bir araçtır. Fakat istasyon sayısının az olması durumunda önemli fayda sağlamadığı değerlendirilmektedir. TUSAGA AKTİF projesinde olduğu gibi çok fazla istasyon olması durumunda (147 istasyon), ortak bazı etkilerin çabucak görülmesi açısından ve gerektiğinde veri indirgemesi yapılacağı durumlarda, yukarıda anlatıldığı şekilde yapılacak bir analizle önemli faydalar sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

## 5.5 GPS Zaman Serilerinin Lomb-Scargle Yöntemi ile Spektral Analizi

Bu çalışma kapsamında, Türkiye genelinde dağılmış 6 SGPS istasyonunun zaman serilerindeki etkili sinyalleri ve genlikleri tespit etmek amacıyla Lomb-Scargle algoritması kullanılmıştır. Zaman serilerindeki uyuşumsuz ölçüler ve istasyon arızaları gibi sebeplerden dolayı gözlem yapılamayan günlerin olmasından dolayı, tüm istasyonların her üç bileşeninde de veri kayıpları söz konusudur.

Veri kayıplarından dolayı boşluklar mevcut olan zaman serilerinin güç spektrum davranışlarını inceleyebileceğimiz algoritma, 4.2.2 bölümünde açıklandığı gibi, Lomb-Scargle algoritmasıdır. Bu çalışmada, Brett Shoelson tarafından MATLAB ortamında hazırlanan "lombscargle.m" yazılımı kullanılmıştır. Yine söz konusu yazılımda, kullanıcı tarafından belirlenebilen bir güven aralığında (%95 olarak seçilmiştir) anlamlı sinyalleri ve ilgili genliklerini sunabilme imkanı mevcuttur. "lombscargle.m" yazılımının internet ortamında serbest dağıtımı yapılmaktadır. Yine bu çalışma kapsamında hazırlanan tüm analiz yazılımlarının MATLAB ortamında hazırlanmış olmasından dolayı, "lombscargle.m" yazılımı oldukça önemli avantajlar sağlamıştır.

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

Lomb-Scargle algoritması kullanılarak istasyonların kuzey-güney, doğu-batı ve yükseklik bileşenlerinin spektral analizi yapılmıştır. Yazılım tarafından anlamlı bulunan periyodik sinyaller ve genlik değerleri sırasıyla Çizelge 5.6, Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8'de sunulmuştur.

**Çizelge 5.6:** Zaman serilerinin Kuzey-Güney Bileşenlerinin L-S analizinde bulunan baskın sinyallerin periyotları ve genlik değerleri

| | $T_1$ (Yıl ve Gün) | $A_1$ (mm) | $T_2$ (Yıl ve Gün) | $A_2$ (mm) | $T_3$ (Yıl ve Gün) | $A_3$ (mm) | $T_4$ (Yıl ve Gün) | $A_4$ (mm) | $T_5$ (Yıl ve Gün) | $A_5$ (mm) | $T_6$ (Yıl ve Gün) | $A_6$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ISTA | - | - | 1.66/ 608 | 0.5 | 1.00/ 365 | 0.9 | - | - | - | - | - | - |
| TRAB | - | - | - | - | 1.00/ 365 | 1.0 | - | - | 0.50/ 182 | 0.6 | - | - |
| ANKR | 2.50/ 912 | 1.0 | - | - | 1.00/ 365 | 0.8 | 0.71/ 260 | 0.4 | 0.55/ 202 | 0.5 | 0.25/ 91 | 0.335 |
| TUBI | - | - | 1.66/ 608.4 | 0.5 | 1.00/ 365 | 0.5 | - | - | - | - | - | - |
| MERS | - | - | - | - | 1.07/ 391 | 3.1 | - | - | 0.48/ 175 | 0.6 | - | - |
| ANTA | - | - | - | - | 1.05/ 385 | 1.0 | - | - | - | - | - | - |

**Çizelge 5.7:** Zaman serilerinin Doğu-Batı Bileşenlerinin L-S analizinde bulunan baskın sinyallerin periyotları ve genlik değerleri

| | $T_1$ (Yıl ve Gün) | $A_1$ (mm) | $T_2$ (Yıl ve Gün) | $A_2$ (mm) | $T_3$ (Yıl ve Gün) | $A_3$ (mm) | $T_4$ (Yıl ve Gün) | $A_4$ (mm) | $T_5$ (Yıl ve Gün) | $A_5$ (mm) | $T_6$ (Yıl ve Gün) | $A_6$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ISTA | 2.50/ 912 | 0.4 | - | - | 1.00/ 365 | 0.7 | - | - | 0.55/ 202 | 0.5 | 0.24/ 87 | 0.4 |
| TRAB | - | - | - | - | 1.00/ 365 | 0.4 | - | - | 0.50/ 182 | 0.5 | 0.24/ 88 | 0.5 |
| ANKR | - | - | - | - | 1.00/ 365 | 0.7 | - | - | 0.62/ 228 | 0.5 | 0.31/ 114 | 0.5 |
| TUBI | - | - | - | - | 1.00/ 365 | 0.5 | - | - | 0.50/ 182 | 0.5 | 0.24/ 87 | 0.4 |
| MERS | - | - | - | - | 1.07/ 391 | 1.6 | - | - | 0.47/ 174 | 0.9 | - | - |
| ANTA | - | - | - | - | 1.05/ 385 | 2.0 | - | - | - | - | 0.23/ 86 | 1.0 |

**Çizelge 5.8:** Zaman serilerinin Yükseklik Bileşenlerinin L-S analizinde bulunan baskın sinyallerin periyotları ve genlik değerleri

| | $T_1$ (Yıl ve Gün) | $A_1$ (mm) | $T_2$ (Yıl ve Gün) | $A_2$ (mm) | $T_3$ (Yıl ve Gün) | $A_3$ (mm) | $T_4$ (Yıl ve Gün) | $A_4$ (mm) | $T_5$ (Yıl ve Gün) | $A_5$ (mm) | $T_6$ (Yıl ve Gün) | $A_6$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ISTA | - | - | - | - | 1.00/ 365 | 4.3 | - | - | 0.50/ 182 | 2.4 | 0.24/ 87 | 1.0 |
| TRAB | - | - | - | - | 1.00/ 365 | 3.8 | 0.75/ 274 | 1.1 | 0.50/ 182 | 2.4 | - | - |
| ANKR | - | - | - | - | 1.00/ 365 | 2.6 | - | - | 0.50/ 182 | 1.9 | 0.24/ 87 | 1.0 |
| TUBI | - | - | - | - | 1.00/ 365 | 1.9 | - | - | 0.50/ 182 | 1.4 | 0.24/ 87 | 0.8 |
| MERS | - | - | - | - | 0.85/ 313 | 3.0 | 0.61/ 224 | 1.5 | 0.47/ 174 | 2.3 | 0.23/ 84 | 2.0 |
| ANTA | - | - | - | - | 1.05/ 385 | 3.3 | - | - | 0.52/ 192 | 1.5 | 0.08/ 31 | 1.3 |

Spektral analiz sonucunda, tüm istasyonların her üç bileşeninde de senelik ve altı aylık etkiler, %95 güven aralığında anlamlı olarak tespit edilmiştir. Bazı istasyonlarda (ISTA, TUBI ve ANTA'nın kuzey, ANTA'nın batı) altı aylık etki baskın olarak görülmemiştir. Spektrum değerlerine bakıldığında altı aylık etkinin 0.2-0.4 mm civarında olduğu belirlenmiştir.

Tespit edilen senelik sinyallerin genliklerinin yatayda ortalama 1 mm, düşeyde ise ortalama 3.2 mm olduğu gözlenmektedir. Sonuç olarak tüm istasyonlarda, genliği ve fazı değişiklik göstermekle birlikte, senelik ve altı aylık sinyallerin kullanılmasına karar verilmiştir.

## 5.6 SGPS İstasyonlarında Senelik ve Altı Aylık Sinyallerin Hesaplanması

Zaman serileri spektral analizi sonucunda çıkan baskın sinyallerden en önemlileri, altı aylık ve bir senelik frekansa sahip olan etkilerdir. Söz konusu sinyallerin doğrusal hız ile beraber En Küçük Kareler Dengelemesi ile genlik ve fazlarının hesaplanabilmesi amacıyla aşağıdaki matematiksel model kullanılmıştır.

$$X(t_i)=X_o+r\,t_i+a.\sin(2\pi t_i)+b.\cos(2\pi t_i)+c.\sin(4\pi t_i)+d.\cos(4\pi t_i)+\varepsilon_x(t_i) \quad \textbf{(5.3)}$$

Burada;

$X_o$ : Zaman serisinin x eksenini kestiği nokta,

r : Doğrusal hız,

a, b : Senelik etkinin genliğinin düşey ve yatay bileşenleri,

c, d : Altı aylık etkinin genliğinin düşey ve yatay bileşenleri

olarak alınmıştır. Genlik ve faz hesaplamaları ise aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

$$\text{Genlik}_{(\text{senelik})}=\sqrt{a^2+b^2} \quad \textbf{(5.4a)}$$

$$\text{Genlik}_{(\text{altı aylık})}=\sqrt{c^2+d^2} \quad \textbf{(5.4b)}$$

$$\text{Faz}_{(\text{senelik})} = \arctan(a/b) \quad \textbf{(5.5a)}$$

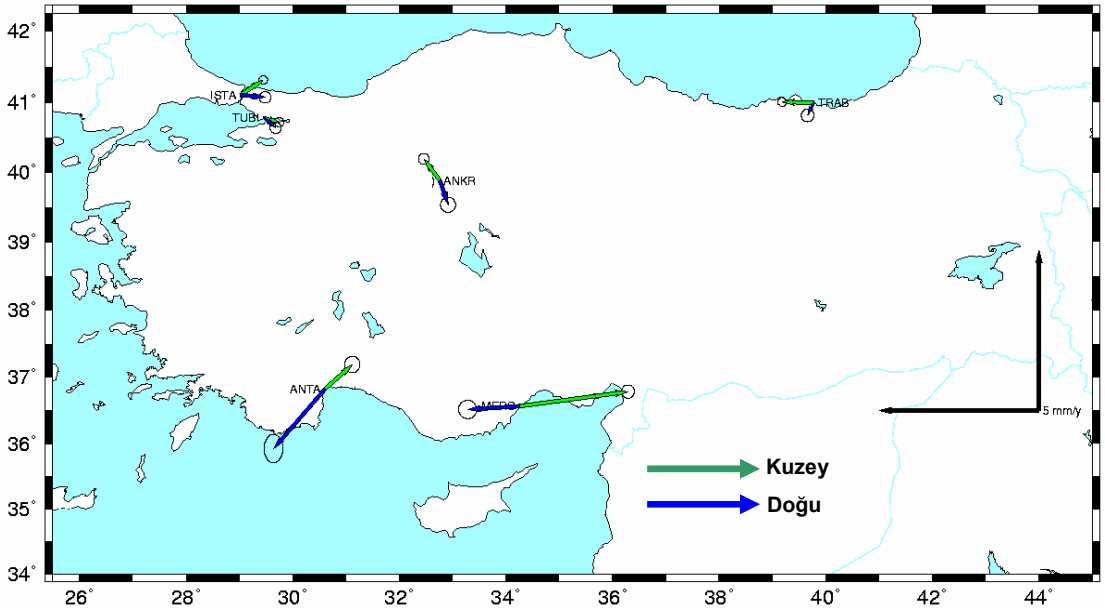
$$\text{Faz}_{(\text{altı aylık})} = \arctan(c/d) \quad \textbf{(5.5b)}$$

