

YERKABUĞU HAREKETLERİNİN KALMAN FİLTRESİ İLE İZLENMESİ MONITORING OF CRUSTAL MOVEMENTS BY USING KALMAN FILTER

KURT O., İNCE C.D., KONAK H., ÇEPNİ M.S.,

Posta Adresi: KOÜ Veziroğlu Yerleşkesi Müh. Fak. Jeodezi ve Fotog. Müh. Böl. İzmit.

E-posta: okurt@kou.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Deformasyon, Kalman Filtresi, GPS, Simülasyon, Mikro Jeodezik GPS Ağı, Hız Vektörleri, Yerkabuğu Hareketi

ÖZ Ülkemiz aktif tektonik etkilere sahip bir bölge üzerindedir. Genel olarak Doğu Akdeniz'in tektonik yapısı, Arabistan ve Afrika plakalarının Avrasya plakası ile çarpışmasının sonucunda şekillenmektedir. Son dönemlerdeki GPS çalışmaları bu aktif bölgenin kinematiğini ortaya koymuştur. Aktif tektonik yapı jeodezik kontrol noktalarının da yer değiştirmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) olarak adlandırılan yeni bir dinamik yatay kontrol ağı kurulmuştur. TUTGA noktaları her üç yılda bir ölçülmekte ve her bir noktanın koordinat ve hız bileşenleri kestirilmektedir. Bu GPS gözlemleri, noktaların kinematik özelliklerini makro düzeyde ortaya çıkarır. 19 noktaya sahip Türkiye Ulusal Sürekli GPS İstasyonları Ağı (TUSAGA) da yerkabuğu hareketlerini makro seviyede sürekli izleme olanağını sağlamaktadır. Günümüzde, yerkabuğu hareketlerinin sürekli olarak izlenmesi, sürekli gözlem yapabilen mikro jeodezik GPS ağları yardımıyla mümkün olmaktadır. Bu teknolojik gelişimin bir sonucu olarak, algoritmaların da dinamik modellerle kurulması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, tektonik deformasyon vektörleri ve bu vektörlerin dinamik bileşenleri Kalman Filtresi kullanılarak kestirilmekte ve kullanılan modelin doğruluğu simülasyonla elde edilmiş GPS gözlemleri ile test edilmektedir.

ABSTRACT Our country has active tectonic entities. Generally, the tectonic framework of the Eastern Mediterranean is dominated by the collision of the Arabian and African plates with the Eurasia. Recent GPS studies indicated kinematics of this active region. The active tectonic framework also caused to move geodetic network points. Therefore, a new dynamic horizontal control network called Turkey National Fundamental GPS Network (TNFGN) was set up. TNFGN points are measured every three years and coordinates and velocity components of each point are estimated. The GPS observations exposed kinematic features of the points as macro levelling. Turkish National Continuous GPS Network (TNCGN) with 19 points also enables to continuously monitor crustal movements as macro levelling. Nowadays, continuously monitoring of the earth's crustal movements is possible by micro geodetic continuous GPS networks. As a result of this technologic development, settings of algorithms with dynamic models is needed. In this study, tectonic deformation vectors and kinematic components of these vectors is estimated by using Kalman Filter and the accuracy of the using model is tested by simulated GPS data.

GİRİŞ

Ülkemiz, aktif tektonik yapıya sahip bir bölge üzerindedir. Genel olarak, Doğu Akdeniz'in tektonik yapısı, Afrika ve Arabistan Levhaları ile Avrasya Levhasının çarpışması sonucunda şekillenmektedir. Yakın zamanda Anadolu'nun çeşitli kesimlerinde yapılan GPS ölçme ve değerlendirme sonuçlarına göre, ülkemizdeki tektonik aktivite genel hatlarıyla belirlenmiştir (McClusky vd., 2000).