Eşitlik (5.3) ile verilen matematiksel modelin En Küçük Kareler Yöntemiyle dengelenmesi sonucu elde edilen parametreler Çizelge 5.9'da sunulmuştur. Hesaplanan senelik ve altı aylık parametreler daha sonraki bölümde kampanya tipi ölçülerle hesaplanan hızların geliştirilmesinde kullanılacaktır.

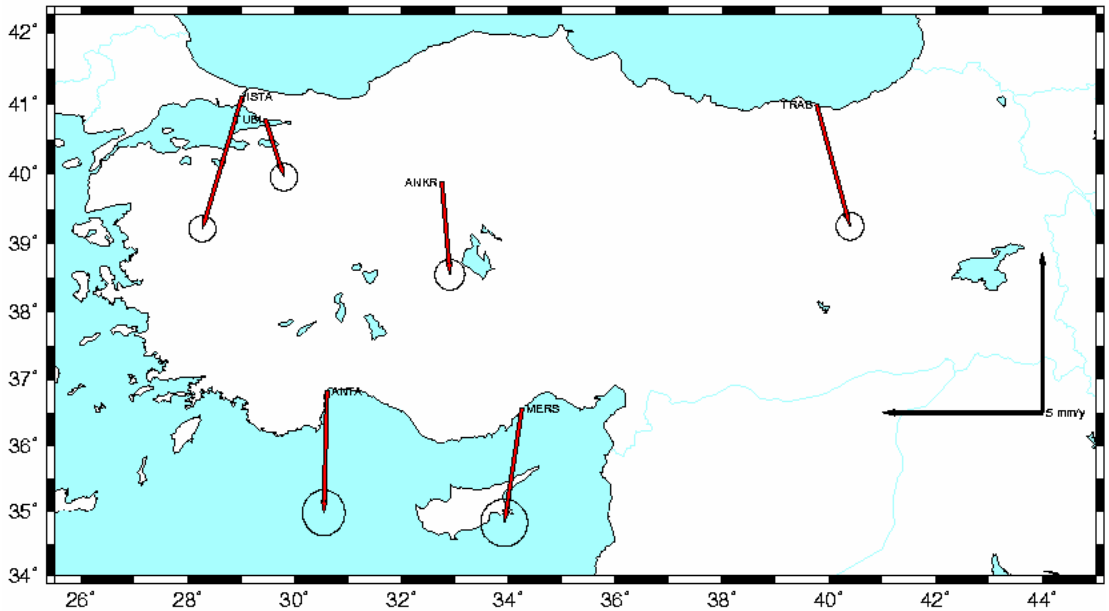
**Çizelge 5.9:** 2006 yılı başına kadar olan zaman serilerinden elde edilen senelik ve altı aylık etkilerin genlik değerleri.

| KUZEY - GÜNEY | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| İstasyon | Hız (mm/yıl) | σ (±mm/yıl) | Senelik (cos) (mm) | σ (±mm) | Senelik (sin) (mm) | σ (±mm) | 6 aylık (cos) (mm) | σ (±mm) | 6 aylık (sin) (mm) | σ (±mm) |
| İstanbul | 8.43 | 0.03 | 0.72 | 0.05 | 0.47 | 0.05 | 0.16 | 0.05 | 0.10 | 0.05 |
| Trabzon | 11.75 | 0.02 | -0.99 | 0.05 | 0.03 | 0.05 | 0.43 | 0.05 | 0.43 | 0.05 |
| Ankara | 10.39 | 0.03 | -0.49 | 0.07 | 0.67 | 0.07 | 0.29 | 0.07 | -0.24 | 0.07 |
| Tubitak | 8.36 | 0.03 | 0.49 | 0.06 | -0.15 | 0.06 | 0.17 | 0.06 | 0.01 | 0.06 |
| Mersin | 14.82 | 0.04 | 3.40 | 0.08 | 0.45 | 0.08 | -0.12 | 0.08 | 0.03 | 0.08 |
| Antalya | 3.37 | 0.12 | 0.85 | 0.10 | 0.75 | 0.10 | -0.08 | 0.10 | 0.41 | 0.10 |
| DOĞU - BATI | | | | | | | | | | |
| İstasyon | Hız (mm/yıl) | σ (±mm/yıl) | Senelik (cos) (mm) | σ (±mm) | Senelik (sin) (mm) | σ (±mm) | 6 aylık (cos) (mm) | σ (±mm) | 6 aylık (sin) (mm) | σ (±mm) |
| İstanbul | 25.82 | 0.04 | 0.77 | 0.07 | -0.07 | 0.07 | 0.25 | 0.07 | -0.38 | 0.07 |
| Trabzon | 25.04 | 0.03 | -0.19 | 0.08 | -0.39 | 0.08 | 0.24 | 0.08 | -0.45 | 0.08 |
| Ankara | 0.52 | 0.04 | 0.26 | 0.09 | -0.75 | 0.10 | 0.31 | 0.09 | -0.17 | 0.09 |
| Tubitak | 22.80 | 0.03 | 0.39 | 0.07 | -0.32 | 0.07 | 0.11 | 0.07 | -0.52 | 0.07 |
| Mersin | 13.67 | 0.06 | -1.62 | 0.12 | -0.10 | 0.12 | 0.30 | 0.11 | -0.39 | 0.12 |
| Antalya | 13.48 | 0.21 | -1.62 | 0.17 | -1.87 | 0.18 | 0.13 | 0.17 | -0.52 | 0.17 |
| YÜKSEKLİK | | | | | | | | | | |
| İstasyon | Hız (mm/yıl) | σ (±mm/yıl) | Senelik (cos) (mm) | σ (±mm) | Senelik (sin) (mm) | σ (±mm) | 6 aylık (cos) (mm) | σ (±mm) | 6 aylık (sin) (mm) | σ (±mm) |
| İstanbul | -0.80 | 0.08 | -1.24 | 0.17 | -4.11 | 0.16 | 0.01 | 0.17 | 2.31 | 0.17 |
| Trabzon | -1.42 | 0.07 | 1.04 | 0.17 | -3.79 | 0.18 | -0.91 | 0.17 | 2.29 | 0.18 |
| Ankara | -3.56 | 0.09 | 0.26 | 0.19 | -2.88 | 0.19 | -0.13 | 0.19 | 2.00 | 0.19 |
| Tubitak | -3.13 | 0.08 | 0.59 | 0.17 | -1.80 | 0.17 | -0.45 | 0.17 | 1.25 | 0.17 |
| Mersin | 4.04 | 0.16 | -0.55 | 0.30 | -3.57 | 0.30 | -1.60 | 0.29 | 0.97 | 0.30 |
| Antalya | -0.96 | 0.34 | -0.10 | 0.27 | -3.80 | 0.29 | 0.40 | 0.27 | 0.89 | 0.28 |

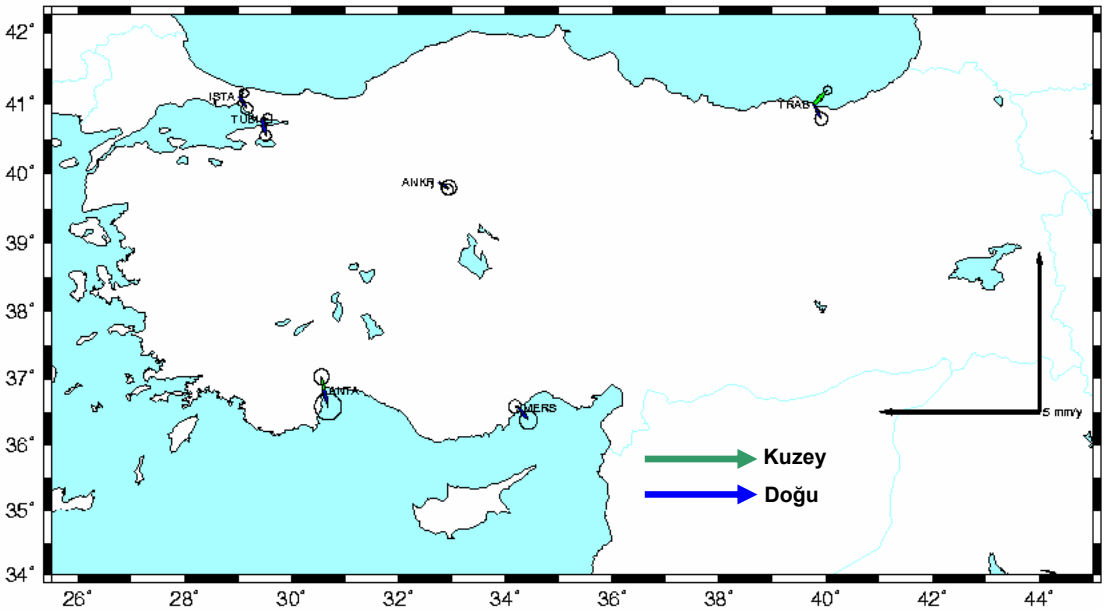
En Küçük Kareler dengelemesi ile hesaplanan ve Çizelge 5.9'da sunulan senelik ve altı aylık etkilerin konumsal olarak görselleştirilmesi amacıyla söz konusu etkilerin yatay ve düşey bileşenleri Türkiye haritası üzerinde Şekil 5.7-10'da verilmiştir. Harita üzerindeki periyodik etkilerin uzunlukları genliklerini, her bir etkinin doğudan itibaren yaptığı açı ise faz açısını göstermektedir.



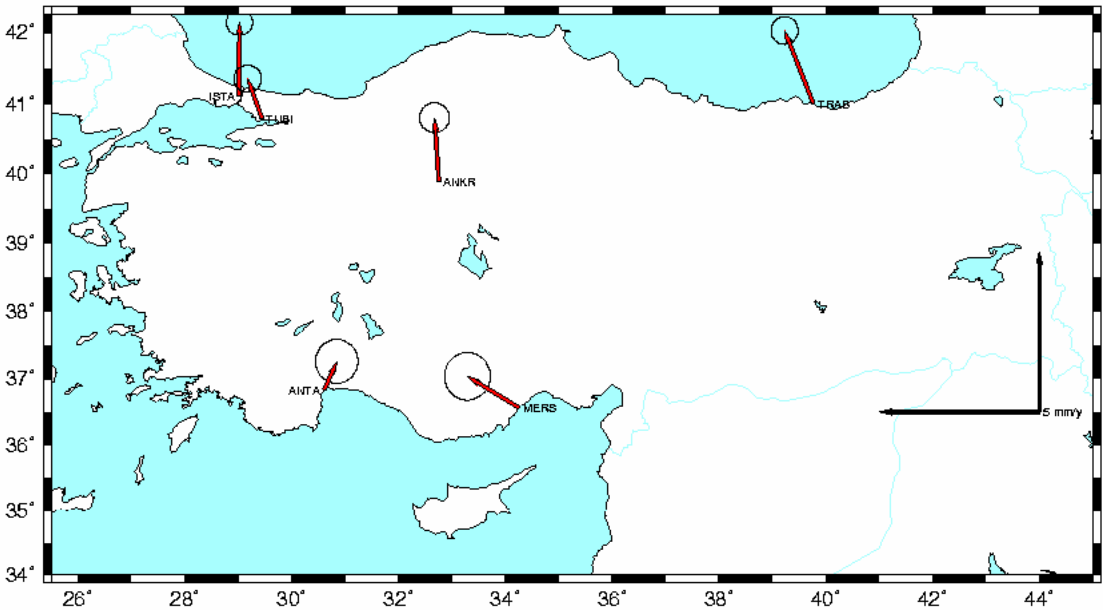

**Şekil 5.7:** Zaman serilerinden elde edilen yatay yöndeki senelik bileşenlerin genliklerinin istasyonlara göre dağılımı.




**Şekil 5.8:** Zaman serilerinden elde edilen düşey yöndeki senelik bileşenlerin genliklerinin istasyonlara göre dağılımı.




**Şekil 5.9:** Zaman serilerinden elde edilen yatay yöndeki altı aylık bileşenlerin genliklerinin istasyonlara göre dağılımı.




**Şekil 5.10:** Zaman serilerinden elde edilen düşey yöndeki altı aylık bileşenlerin genliklerinin istasyonlara göre dağılımı.

# 6. KAMPANYA TİPİ GPS HIZLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Sabit GPS istasyonlarından elde edilen zaman serilerinin analizi ile bulunan çeşitli etkilerin, iki seneden kısa aralıkla ölçü yapılmış bir deformasyon noktasına uygulanarak daha gerçekçi hız hesaplaması yapılabilir. Bu tür uygulamalardan deformasyon analizi yapan bir gözlemci, kısa bir zaman aralığında hesapladığı hızda bazı düzeltmeler getirerek mevsimsel sinyaller elimine edilebilir. Diğer bir uygulama ise hesaplanan TUTGA hızlarına getirilecek düzeltmeler ile hızların iyileştirilmesi çalışmalarıdır.

## 6.1 Deformasyon Ölçmeleri

GPS tekniğini kullanarak deformasyon analizi yapmak isteyen bir ölçmeci, 6 ay veya bir sene aralıkla yaptığı ölçüler ile bir deformasyon veya hız belirlemek isteyebilir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, elde edeceği hızlarda anlık, logaritmik veya periyodik bir etki bulunabilir. Bu etkilerin gölgesinde kalan bir hesaplamadan elde edilecek sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir.

Blewitt ve Lavalle (2002)'e göre jeodezik zaman serilerinden hız analizi yapmak için gerekli süre minimum 2.5 yıldır. Aksi halde düşük frekanslı sinyallerin etkisinin seriden çıkarılması gerekmektedir. Şekil 1.2'de İstanbul SGPS istasyonunun yükseklik bileşenine ait zaman serisi görülmektedir. Bu zaman serisinde spektral analiz ile bir yıllık etkinin genliği 4.3 mm hesaplanmıştır. Eğer kampanya ölçüsü bu nokta yakınında sinyal fazının en düşük olduğu yerde yapılır ve diğer zaman anı da sinyal fazının en yüksek olduğu zamanda yapılırsa, maksimum hata 8.6 mm olur. Yükseklik bileşeninin hızının düşük olduğu göz önüne alınırsa, hızın yönünün de hatalı hesaplanması kaçınılmaz olacaktır.

Kampanya tipi GPS ölçmeleri ile belirlenen GPS hızlarının dikkatli bir biçimde incelenmesi gerekir. Özellikle de kampanyalar arası süre 2 yıldan az ise yukarıda açıklanan hataya düşülmemesi ancak tesadüfî şartlara bağlı olacaktır.

Sabit GPS istasyonları analizlerinden yararlanarak elde edilen önemli periyodik etkilerin çıkarılmasıyla hatalar minimuma indirilecektir. Analizi yapan kişi, ölçü yaptığı zaman anlarındaki etkileri hesaplamalarına dâhil ettiğinde, daha gerçekçi bir hız hesaplayabilecektir.

## 6.2 TUTGA Hızlarına Getirilecek Düzeltmeler

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA); GPS teknolojisine dayalı, ITRF (International Terrestrial Reference Frame) koordinat sisteminde belirli bir zamanda (zaman anı), her noktasında koordinat (X,Y,Z) ve bu koordinatların zamana bağlı değişimleri (hızları Vx, Vy, Vz), ortometrik yükseklikleri (H) ve jeoid yüksekliği (N) bilinen ülke yüzeyine homojen dağılmış yaklaşık 600 noktadan oluşan bir jeodezik ağdır.

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

23 Haziran 2005'de kabul edilen "Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği"ne göre:

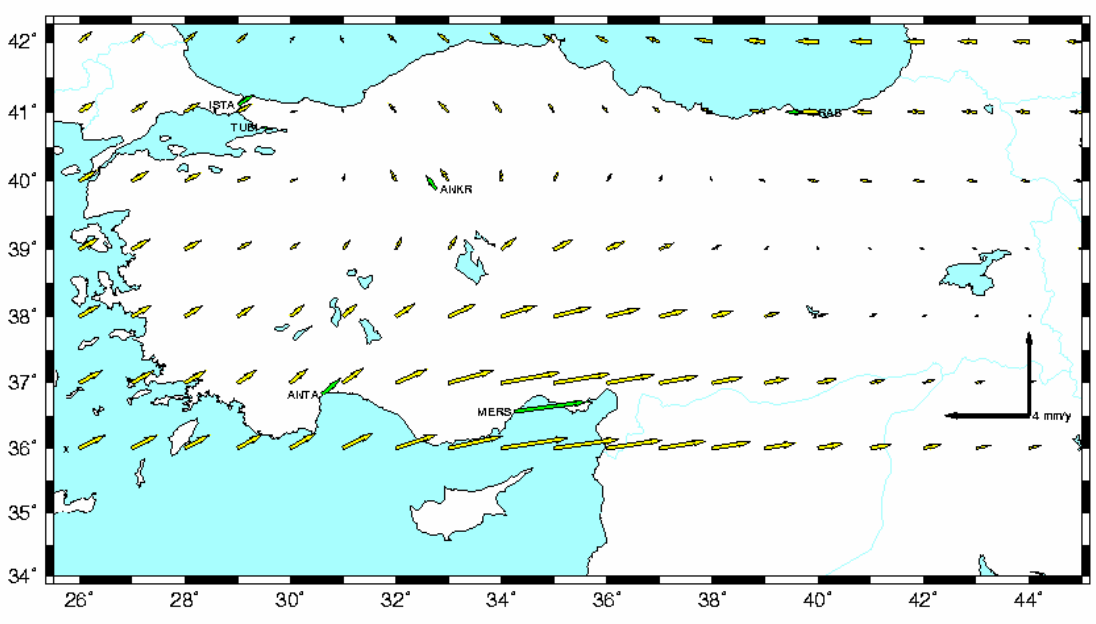
- B Derece Ağlar ve Noktalar Uluslararası veya bölgesel ağlara dayalı Ulusal GPS ağı ve noktalarıdır (TUTGA).
- C Derece Ağlar ve Noktalar: B derece ağın sıklaştırılması ile oluşan ağlardır ve aşağıdaki alt dereceli ağ ve noktalardan oluşur:
- C1 Derece Ağlar ve Noktalar: Üst derecedeki ağlara dayalı,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