Ülkemiz coğrafyasının aktif tektonik yapısı, ülke temel jeodezik ağlarındaki kontrol noktalarının da zaman içerisinde yer değiştirmesine neden olmaktadır. Bu nedenle 1934–1954 yılları arasında yoğun jeodezik çalışmalar sonucu oluşturulan ülkemiz Yatay Kontrol Ağ noktalarının statik olduğu varsayımı terk edilerek, yeni bir dinamik yatay kontrol ağı, TUTGA (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı) kurulmuştur. Ağ noktalarında üç yıllık periyotlarla GPS ölçmelerinin tekrarlanması ve ağa ait sonuçların güncellenmesi planlanmıştır. Bu periyot ölçmeleri sonucunda her noktanın koordinat bileşenleri (X,Y,Z) için yıllık hız vektörleri (V_x, V_y, V_z) kestirilmektedir. Kurulan bu ağ ile ülkemizin tektonik özellikleri hakkında ancak makro düzeyde sonuçlar üretebilmektedir. Ülkemizdeki jeodezik amaçlı birçok uygulamaya altlık oluşturmayı amaçlayan TUSAGA (Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı) da tektonik hareketlerin sürekli izlenebilmesi olanağını makro düzeyde sağlamaktadır. Şu anda ülke düzeyinde faal 19 adet TUSAGA istasyonun, "Ağ prensibinde çalışan gerçek zamanlı kinematik (RTK/DGPS) prensipli sabit GPS istasyonlarının kurulması ve hüresel dönüşüm parametrelerinin belirlenmesine ilişkin araştırma ve uygulama projesi (TUSAGA Aktif, CORS-TR Projesi)" ile birleştirilerek ülke çapında geliştirilmesi planlanmıştır (Teknik Rapor, HKMO, 2007). Proje sonuçlandığında 150-160 civarında sürekli GPS istasyonundan elde edilen veriler ile ülkemiz tektonik hareketlerinin orta ölçekte belirlenmesinin de mümkün olacağı düşünülmektedir. Günümüzde sürekli GPS ağları ile deprem öncesi ve sonrası tektonik hareketlerin mikro düzeyde belirlenmesi çalışmaları yoğunlaşarak artmaktadır. Bu çalışmalar, San Francisco Körfezi gibi belli bir alandaki tektonik hareketlerin izlenmesi amacıyla yapıldığı gibi Japonya örneğindeki gibi tüm ülkeyi kapsayacak şekillerde de planlanabilmektedir (Şahin vd., 1999). Görüldüğü üzere tektonik hareketlerin belirlenmesi için artık günümüzde çok yoğun GPS verilerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Hareketlerin sürekli izlenebilmesi için algoritmaların dinamik modelleri içermesi ve kinematik/dinamik bileşenlerin yorumlanması ihtiyacı doğmuştur.

Bu çalışmada Kalman Filtresi kullanılarak tektonik hareket vektörlerinin yanı sıra bu vektörlerin kinematik bileşenleri de kestirilecektir. Modelin doğruluğu simülasyonla üretilmiş GPS verileri ile test edilecektir.

TEORİ

GPS Verilerinin Simülasyonu

GPS ölçüleri iki aşamalı olarak değerlendirilir. Birinci aşamada noktalar arası baz bileşenlerinin değerleri faz ve kod ölçülerinin doğrusal kombinasyonlarından {genellikle çiftli farklardan DD(double differences)} yararlanılarak hesaplanır. Baz bileşenleri ve bunların varyans-kovaryansları ile ağ dengelemesi yapılarak noktaların konum bilgileri ve bunların varyans-kovaryans matrisleri elde edilir (Açııcı vd. 2003).

Baz uzunlukları 30km'den küçük GPS ağlarında kurulan matematik modelde, sistematik (saat hataları, yörünge, hataları, atmosferik etkiler vb.) hataların etkisi göz ardı edilecek kadar küçülme ve ağ noktalarının duyarlılıkları *cm* altına inmektedir. Bu çalışmada da kısa bazlara göre kurulmuş geometriye dayalı (Geometry-Base) DD matematik model kullanılmıştır. Çift frekanslı bir alıcıdan alınan kod ve faz ölçüleri için kurulan Geometriye dayalı DD Gauss-Markof modeli aşağıdaki gibi kurulur.

$$\begin{bmatrix} Y_{\phi 1} \\ Y_{\phi 2} \\ Y_{P1} \\ Y_{P2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{L1} I & \underline{0} \\ \underline{0} & \lambda_{L2} I \\ \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{a}_{L1} \\ \underline{a}_{L2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{B} \\ \underline{B} \\ \underline{B} \\ \underline{B} \end{bmatrix} \underline{b} \quad \underline{\Sigma}_Y = \begin{bmatrix} \sigma_{\phi 1}^2 Q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\phi 2}^2 Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{P1}^2 Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{P2}^2 Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E\{\underline{y}\} = \underline{A} \underline{a} + \underline{B} \underline{b} \quad \underline{\Sigma}_Y = \sigma^2 \underline{Q}_Y \quad \sigma = \sigma_{\phi 1}$$