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

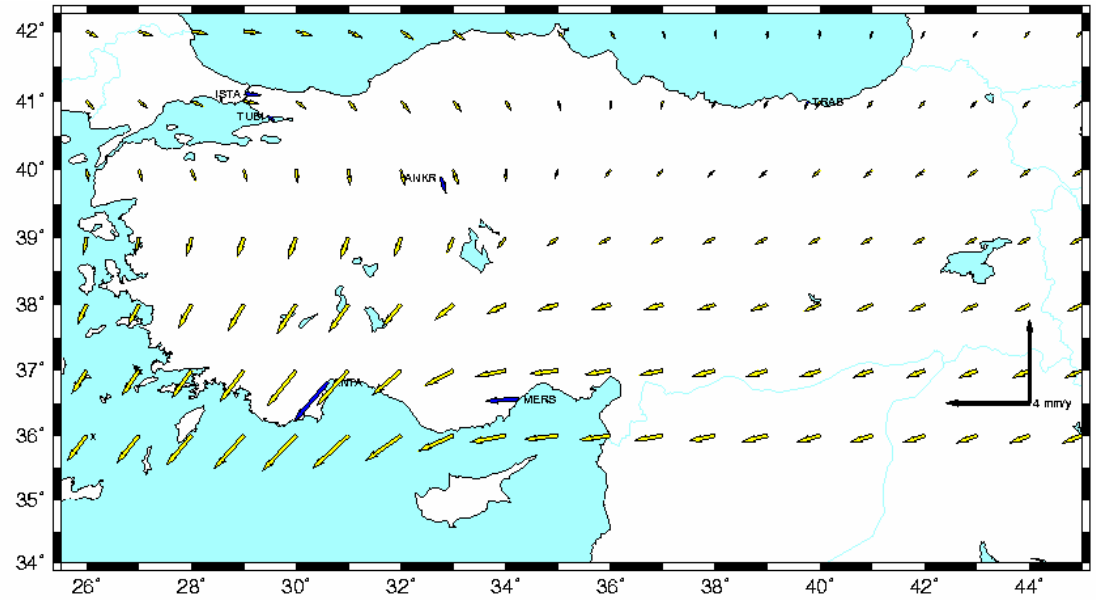
Hız hesaplamaları tamamlanmış olan TUTGA nokta hızlarındaki periyodik sinyallerden kaynaklanan hataları anlamak mümkün değildir. Ancak, iki zaman anı ölçü yapılmış olan bir noktada hız belirlenirken hangi zaman anlarındaki ölçülerin hesaba katıldığı bilgisinden yararlanarak bu etkiler hızlardan çıkarılabilir. İkiden fazla zaman anında ölçü yapılmış noktalarda ise ölçü zaman anlarındaki koordinat bilgileri alınarak yine ilgili zaman anlarındaki kaydırılmış koordinat bilgilerine düzeltmeler getirilebilir. Dolayısıyla, düzeltilmiş hıza sahip TUTGA noktalarından enterpolasyonla elde edilecek hızlar ile AGA ve SGA noktalarındaki hız belirleme çalışmalarına yönelik sıkıntılar giderilmiş olacaktır.

## 6.3 Senelik Etkilerin Gridlenmesi

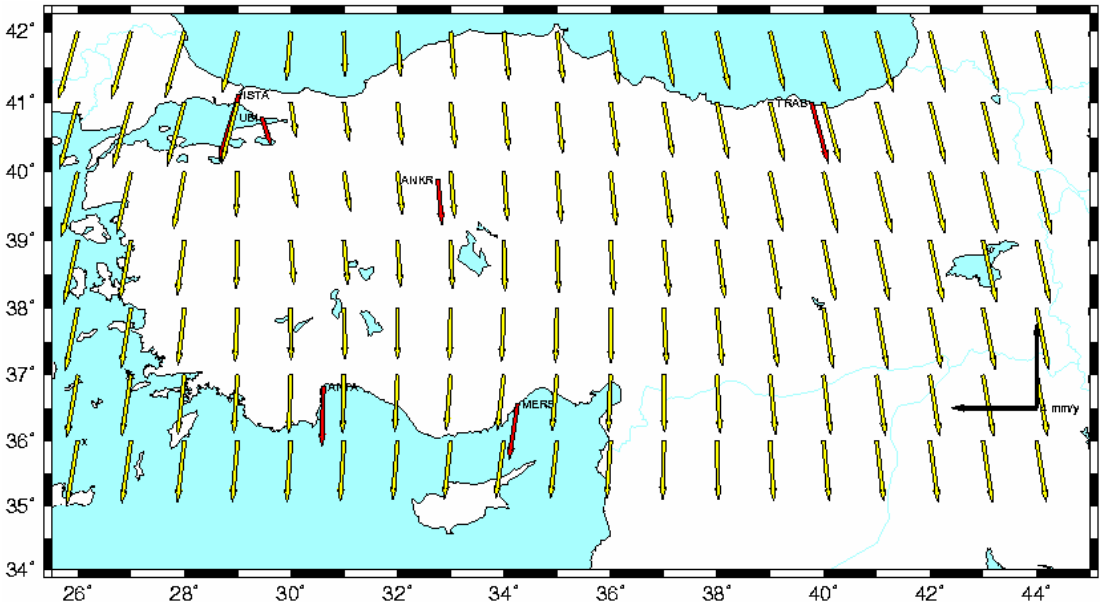
Bu çalışma kapsamında Türkiye'de faaliyet gösteren 6 istasyona ait zaman serileri analizleri yapılarak baskın olarak tespit edilen senelik ve altı aylık sinyallerin genlikleri hesaplanmıştır. Elde edilen genliklerden yararlanarak 1x1 derecelik grid köşe noktalarında genlik değerleri enterpole edilmiştir. Bu gridlerden yararlanarak ilgili TUTGA noktasının veya deformasyon noktasının hızına düzeltme getirilebilir. Senelik etkilerin enterpolasyonu Surfer yazılımı ile Krigging metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekillerde sırasıyla kuzey-güney, doğu-batı ve yükseklik bileşenlerinin zaman serileri analizi ile elde edilen senelik bileşenlerin Türkiye alanında grid köşe noktalarında enterpole ve ekstrapole edilerek hesaplanan sonuçları sunulmuştur.




**Şekil 6.1:** Kuzey-güney bileşeni senelik etkilerinin grid noktalarında enterpolasyonu.




**Şekil 6.2:** Doğu-batı bileşeni senelik etkilerinin grid noktalarında enterpolasyonu.




**Şekil 6.3:** Yükseklik bileşeni senelik etkilerinin grid noktalarında enterpolasyonu.

## 6.4 TUTGA Hızlarının İyileştirilmesine Yönelik Uygulama

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

### 6.4.1 TUTGA noktasının ölçü zaman anlarının bulunması

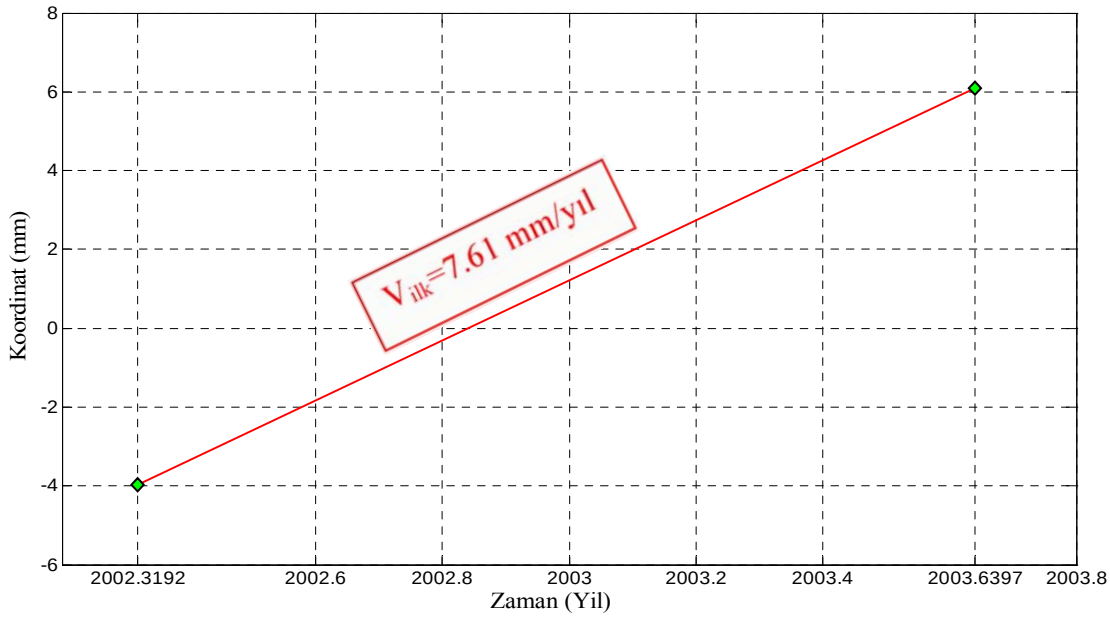
$t_1$=2002.3192 $y_1$=-3.98 mm

$t_2$=2003.6397 $y_2$= 6.08 mm

gerçek ölçü zaman anları koordinat zaman serisinin içerisinden alınarak kampanya tipi ölçü ya da başka bir deyişle TUTGA noktası olarak kabul edilmiştir. Aldığımız bu iki zaman anı koordinatı TUTGA noktasının ölçü zaman anları ve koordinatları da ilgili zaman anlarına karşılık gelen konum bilgileri olarak kabul edebiliriz. Bu iki noktadan hesaplayacağımız doğrusal hız,

$$V_{ilk} = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \qquad \textbf{(6.1)}$$

eşitliğinden hareketle $V_{ilk}$=7.61 mm/yıl olarak bulunmuştur. Şekil 6.4'de bu durum grafik olarak sergilenmiştir.




**Şekil 6.4:** Kampanya tipi ölçüden doğrusal hızın hesaplanması.

İstanbul SGPS istasyonunun yükseklik bileşenine ait zaman serilerinden elde edilen analiz sonuçları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

**Çizelge 6.1:** İstanbul SGPS istasyonunun En Küçük Kareler Analizi sonuçları.

| | (mm) | σ (±mm ) |
|---|---|---|
| Kayıklık: Modelin Y eksenini kestiği noktadaki koordinat değeri | 1608.263 | 168.734 |
| Doğrusal hız ($V_{zsa}$) | -0.803 mm/yıl | 0.084 mm/yıl |
| Senelik Bileşen (Cos) | -1.240 | 0.171 |
| Senelik Bileşen (Sin) | -4.107 | 0.166 |
| Altı aylık Bileşen (Cos) | 0.015 | 0.168 |
| Altı aylık Bileşen (Sin) | 2.314 | 0.167 |

Yukarıdaki çizelgeden istasyona ait doğrusal hızın -0.803 mm/yıl olduğu görülmektedir. Bu hız, istasyona ait 5 senelik zaman serilerinin, senelik ve altı aylık etkileri de göz önüne alınarak hesaplandığı için gerçeğe en yakın hız olarak değerlendirilmektedir. Yine aynı çizelgede, istasyona ait senelik ve altı aylık sinyallerin sinüs ve kosinüs bileşenleri görülmektedir.

### 6.4.2 TUTGA zaman anlarına düzeltme değerlerinin getirilmesi

Zaman serileri analizi ile hesaplanan senelik ve altı aylık etkileri aşağıdaki formülde yerine koyarak ilgili zaman anlarındaki düzeltme değerleri aşağıdaki eşitliklerle elde edilmektedir.

$$\text{Senelik Etki} = \boldsymbol{a}.\sin(2\pi t_i) + \boldsymbol{b}.\cos(2\pi t_i) \quad \textbf{(6.2)}$$

$$\text{Altı Aylık Etki} = \boldsymbol{c}.\sin(4\pi t_i) + \boldsymbol{d}.\cos(4\pi t_i) \quad \textbf{(6.3)}$$

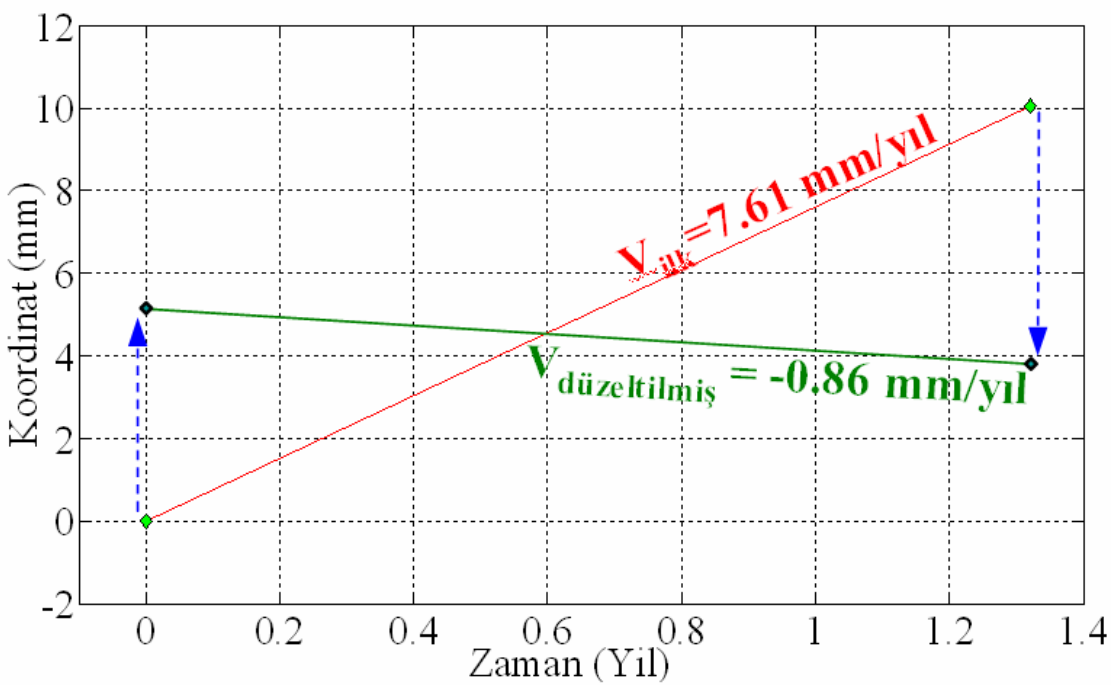
Yukarıdaki eşitliklerde a,b,c ve d parametreleri sırasıyla senelik ve altı aylık etkilerin sinüs ve kosinüs bileşenlerini göstermektedir. $t_i$ değeri ise ilgili zaman anlarını temsil etmektedir.

Bu durumda $t_1$ ve $t_2$ zaman anlarındaki senelik ve altı aylık etkilerin bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$t_1$=2002.3192 zaman anındaki senelik etki = -3.20 mm ve altı aylık etki=-1.78 mm

$t_2$=2003.6397 zaman anındaki senelik etki = 3.95 mm ve altı aylık etki= 2.27 mm

Hesaplama kolaylığı açısından Şekil 6.4'deki grafiğin başlangıç zaman anını ($t_1$), koordinat sisteminde sıfır noktasına kaydırmakta bir sakınca yoktur. Bu durumda geliştirilmesi planlanan TUTGA hızı ile aynı konuma dönüşmüş olacaktır. Çünkü elde mevcut olan TUTGA hızının başlangıç ve bitiş koordinat değerleri yoktur. Yalnızca hız ve zaman anı bilgileri mevcuttur. Eldeki zaman anı bilgilerinin farkını alarak birinci zaman anı sıfıra getirilmiş olur. Bu durumu gösteren grafik Şekil 6.5'de sunulmuştur.




**Şekil 6.5:** TUTGA hızına senelik ve altı aylık etkilerin getirilmesiyle yeni hızının hesaplanması.

### 6.4.3 TUTGA zaman anlarında yeni hız hesabının yapılması

Yukarıda elde ettiğimiz senelik ve altı aylık etkileri ilgili zaman anlarındaki koordinat değerlerinden çıkardığımızda;

0 zaman anındaki yeni koordinat değeri = 0.00 – (-4.98) = 4.98 mm

1.3205 zaman anındaki yeni koordinat değeri= 10.06 – (6.22) = 3.84 mm

olarak bulunur. Yeni hız değeri (6.1) eşitliğinden hareketle,

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

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

Bu şekilde, özellikle iki zaman anı gözlem yapılmış TUTGA hızlarına yapılacak düzeltmelerle hız alanlarının daha gerçekçi bir doğruluğa kavuşacağı değerlendirilmektedir.

### 6.4.4 Ankara istasyonunun TUTGA noktası kabul edilerek hızının iyileştirilmesi

Yukarıdaki örnekte, TUTGA noktasının sabit GPS istasyonu ile aynı noktada olduğu varsayılarak, ilgili sabit GPS istasyonunun zaman serilerinden elde edilen senelik ve altı aylık etkiler, herhangi bir enterpolasyona gerek duyulmadan birebir getirilerek, doğrusal hızın iyileştirilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir.

Fakat gerçekte durum bu şekilde olmayabilir. Sabit GPS istasyonlarından konumsal olarak uzaktaki bir TUTGA noktasının hızının geliştirilebilmesi için, ilgili sabit GPS istasyonlarının zaman serileri analizi ile elde edilen mevsimsel etkilerin söz konusu TUTGA noktasında enterpole edilerek düzeltmelerin hesaplanması gerekecektir. Bu uygulama için Ankara sabit GPS istasyonu TUTGA olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla Ankara istasyonunun zaman serileri analizinden elde edilen etkiler göz ardı edilerek, diğer istasyonlardan hesaplanan senelik ve altı aylık etkiler Ankara noktasında kestirilerek bu nokta için düzeltme değerleri bulunmuştur.

Ankara istasyonunun zaman serisi içerisinden iki zaman anı seçilerek doğrusal hızı tıpkı TUTGA noktalarında olduğu gibi hesaplanmıştır. ISTA,TUBI,TRAB,MERS ve ANTA istasyonlarından elde edilen senelik ve altı aylık etkiler bu zaman anlarına uygulanarak, iki zaman anı ölçüden hesaplanan doğrusal hızdaki değişme gözlenmiştir.

Ankara istasyonu için aşağıdaki zaman anları ve karşılık gelen koordinat değerleri, test zaman anları olarak seçilmiştir:

$t_1$=2002.3657 $y_1$=-1.084 mm

$t_2$=2003.6781 $y_2$= 2.726 mm

Yukarıdaki zaman anları kampanya ölçüsü olarak kabul edilip noktanın doğrusal hızı hesaplandığında $V_{ilk}$=2.9 mm/yıl bulunmuştur. Hâlbuki aynı noktanın zaman serilerinden elde edilen hızı -3.56 mm/yıl'dır. Görüldüğü gibi hem hızın yönünde hem de büyüklüğünde bir fark mevcuttur.

Ankara istasyonu için diğer istasyonlar kullanılarak kestirilen senelik ve altı aylık etkiler aşağıdaki gibidir:

$t_1$=2002.3657 zaman anındaki senelik etki = -2.33 mm ve altı aylık etki= -1.18 mm

$t_1$=2002.3657 zaman anındaki toplam düzeltme değeri=(-2.33)+(-1.18)= -3.51 mm

$t_2$=2003.6397 zaman anındaki senelik etki = 2.51 mm ve altı aylık etki= 1.46 mm

$t_2$=2003.6397 zaman anındaki toplam düzeltme değeri=(2.51)+(1.46)= 3.97 mm

Kestirimle hesaplanan ilgili zaman anlarındaki etkiler, koordinatlara düzeltme olarak getirildiğinde, noktanın yeni hızı $V_{düzeltilmiş}=\frac{(3.81-(3.97))-(0-(-3.51))}{1.3124}$