Burada, \underline{y}_k ($k=\Phi1,\Phi2,P1,P2$) ötelenmiş DD faz ve kod ölçülerinin toplandığı vektörü, \underline{a} ; DD-BFB (Başlangıç Faz Belirsizliği) vektörünü, \underline{b} ; (kısa bazlarda) koordinat bilinmeyenlerini, \underline{A} , \underline{B} ; sırası ile \underline{a} ve \underline{b} vektörlerinin katsayılar matrislerini, \underline{Q}_y ; DD ölçülerin ters ağırlık matrisini göstermektedir. (1) eşitliğinde, \underline{I} birim matris, \underline{A} matrisi sabit sayılardan oluşturulurken, \underline{B} matrisi ölçü noktalarının yaklaşık koordinatları ile duyarlı uydu yörünge bilgilerinden elde edilen uydu koordinatları ile oluşturulmaktadır. Bu yörünge bilgilerine (SP3 formatlı dosyalara) internet ortamından kolayca ulaşılabilir [1].

Stokastik bilgilerin toplandığı ters ağırlık matrisi \underline{Q}_y , eşit ağırlıklı ve korelasyonsuz kabul edilen ilk ölçülerin doğrusal kombinasyonlarından yararlanılarak elde edilen \underline{Q} matrisinin her bir ölçü grubunun öncül duyarlılıkları ile ölçeklendirilerek elde edilir. Bu çalışmada faz ve kod ölçülerinin duyarlılıkları $\sigma_{\phi1}=\pm0.004m$, $\sigma_{\phi2}=\pm0.006m$, $\sigma_{p1}=\pm0.800m$, $\sigma_{p2}=\pm1.200m$ olarak ön görülmüştür. $\sigma=\sigma_{\phi1}=\pm0.004m$ birim ağırlıklı ölçü seçilmiş diğer ölçü büyüklükleri bu öncül değere göre oranlanmıştır (Kurt, 2003;2005).

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad \underline{K}_\Delta = \sigma^2 (\underline{Q}_{\hat{b}\hat{a}} - \underline{Q}_{\hat{b}\hat{a}} \underline{Q}_{\hat{a}}^{-1} \underline{Q}_{\hat{a}\hat{b}}) \quad \begin{bmatrix} \underline{Q}_{\hat{a}} & \underline{Q}_{\hat{a}\hat{b}} \\ \underline{Q}_{\hat{b}\hat{a}} & \underline{Q}_{\hat{b}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}^T \underline{Q}_y^{-1} \underline{A} & \underline{A}^T \underline{Q}_y^{-1} \underline{B} \\ \underline{B}^T \underline{Q}_y^{-1} \underline{A} & \underline{B}^T \underline{Q}_y^{-1} \underline{B} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

Yukarıda elde edilen baz bileşenleri ölçüler olarak ele alınır, tüm ağ noktaları bilinmeyen olarak seçilir ve tüm iz minimum koşulu altında değerlendirilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{ij} = [-\underline{I} \quad \underline{I}] \begin{bmatrix} X_i \\ X_j \end{bmatrix} = \underline{A}_\Delta^{ij} \begin{bmatrix} X_i \\ X_j \end{bmatrix} \quad \underline{Q}_\Delta^{ij} = \frac{1}{\sigma^2} \underline{K}_\Delta = \begin{bmatrix} q_{\Delta X \Delta X} & q_{\Delta X \Delta Y} & q_{\Delta X \Delta Z} \\ q_{\Delta Y \Delta X} & q_{\Delta Y \Delta Y} & q_{\Delta Y \Delta Z} \\ q_{\Delta Z \Delta X} & q_{\Delta Z \Delta Y} & q_{\Delta Z \Delta Z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\underline{X} \quad \underline{K}_X = \sigma^2 (\underline{A}_\Delta^T \underline{Q}_\Delta^{-1} \underline{A}_\Delta)^+$$

Ağ noktalarının (\underline{X}) varyans-kovaryanslarını (\underline{K}_X) elde edebilmek için; 1) ağ noktalarının yaklaşık koordinatları, 2) uydu yörünge bilgileri ve 3) GPS ile ölçülebilen ilk faz ve kod ölçülerinin öncül duyarlılıklarının bilinmesi yeterlidir (Kurt 2003, 2005; Konak vd. 2004, 2005; Kurt vd. 2005).