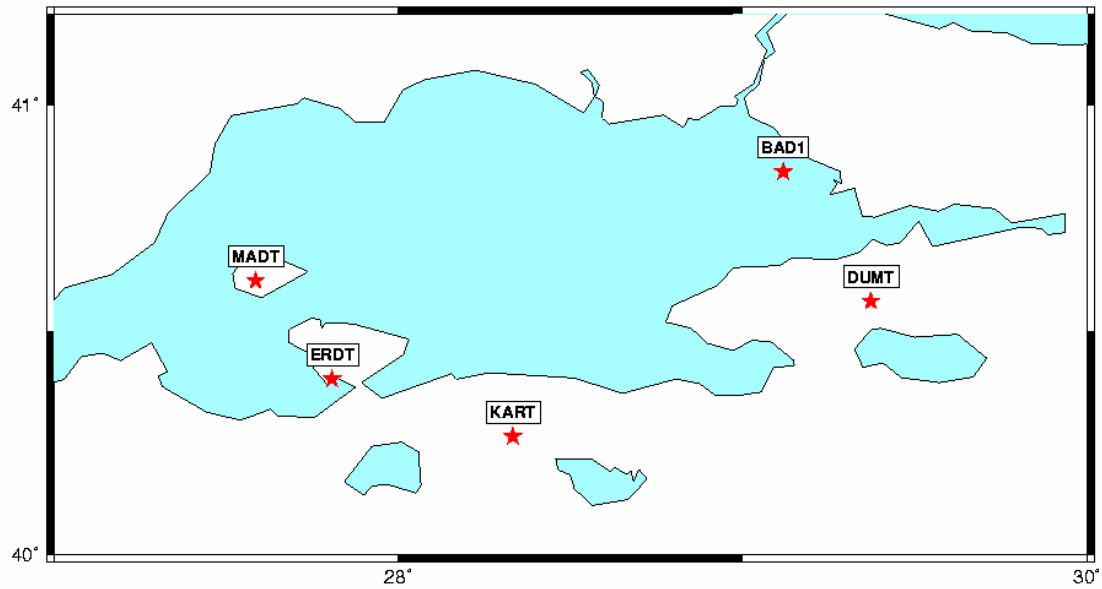
$V_{düzeltilmiş}$ = -2.79 mm/yıl olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, Ankara Sabit GPS istasyonunu TUTGA noktası gibi kabul ederek diğer istasyonlardan elde edilen baskın sinyalleri enterpole edip bu nokta için düzeltme olarak getirdiğimizde; sonuç hızın ($V_{düzeltilmiş}$ = -2.79 mm/yıl) doğrusal olarak iki zaman anıyla hesapladığımız hızdan ($V_{ilk}$= 2.9 mm/yıl) oldukça farklı ve zaman serisi analiziyle hesaplanan hıza (-3.56 mm/yıl) oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir.

### 6.4.5 Kampanya tipi GPS hızlarının geliştirilmesinin MAGNET istasyonlarında uygulanması

Bölüm 6.4'de verilen uygulamada, Türkiye genelinde ve yalnızca yükseklik bileşenine ait doğrusal hızın iyileştirilmesi araştırılmıştır. Yatay yöndeki senelik ve altı aylık etkiler için, istasyonların dağılımından dolayı bir genelleme yapılamayacağı değerlendirilmiştir. Daha küçük bir bölgede kampanya tipi GPS istasyonlarının yatay ve düşey hızlarının iyileştirilmesini test etmek amacıyla, MAGNET sabit GPS istasyonlarının verilerinden yararlanılmıştır. Uygulamada kullanılan MAGNET istasyonlarının dağılımı Şekil 6.6'da verilmiştir.

Bu kapsamda, MAGNET istasyonları kampanya tipi GPS gözlem istasyonları olarak kabul edilmiştir. Her istasyonun üç hız bileşeninin zaman serilerinin içinden ikişer zaman anı ve bu zaman anlarına karşılık gelen koordinat değerleri alınarak kampanya tipi GPS hızları hesaplanmıştır. Bu aşamada sistematik bir hatadan kaçınmak amacıyla, oluşturulan kampanya ölçüleri farklı zamanlarda seçilmiştir.




**Şekil 6.6:** Uygulamada kullanılan MAGNET istasyonlarının dağılımı.

Sonraki aşamada, İstanbul sabit GPS istasyonunun her üç bileşeninden hesaplanan senelik ve altı aylık etkiler, ilgili zaman anlarındaki koordinat değerlerine düzeltme olarak getirilmiş ve yeni hesaplanan hızlar, ilgili istasyonların zaman serileri analizlerinden hesaplanan daha yüksek doğruluktaki hızlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

İstasyonların kuzey-güney hız bileşeninin iyileştirilmesi uygulamasında, kampanya tipi ölçmelerle belirlenen hız ile zaman serilerinden elde edilen hız arasındaki fark ortalama 1.5 mm'dir. Senelik ve altı aylık etkilerin ilgili zaman anlarına düzeltme olarak getirildikten sonra bu fark azalmış ve ortalama 0.3 mm olmuştur. Ortalama iyileştirme 1.2 mm civarındadır.

Doğu-batı hız bileşeni için; kampanya tipi ölçmelerle belirlenen hız ile zaman serilerinden elde edilen hız arasındaki fark ortalama 1.4 mm'dir. Senelik ve altı aylık etkilerin ilgili zaman anlarına düzeltme olarak getirilmesinden sonra fark ortalama 0.6 mm düzeyine inmiştir. Ortalama 0.8 mm'lik bir iyileştirme sağlanmıştır.

Yükseklik bileşeninin hızının iyileştirilmesi aşamasında ise; kampanya tipi ölçmelerle belirlenen hız ile zaman serilerinden elde edilen hız arasındaki fark ortalama 6.7 mm'dir. Senelik ve altı aylık etkilerin düzeltme olarak getirilmesinden sonra bu fark azalarak ortalama 1.2 mm seviyesine inerek, ortalama 5.5 mm'lik bir iyileştirme elde edilmiştir.

**Çizelge 6.2:** MAGNET istasyonlarının hızlarının geliştirilmesi. $V_{zsa}$: Zaman serileri analizi ile hesaplanan hız. $V_{kamp}$: Kampanya yöntemi ile hesaplanan hız. $V_{düz}$: Senelik ve altı aylık etkilerin düzeltme olarak getirilmesinden sonra hesaplanan geliştirilmiş hız. $t_i$: Kampanya zaman anları.

| İstasyon | Bileşen | $t_i$ | $V_{kamp}$ (mm/yıl) | $V_{zsa}$ (mm/yıl) | $V_{düz}$ (mm/yıl) |
|---|---|---|---|---|---|
| DUMT | Kuzey | 2002.17945<br>2003.66986 | 6.0 | 7.4 | 7.0 |
| | Doğu | 2002.34657<br>2003.59315 | 0.6 | 2.0 | 1.1 |
| | Yükseklik | 2002.37397<br>2003.64794 | 3.0 | -4.7 | -5.3 |
| MADT | Kuzey | 2002.99041<br>2004.52595 | 4.2 | 5.2 | 5.2 |
| | Doğu | 2002.96301<br>2004.14071 | 5.8 | 7.3 | 6.8 |
| | Yükseklik | 2004.32377<br>2003.56027 | 4.0 | -0.6 | -3.5 |
| ERDT | Kuzey | 2004.14071<br>2005.35205 | 4.1 | 6.1 | 5.0 |
| | Doğu | 2003.96301<br>2005.13561 | 4.1 | 5.8 | 5.1 |
| | Yükseklik | 2003.27260<br>2004.58333 | 5.8 | -1.1 | -1.6 |
| BAD1 | Kuzey | 2004.12705<br>2004.75273 | 7.6 | 9.8 | 10.0 |
| | Doğu | 2003.34383<br>2004.59426 | 22.5 | 23.9 | 23.0 |
| | Yükseklik | 2004.31830<br>2005.57671 | 4.9 | -0.9 | -2.9 |
| KART | Kuzey | 2003.05890<br>2004.34563 | 5.6 | 6.5 | 6.5 |
| | Doğu | 2002.92192<br>2004.20355 | 2.3 | 3.3 | 3.4 |
| | Yükseklik | 2001.30822<br>2002.63698 | 6.2 | -2.1 | -2.1 |

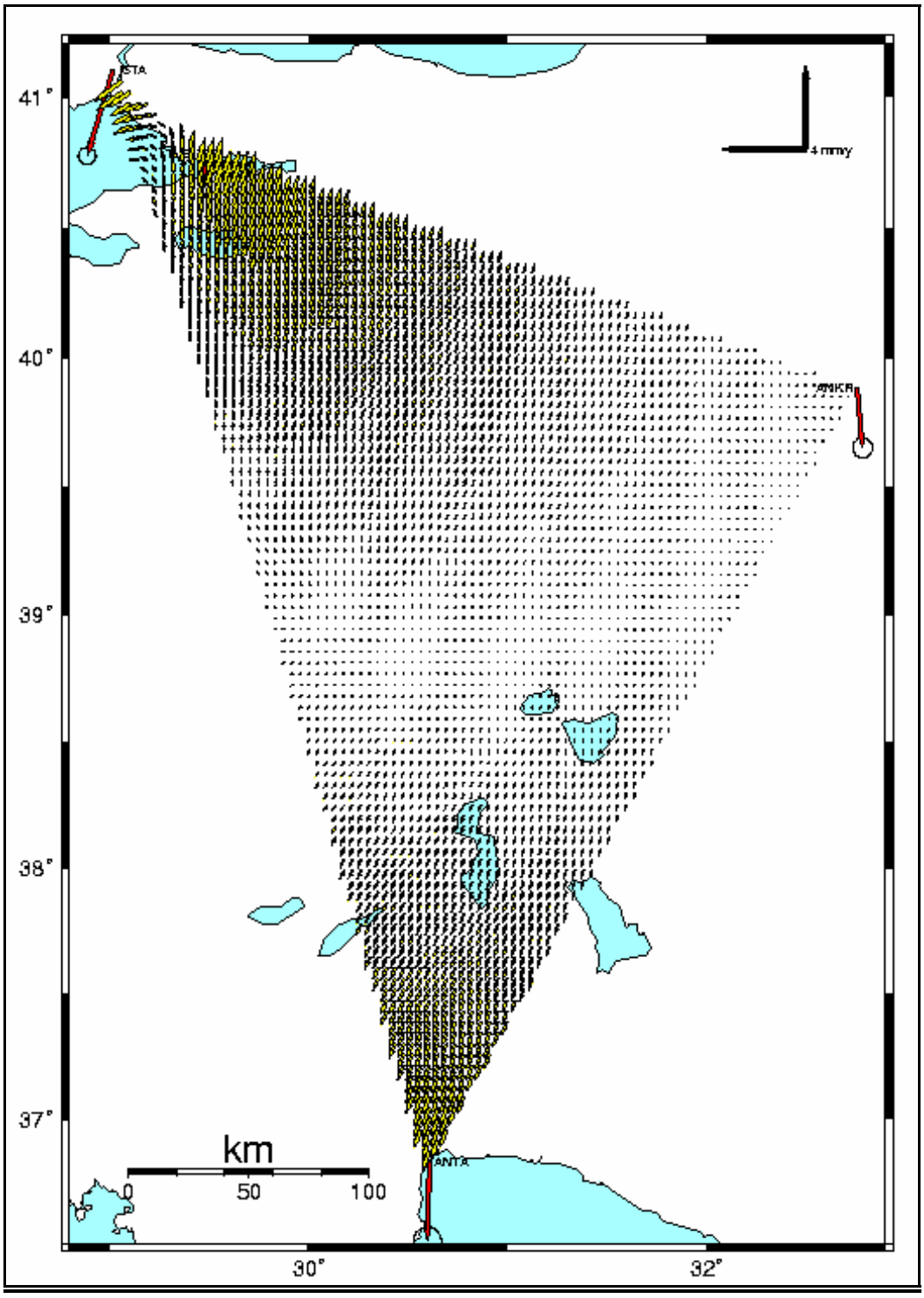
## 6.5 Bir İstasyondan Elde Edilen Etkilerin Mesafeye Bağlı Değişimi

Önceki Bölümlerde, TUTGA veya kampanya tipi deformasyon ölçüsü ile hesaplanan GPS hızlarına etki eden sinyaller, tüm Türkiye için grid noktalarında hesaplanmış ve düzeltmeler getirilmiştir. Daha küçük bir bölge için, tek bir istasyondan elde edilecek etkilerin mesafeye bağlı nasıl bir değişim gösterdiğini belirlemek amacıyla; ISTA,

TUBI, ANKR ve ANTA istasyonlarının arasında kalan bölge test alanı olarak seçilmiştir. Söz konusu dört istasyonun düşey bileşenlerinden elde edilen yalnızca senelik etkiler bu bölge arasında kalan alanda enterpole edilmiştir.

Periyodik etkileri, kampanya ölçüleri ile elde edilen hızlara düzeltme olarak getirmek istediğimizde, bu dört istasyon arasında kalan bölgede gridlenmiş olan etkilerden noktaya en yakın olanı seçerek veya ilgili noktada kestirim yaparak düzeltme etkisini kullanabiliriz. Şekil 6.7'de grid noktalarında hesaplanmış olan senelik etkilerden her birinden ANKR istasyonundaki etkiyi çıkardığımızda, yalnızca ANKR istasyonundan hesaplanan senelik etkinin mesafeye bağlı olarak değişimi sergilenmiştir.

Şekil 6.7'de, sadece ANKR istasyonuna ait senelik etkilerin kullanılmasıyla elde edilen düzeltme değerlerinin, dört istasyondan elde edilecek değerlerle olan farklarının, seçilen test bölgesindeki durumu görülmektedir. ANKR istasyonundan yaklaşık 100-200 km'den sonra kullanılabilirliğin düştüğü gözlenmektedir. Bu noktadan hareketle, eğer sadece bir istasyondaki düşey bileşene ait senelik etkinin kullanılması durumunda, istasyona mesafesi 100-200 km yarıçapındaki noktalarda yalnızca söz konusu istasyona ait düzeltmeler kullanılarak, düşey yöndeki doğrusal tektonik hızın iyileştirilmesinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.




**Şekil 6.7:** Ankara istasyonundan elde edilen düşey bileşene ait senelik etkinin kullanılabilirliğinin mesafeye bağlı olarak gösterimi.

# 7. SONUÇLAR, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sabit GPS istasyonlarının yüksek frekanslı veri yapısından elde edilen zaman serileri analizi sonuçları ile kampanya tipi GPS ölçmelerinden hesaplanan tektonik doğrusal hızın iyileştirilebilmesi için bir yaklaşım önerilmiştir. Konumsal olarak seyrek olan sabit GPS istasyonlarından yararlanarak konumsal olarak daha sık kampanya noktalarının hızlarına getirilecek düzeltmelerle daha gerçekçi bir hız alanına ulaşılması hedeflenmiştir.

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

Temel Bileşenler Analizi, veri boyutu indirgemelerinde oldukça güçlü bir araçtır. Bu çalışma kapsamında ancak 4 istasyonun verisi kullanılarak bir analiz yapılabilmiştir. TBA'nin oldukça pratik ve hızlı yapısı sayesinde konumsal olarak dağınık yapıdaki istasyonların sahip olduğu periyodik etkileri anlamak için kullanılışlı bir araç olduğu görülmüştür. Zaten az olan istasyon sayısı için veri boyutunun indirgemesinde önemli bir kazanç sağlanmamıştır. Çok fazla istasyon olması durumunda ortak bazı etkilerin çabucak görülmesi açısından ve gerektiğinde veri indirgemesi yapılacağı durumlarda önemli faydalar sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Sabit GPS istasyonlarındaki arızalar ve zaman serilerindeki uyuşumsuz ölçülerin atılması gibi sebepler sonucunda çoğu durumda boşluksuz veri elde etmek olanaklı değildir. Bu çalışma kapsamında Türkiye genelinde dağılmış 6 sabit GPS istasyonunun zaman serilerindeki etkili sinyalleri ve genlikleri tespit etmek amacıyla Lomb-Scargle algoritması kullanılmıştır. Bu sayede Fourier Analizi yönteminin bir

kısıtlaması olan boşluklu verinin spektral analizi konusunda bu problemin üstesinden gelinmiştir. Ayrıca, "Spektrumdaki her zirve ne kadar anlamlıdır?" sorusuna nicel bir miktarın nasıl hesaplanacağına dair bir algoritma Lomb-Scargle yöntemi ile gelmektedir. Spektral analiz sonucu hesaplanan binlerce frekans içerisinden kullanıcının belirleyeceği bir güven aralığında hangi frekansların anlamlı olduğunun tespit edilebilmesi mümkündür.

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

Sabit GPS istasyonlarının zaman serileri analizinden elde edilen periyodik etkileri kullanarak TUTGA ve dolayısıyla C1, C2 derece ağ noktaları ile kampanya tipi GPS ölçülerinin hızlarının iyileştirilmesine yönelik pratik bir yöntem önerilmiştir. Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliğine göre, C1 ve C2 derece ağ nokta (AGA ve SGA) hızları, TUTGA nokta hızlarından enterpolasyonla hesaplanmaktadır. Bölüm 6.4'de açıklandığı gibi çoğunluğunun hızları kampanya ölçmeleri ile hesaplanmış TUTGA hızlarının, ilave edilebilecek senelik ve altı aylık etkilerle iyileştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Kampanya tipi GPS ölçmeleri ile deformasyon hızı belirleme çalışmalarında, Bölüm 6.1'de açıklandığı gibi sabit GPS istasyonları zaman serileri analizlerinden elde edilecek etkilerin kullanılmasıyla daha gerçekçi ve güvenilir deformasyon değerlerine ulaşılabileceği değerlendirilmektedir.

İstasyonların kuzey-güney ve doğu-batı bileşenlerine ait senelik ve altı aylık etkilerin (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2), istasyonların konumsal olarak oldukça dağınık ve sayılarının az olmasından dolayı, gerek yön gerekse şiddet itibariyle ortak özellikleri tespit edilememiştir. Dolayısıyla bu etkilerin tüm test bölgesinde uygulanabilmesi için daha fazla istasyonun verilerinin analizine ihtiyaç duyulduğu değerlendirilmektedir. Bu aşamada, Marmara Bölgesindeki MAGNET istasyonlarının verileri kullanılmıştır. Bu istasyonların İstanbul sabit GPS istasyonuna olan mesafeleri 25-120 km arasında

değişim göstermektedir. MAGNET istasyonlarının zaman serilerinin içerisinden farklı zaman anlarında seçilen ikişer koordinat değeri kampanya ölçmesi olarak kabul edilerek bir hız hesaplanmıştır. İstanbul sabit GPS istasyonundan elde edilen senelik ve altı aylık etkiler, kampanya ölçmesi oluşturulan zaman anlarındaki koordinat değerlerine düzeltme olarak getirilmiştir. Elde edilen yeni koordinat değerlerinden hesaplanan hızlar ile MAGNET sabit GPS istasyonlarının zaman serileri analizleri ile bulunan hızları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yatay yöndeki hız bileşenlerinde ortalama 1 mm ve düşey yöndeki hız bileşeninde ise ortalama 5.5 mm'lik bir iyileştirme sağlanmıştır.

İstasyonlara ait yükseklik bileşenlerinden elde edilen senelik ve altı aylık periyodik etkilerin genliklerinin ve fazlarının yaklaşık olarak ortak özellik taşıdıkları görülmektedir (Şekil 6.3). Dolayısıyla, kampanya tipi bir GPS ölçmesinde elde edilecek hızın iyileştirilmesi için istasyonlardan elde edilecek etkilerin enterpolasyonuyla uygun sonuçlar bulunacaktır. Elde edilen sonuçlar ile düşey yöndeki doğrusal hızın iyileştirilmesinde önemli ölçüde katkı sağlandığı gözlenmiştir.

Düşey hızın iyileştirilmesi için Bölüm 6.5'de açıklandığı şekilde, tek bir istasyondan elde edilen senelik etkinin kullanılması durumunda (Şekil 6.6), yaklaşık 100-200 km'lik bir bölge için kampanya tipi GPS hızlarının geliştirilmesinde uygun sonuçlar sağlayacağı görülmüştür. Daha uzak mesafeler için ise bölgede mevcut diğer SGPS istasyonlarının da analiz edilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR


**Agnew, D.C.,** 1992. The time-domain behavior of power-law noises, *Geophysical Research Letters*, **19**, 333-336.

**Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C.,** 2002. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for the earth science applications, *Journal of Geophysical Research*, **107(B10),** 10.1029/2001JB000561.

**Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C.,** 2003. The impact of a No-Net-Rotation Condition on ITRF2000, *Geophysical Research Letters*, **30(2)**, 10.1029/2002GL016279.

**Beran, J.,** 1994. Statistics for Long Memory Processes, *Monogr. Stat. Appl. Probab.,* vol. 61, 315 pp. Chapman and Hall, New York.

**Blewitt, G., M. B. Heflin, K. J. Hurst, D. C. Jefferson, F. H. Webb, and J. F. Zumberge**, 1993. Absolute far-field displacements from the 28 June 1992 Landers earthquake sequence, *Nature*, **361**, 340-342.