Deformasyon Vektörünün Simülasyonu

Basit anlamda deformasyon; iki farklı zamanda ölçülen nokta konum bilgileri arasındaki fark olarak adlandırılabilir ve aşağıdaki gibi modellenir.

$$\begin{bmatrix} d_X(t) \\ d_Y(t) \\ d_Z(t) \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{bmatrix}_k - \begin{bmatrix} X(t_0) \\ Y(t_0) \\ Z(t_0) \end{bmatrix}_k = (t - t_0) \begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ v_Z \end{bmatrix}_k \quad (4)$$

$$\underline{d}_k(t) = \underline{X}_k(t) - \underline{X}_k(t_0) = (t - t_0) \underline{v}_k$$

Burada, k ($k=1,2,\dots,m$) noktasının deformasyon vektörü \underline{d}_k , zamana bağlı (tektonik) etki $(t-t_0)\underline{v}_k$ (nokta sayısı*3) olarak düşünülmüştür. Buradaki deformasyon vektörü bileşenlerinin ve farklı noktalara ait deformasyon vektörlerinin korelasyonlu oldukları ve $\underline{K}_X(t)$ matrisinin her ölçme periyodunda değiştiği göz önünde bulundurulmalıdır.

$$\underline{d}(t_j) = \underline{X}(t_j) - \underline{X}(t_0) \quad \underline{Q}_d(t_j) = \frac{1}{\sigma^2} \{ \underline{K}_X(t_j) + \underline{K}_X(t_0) \} \quad (5)$$

$j=1,2, \dots, n$

Burada, ağ noktalarının t_j periyodundaki deformasyon vektörü $\underline{d}(t_j)$ şeklinde ve t_j periyodundaki konum vektörü de $\underline{X}(t_j)$ şeklinde gösterilmiştir. Çalışmada deformasyon etkileri, oluşturulan simülasyonda öngörülmüş ve zamanın bir fonksiyonu olarak nokta koordinatları üzerine eklenmiştir. GPS ile ölçüldüğü varsayılan bir jeodezik ağ oluşturulmuş ve deformasyon noktalarındaki anlamlı değişimin kaçınıcı ölçü periyodundan sonra belirlenebileceği tartışılmıştır. Farklı n adet periyotlarda toplanan deformasyon vektörü;

$$\underline{d} = \begin{bmatrix} \underline{d}(t_1) \\ \underline{d}(t_2) \\ \dots \\ \underline{d}(t_n) \end{bmatrix} \quad \underline{Q}_d = \begin{bmatrix} \underline{Q}_d(t_1) & \underline{0} & \dots & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{Q}_d(t_2) & \dots & \underline{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{0} & \underline{0} & \dots & \underline{Q}_d(t_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

şeklindedir.

Kalman Filtresi

Kalman Filtresi üç temel aşamadan oluşur. $t < t_j$ koşuluyla bir dinamik sistemin t_j anındaki durum değişkenlerinin, sistemin önceki özelliklerinden faydalanarak hesaplanmasına öncül kestirim (prediction, extrapolation) aşaması denir. Eğer herhangi bir t anında bir dinamik sistemin t_j anındaki durum değişkenleri $t=t_j$ koşulu ile t_j anındaki ölçüler de kullanılarak hesaplanıyorsa, bu aşamaya filtre aşaması (update) denir. Eğer herhangi bir t anında bir dinamik sistemin t_j anındaki durum değişkenleri $t > t_j$ koşuluyla, t_j anına kadarki tüm ölçülerle birlikte hesaplanıyorsa bu aşamaya da yumuşatma aşaması denir (Kalman, 1960).

Kalman Filtresinin ilk aşaması olan öncül kestirim (prediction, time update) eşitlikleri;

$$\hat{\underline{X}}_k^- = \underline{\Phi}_{k,k-1} \hat{\underline{X}}_{k-1} \quad (8)$$

$$\underline{l}_k = \underline{A}_k \hat{\underline{X}}_k \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $\hat{\underline{X}}_k^-$, t_k anı için durum vektörünün öncül kestirimini; $\hat{\underline{X}}_{k-1}$, t_{k-1} anındaki durum vektörünün filtre edilmiş (dengelenmiş) kestirimini; $\underline{\Phi}_{k,k-1}$, t_{k-1} anından t_k anına geçiş matrisini; \underline{l}_k , t_k anındaki ölçü vektörünü; \underline{A}_k , ölçme modeline ait şekil (dizayn) matrisini gösterir.