**Blewitt, G., Lavallee, D.**, 2002. Effect of Annual Signals on Geodetic Velocity, *Journal of Geophysical Research*, **107(B7)**, 10.1029/2001JB000570.

**Bock, Y., et al**. 1993. Detection of crustal deformation from the Landers earthquake sequence using continuous geodetic measurements, *Nature*, 361, 338-340.

**Bock, Y., Wdowinski, S., Fang, P., Zhang, J., Williams, S., Johnson, H., Behr, J., Genrich, J., Dean, J., van Domselaar, M., Agnew, D., Wyatt, F., Stark, K., Oral, B., Hudnut, K., King, R., Herring, T., Dinardo, S., Young, W., Jackson, D., Gurtner, W.,** 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Continuous measurements of regional crustal deformation between the 1992 Landers and 1994 Northridge earthquakes, *Journal of Geophysical Research* , **102(B8)**, 18013-18033.

**Boucher, C., Altamimi, Z., Sillard, P.,** 1999. The 1997 International Terrestrial Reference Frame, *IERS Tech. Note 27,* Int. Earth Rotation Serv, Paris.

**Brillinger, D.R.,** 1975. Time Series Data Analysis and Theory, ABD.

**Calais, E.,** 1999. Continuous GPS measurements across the Western Alps, 1996-1998, *Geophys. J. Int.*, **138**, 221-230.

**Davies, P., Blewitt, G.,** 2000. Methodology for Global Geodetic Time Series Estimation: A New Tool for Geodynamics , *Journal of Geophysical Research* , **105(B5),** 11083-11100.

**DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S.,** 1990. Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, **101**, 425-478.

**DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., Stein, S.,** 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scales on estimates of current plate motions, *Geophysical Research Letters*, **21**, 2191-2194.

**Dong, D., Herring, T.A., King, R.W., 1998**. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *Journal of Geodesy*, **72,** 200-214.

**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),** 10.1029/2001JB000573.

**Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Webb, F., Prawirodirdjo, L., Kedar, S., Jamason, P.,** 2006. Spatiotemporal filtering using principal component analysis and Karhunen-Loeve expansion approaches for regional GPS network analysis, *Journal of Geophysical Research*, VOL.III, doi:10.1029/2005JB003806.

**Grafarend, E.W., Kruum, F.W., Scwarze, V.,** 2003. Geodesy The Challange of The Third Millenium, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

**Hautala, S.,** 2005. Singular Value Decomposition and Empirical Orthogonal Functions (EOFs), *Temel Bileşenler Analizi Ders Notları,* Oşinografi Okulu, Washington Üniversitesi.

**Herring, T.,** 2003. Global Kalman Filter VLBI and GPS analysis program, Version 5.11, Mass. Inst. Of Technol., Cambridge.

**HGK,** 2002. TUTGA-99A, Harita Dergisi, Harita Genel Komutanlığı.

**Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.**, 1994. Global Positioning System, Theory and Practice, pp. 41-42, Springer-Verlag, New York.

**IERS,** 2000. International Earth Rotation Service, Annual Report 2000, BKG Frankfurt.

**Johnson, H., Agnew, D.C.,** 1995. Correlated noise in geodetic time series, *USGS Technical Report*, 1434-HQ-97-GR-03155.

**Johnson, H., Agnew, D.C.,** 2000. Monument motion and measurements of crustal velocities, *Geophysical Research Letters*, **22**, 2905-2908.

**King, R. and Bock, Y.,** 2004. Documentation for the GAMIT GPS analysis software, Release 10.2, Mass. Inst. Of Technol., Cambridge, and Scripps Inst. of Oceanogr., La Jolla, Calif.

**Langbein, J., Johnson, H.,** 1997. Correlated Errors In Geodetic Time Series: Implications for Time-Dependent Deformation , *Journal of Geophysical Research*, **102(B1)**, 591-603.

**Langbein, J., Johnson, H.,** 1995. Noise level of geodetic monuments, *JEOS Trans. AGU,* **76**, F142.

**Lenk, O., Türkezer, A., Ergintav, S., Kurt, A.,İ, Belgen, A.,** 2003. Monitoring the Kinematics of Anatolia Using Permanent GPS Network Stations, Turkish Journal of Earth Sciences, **(12)**, 55-65.

**Lomb, N.R.,** 1976. Least-Squares Frequncy Analysis of Unequally Spaced Data, Astrophysics and Space Science 39 (1976), 447-462.

**Mao, A., Harrison C.G.A., Dixon, T.H.,** 1999. Noise In GPS Coordinate Time Series , *Journal of Geophysical Research* , **104(B2)**, 2797-2816.

**Mandelbrot, B.,** 1983. The Fractal Geometry of Nature, W.H. Freeman, New York.

**McCarthy, D., 2000.** IERS Conventions (2000). IERS Technical Note, International Earth Rotation Service.

**McCarthy, D., Petit, G., 2003.** IERS Conventions (2003). IERS Technical Note 32, International Earth Rotation Service.

**Nikolaidis, R., 2002.** Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System, *PhD Thesis,* University of California, San Diego.

**Parkinson, B.W., Spilker, J.J.Jr.,** 1996. Global Positioning System: Theory and Applications, Vol.I, American Institute of Aeronautics and Astronautics, ABD.

**Parkinson, B.W., Spilker, J.J.Jr.,** 1996. Global Positioning System: Theory and Applications, Vol.II, American Institute of Aeronautics and Astronautics, ABD.

**Press,W.H., et al.** Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data. *Numerical Recipes in C++ (2nd edition),* CambridgeUniversity Press, 2002.

**Pytharouli, S., Kontogianni, Y., Psimoulis, P., Stiros, S.,** 2004. Spectral Analysis Techniques in Deformation Analysis Studies, *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying Bratislava, Slovakia*.

**Scargle, J.D.,** 1982**.** Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 263, Dec. 15, 1982, s. 835-853.

**Seeber, G.**, 2003. Satellite Geodesy, Walter de Gruyter, Berlin.

**Strang, G. and Borre, K.**, 1997. Linear Algebra, Geodesy and GPS, pp. 469-480, Wellesley-Cambridge Press, Wellesley.

**Wdowinski, S., Bock, Zhang, J., Fang, P., Genrich, J.,** 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial Filtering of Daily Positions for Estimating Coseismic and Postseismic Displacements induced by the 1992 Landers Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 18057-18070.

**Williams, S.D.P.,** 2003. The Effect of Coloured Noise on the Uncertanities of Rates Estimated From Geodetic Time Series , *Journal of Geodesy,* (**76),** 483-494.

**Williams, S.D.P. , Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R.M., Prawirodirdjo, L., Miller, M., Johnson, D.J.,** 2004. Error Analysis of continuous GPS Position Time Series, Journal of Geophysical Research, Vol.109, 2004.

**Williams, S.D.P.,** 2005. Create and Analyse Time Series : CATS software V3.1.1, Proudman Oceanographic Laboratory, UK.

**Wyatt, F.K.,** 1989. Displacement of Surface Monuments: Vertical Motion , *Journal of Geophysical Research*, **94(B2)**, 1655-1664.

**Wyatt, F.K.,** 1982. Displacement of Surface Monuments: Horizontal Motion, *Journal of Geophysical Research*, **87(B2)**, 979-989.

**Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J., Wdowinski, S., Behr, J.,** 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error Analysis of Daily Position Estimates and Site Velocities, *Journal of Geophysical Research* , **102(B8)**, 18035-18055.

**ÖZGEÇMİŞ**



**Ad Soyad:** Ali İhsan KURT

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Akşehir, 10.05.1974

**Adres:** Harita Genel Komutanlığı 06100 Cebeci/ANKARA

**Lisans Üniversite:** Harita Genel Komutanlığı Harita Yüksek Teknik Okulu

**Yayın Listesi:**

▪ **Kurt A.İ.**, Nocquet J.M., Lenk O., Parsons B., Kılıçoğlu A., Cingöz A., Erkan Y., 2005. Slow Deformation of Western Anatolia Monitored by CGPS: Preliminary Results. *COMET - Advances in GPS Data Processing and Modelling for Geodynamics*, 9-10 November 2005, UCL, London.

▪ **Kurt A.İ.**, Kılıçoğlu A., Erkan Y., Ceyhan B., 2005. Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı (TUSAGA) Veri Değerlendirme Stratejileri. *Deprem Sempozyumu,* 23-25 Mart 2005 Kocaeli, Türkiye.

▪ Demir, C., Aktuğ, B., Açıkgöz, M., **Kurt, A.İ.,** 2005. Tekrarli GPS Ölçüleriyle Yapılardaki Deformasyonların Belirlenmesi. *10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı ,* TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mart 2005, Ankara.

▪ Ayhan, M.E., Demir, C., Kılıçoğlu, A., Cingöz, A., Aktuğ, B., **Kurt, A.İ.** and Yıldız H., 2004. Processing, combination and time series analysis of continuous GPS data: A Test study. *International GPS Service (IGS) Workshop*, Berne, Switzerland, 2004.

▪ Lenk, O., Türkezer, A., Ergintav, S., **Kurt, A.,İ,** Belgen, A., 2003. Monitoring the Kinematics of Anatolia Using Permanent GPS Network Stations. *Turkish Journal of Earth Sciences,* (12), 55-65.

▪ **Kurt A.İ.,** Çelik R.N., 2003. İnternet Ortamında Temel Jeodezik Hesaplamalar. *HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, (88), 9-14, Ankara.

▪ Kılıçoğlu A., **Kurt A.İ.,** Tepeköylü S., Cingöz A., Akça E., 2003. Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı. *TUJK 2003 Yılı Bilimsel Toplantısı: CBS ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı*, 24-26 Eylül 2003, Selçuk Üniversitesi, Konya.

▪ Ayhan, M. E., Demir, C., Lenk, O., Kılıçoğlu, A., Aktuğ, B., Açıkgöz, M., Fırat, O., Şengün, Y. S., Cingöz, A., Gürdal, M. A., **Kurt, A. İ.**, Ocak, M., Türkezer, A., Yıldız, H., Bayazıt, N., Ata, M., Çağlar, Y., Özerkan, A., 2002, Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A), *Harita Dergisi, Özel Sayı:16*, Mayıs, Ankara.