Doğal olarak filtre ilk çalışmaya başladığında t_0 anı için başlangıç değerlerine ihtiyaç duyar. Eşitlik (8)'den de görüldüğü gibi ilk öncül kestirimin yapılabilmesi için, durum vektörünün bir önceki periyoda ait kestirimini bilmesi gerekir. Bu yüzden de başlangıç değerleri sisteme verilmek zorundadır. Öncül kestirimin varyans-kovaryans matrisi:

$$\underline{Q}_k^- = \underline{\Phi}_{k,k-1} \underline{Q}_{k-1} \underline{\Phi}_{k,k-1}^T + \underline{Q}_w \quad (10)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada dinamik sistemin rasgele hatasının varyans-kovaryans matrisi, $\underline{Q}_w = \sigma_a^2 \underline{W}_k \underline{W}_k^T$ eşitliğinden bulunabilir. Burada σ_a^2 rasgele hata olarak düşünülen dinamik değişkenin varyansdır, bu yüzden de çok küçük bir değer olması beklenir.

Yukarıdaki eşitlikler yardımıyla öncül kestirim aşaması gerçekleştirildikten sonra, t_k anı için hesaplanan öncül kestirim ile yine t_k anında yapılan ölçü veya ölçülerle birlikte filtre aşamasına geçilir. Kalman Filtre eşitlikleri:

$$\begin{aligned}\hat{\underline{x}}_k &= \hat{\underline{x}}_k^- + \underline{K}_k (\underline{\ell}_k - \underline{A}_k \hat{\underline{x}}_k^-) \\ \underline{Q}_k &= (\underline{I} - \underline{K}_k \underline{A}_k) \underline{Q}_k^-\end{aligned}\quad (11)$$

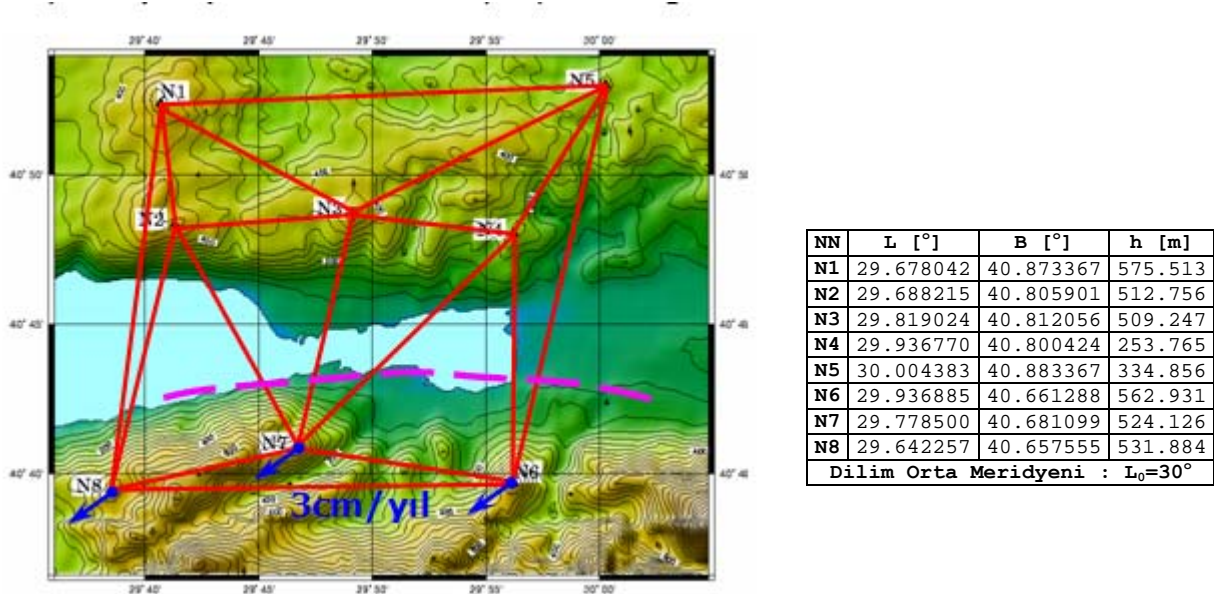
şeklinde verilir. Burada \underline{K}_k , Kalman kazanç (gain) matrisi olarak isimlendirilir aşağıdaki gibi verilir.

$$\underline{K}_k = \underline{Q}_k^- \underline{A}_k^T (\underline{A}_k \underline{Q}_k^- \underline{A}_k^T + \underline{Q}_\ell)^{-1}\quad (12)$$

Sonuç olarak Kalman Filtresi, her yeni periyotta tekrar başa dönerek çalışmasına devam eder. Bu tekrarlı yapı Kalman Filtresinin en önemli özelliklerinden biridir. Bunun yanı sıra filtre tekrarlı yapısı içerisinde her aposteriori kestirimini, o ana kadar yapılmış tüm ölçüleri kullanarak hesaplar. Ama bunu yapması için bütün ölçülerin bilgisayarın hafızasında tek tek tutulmasına gerek yoktur. Bu da filtrenin önemli bir avantajı olarak karşımıza çıkar. (İnce, 1999)

Örnekler

Sayısal uygulama bölümünde bağlı hareketlerin izlenebilmesi amacıyla Kuzey Anadolu Fay'ının (KAF) her iki tarafını kapsayan bir ağı tasarlanmıştır. (Şekil-1).



Şekil-1. Sürekli Mikro Jeodezik Deformasyon Ağı.

Ağ Noktalarındaki Ölçme Hatalarının ve Hareket Beklenen Noktalardaki Deformasyonun Simülasyonu

* Yataydaki deformasyon vektörü **yılda 3 cm** sabit değer olarak ön görülmüştür. Yatay deformasyonun bileşenleri aşağıda ön görülen ilişki üzerinden hesaplanmıştır. Bu çalışmada

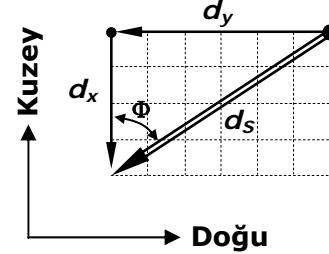
$$d_s = 3 \text{ cm/yıl}$$

$$\phi = \arctan(6/4)$$

$$d_x = -d_s * \cos \phi \quad \text{Kuzey-Güney Bileşeni}$$

$$d_y = -d_s * \sin \phi \quad \text{Doğu-Batı}$$

Bileşeni



* Bu çalışmada düşey deformasyon ön görülmemiştir.

* Bağlı deformasyonları belirlemek amacıyla şekillendirilen jeodezik ağda, ön görülen deformasyonlar İzmit Körfezinin (ve KAF'nın) Güney Kısımına düşen N6, N7, N8 üzerine eklenmiş, kuzey kısma düşen noktalara (N1, N2, N3, N4, N5) eklenmemiştir.

* GPS alıcısından ve operatörden kaynaklanan faz merkezi değişimi ve alet yüksekliği ölçme hataları için $\sigma_a = \pm 0.2 \text{ cm}$ ve GPS ölçülerinin rasgele hatalarından kaynaklanan ölçme hataları için yatayda $\sigma_\phi = \pm 0.3 \text{ cm}$ ve düşeyde $\pm 2 * \sigma_\phi$ duyarlıklı rasgele düzeltmeler eklenerek, deformasyon noktalarının yatay koordinatları (projeksiyon koordinatları) aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\varepsilon_a \sim N(0.0 \text{ cm}, \sigma_a = 0.2 \text{ cm})$$

Alet yüksekliği ölçü hatası ve faz merkezi değişimi hatası

$$\varepsilon_{x,y} \sim N(0.0 \text{ cm}, \sigma_\phi = 0.3 \text{ cm})$$

Ölçü hatalarının yatay (x,y) koordinatlar üzerindeki etkisi

$$\varepsilon_h \sim N(0.0 \text{ cm}, 2 * \sigma_\phi = 0.6 \text{ cm})$$

Ölçü hatalarının düşey (h) koordinatlar üzerindeki etkisi

N1, N2, N3, N4, N5 (KAF'ın Kuzeyi)

$$\delta_x(t) = \varepsilon_a(t) + \varepsilon_x(t)$$

$$\delta_y(t) = \varepsilon_a(t) + \varepsilon_y(t)$$

$$\delta_h(t) = \varepsilon_a(t) + \varepsilon_h(t)$$

$$x(t) = x + \delta_x(t)$$

$$y(t) = y + \delta_y(t)$$

$$h(t) = h + \delta_h(t)$$

N6, N7, N8 (KAF'ın Güneyi)

$$\delta_x(t) = \varepsilon_a(t) + \varepsilon_x(t) + (t-t_0) * d_x$$

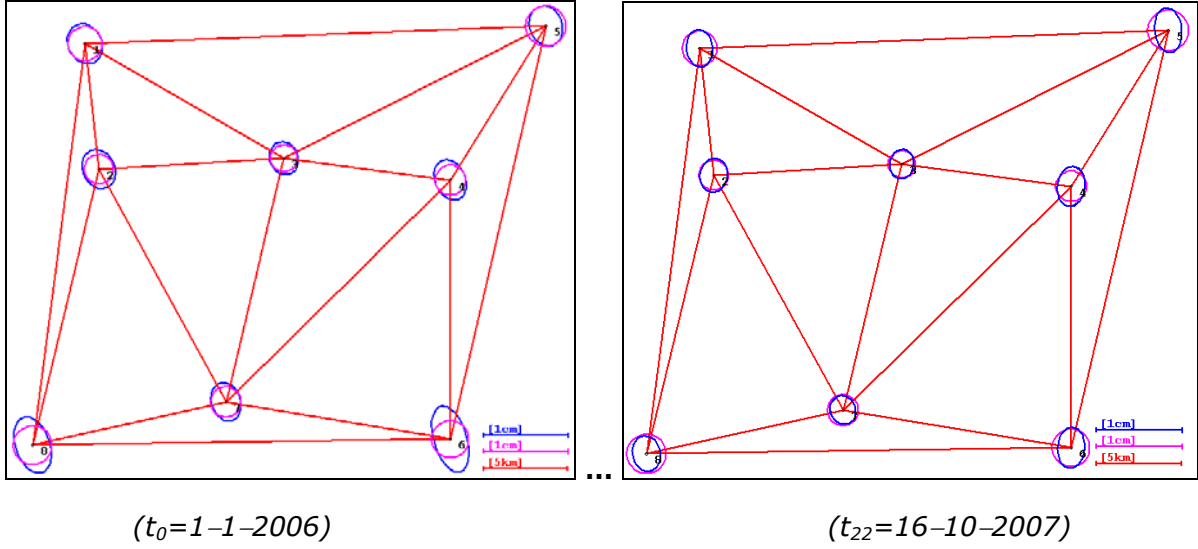
$$\delta_y(t) = \varepsilon_a(t) + \varepsilon_y(t) + (t-t_0) * d_y$$

$$\delta_h(t) = \varepsilon_a(t) + \varepsilon_h(t)$$

$$\{ x(t), y(t), h(t) \}_{WGS84} \rightarrow \{ B(t), L(t), h(t) \}_{WGS84} \rightarrow \{ X(t), Y(t), Z(t) \}_{WGS84}$$

Ağ Optimizasyonu ve Baz Optimizasyonu

* Ağ ölçme planı ağ optimizasyonu yapılarak oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen Duyarlık Optimizasyonu sonucunda 17 adet baz ölçüsü, deformasyon miktarları eklenmiş nokta koordinatlarından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil-2).



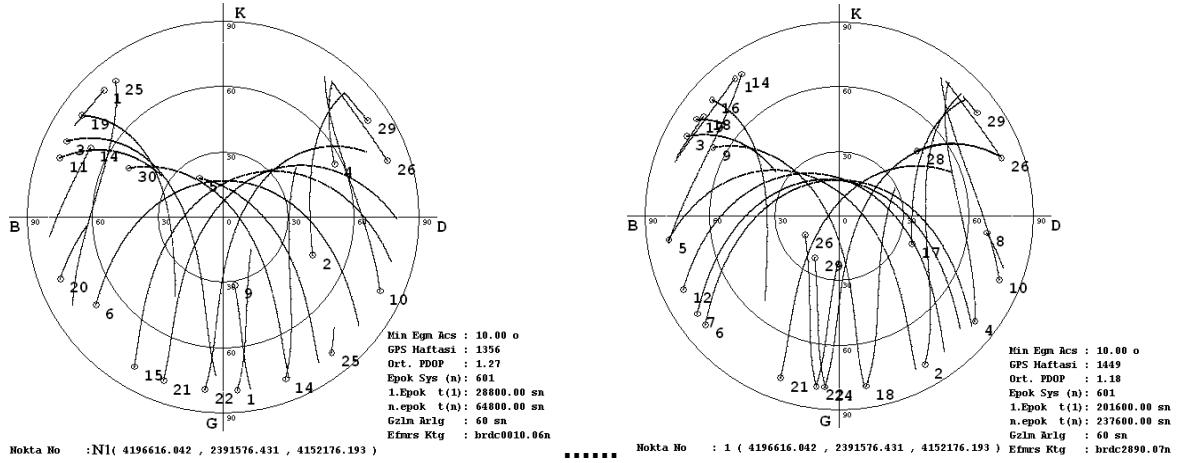
Şekil-2. Ağ Optimizasyonu Sonucu (pembe) ve Baz Optimizasyonu Sonucu (mavi) hata elipsleri.

* Ölçme hatalarının ve deformasyonların etkileri jeodezik ağ noktalarına yansıtıldıktan sonra, uydu ve ağ ölçme planının varyans-kovaryans matrisine etkilerini hesaplayabilmek için, uydu yörünge bilgilerine ve ölçülerin birim ağırlığına ($\sigma_{\Phi} = \pm 0.3 \text{ cm}$) ihtiyaç duyulur. Yayın ve duyarlı olmak üzere yörünge bilgilerine internette ulaşılabilir [1], [2] (Tablo-1).

Tablo-1. 30 Gün aralıklı tasarlanan ölçme periyotları.

| t _j | t=t _j -t ₀ (gün) | t=t _j -t ₀ Ölçü Aralığı (yıl=gün/365.25) | Sivil Takvim | Gps Günü | GPS Efemerisleri (İGS) |
|----------------|---|--|-----------------|-------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 0.0000 | 01-01-2006 | 001-2006 | brdc0010.06n |
| 1 | 30 | 0.0821 | 30-01-2006 | 030-2006 | brdc0300.06n |
| 2 | 60 | 0.1643 | 01-03-2006 | 060-2006 | brdc0600.06n |
| 3 | 90 | 0.2464 | 31-03-2006 | 090-2006 | brdc0900.06n |
| 4 | 120 | 0.3285 | 30-04-2006 | 120-2006 | brdc1200.06n |
| 5 | 150 | 0.4107 | 30-05-2006 | 150-2006 | brdc1500.06n |
| 6 | 180 | 0.4928 | 29-06-2006 | 180-2006 | brdc1800.06n |
| 7 | 210 | 0.5749 | 29-07-2006 | 210-2006 | brdc2100.06n |
| 8 | 240 | 0.6571 | 28-08-2006 | 240-2006 | brdc2400.06n |
| 9 | 270 | 0.7392 | 27-09-2006 | 270-2006 | brdc2700.06n |
| 10 | 300 | 0.8214 | 27-10-2006 | 300-2006 | brdc3000.06n |
| 11 | 330 | 0.9035 | 26-11-2006 | 330-2006 | brdc3300.06n |
| 12 | 360 | 0.9856 | 26-12-2006 | 360-2006 | brdc3600.06n |
| 13 | 390 | 1.0678 | 25-01-2007 | 025-2007 | brdc0250.07n |
| 14 | 420 | 1.1499 | 24-02-2007 | 055-2007 | brdc0550.07n |
| 15 | 450 | 1.2320 | 26-03-2007 | 085-2007 | brdc0850.07n |
| 16 | 480 | 1.3142 | 25-04-2007 | 115-2007 | brdc1150.07n |
| 17 | 510 | 1.3963 | 25-05-2007 | 145-2007 | brdc1450.07n |
| 18 | 540 | 1.4784 | 24-06-2007 | 175-2007 | brdc1750.07n |
| 19 | 570 | 1.5606 | 24-07-2007 | 205-2007 | brdc2050.07n |
| 20 | 600 | 1.6427 | 23-08-2007 | 235-2007 | brdc2350.07n |
| 21 | 630 | 1.7248 | 22-09-2007 | 265-2007 | brdc2650.07n |
| 22 | 654 | 1.7906 | 16-10-2007 | 289-2007 | brdc2890.07n |

* Yukarıda verilen ölçme planına göre uydu yörünge bilgilerinden yararlanarak gün içinde (08:00–18:00) 30 dakikalık epoklarla elde edilen GPS ölçülerinden, amaca en uygun bazlar, baz optimizasyonuna göre belirlenmiştir.



($t_0=1-1-2006$)

($t_{22}=16-10-2007$)

Şekil-3 t_0 ve t_{22} periyotlardaki saat 08:00–18:00 arasında uydu dağılımı

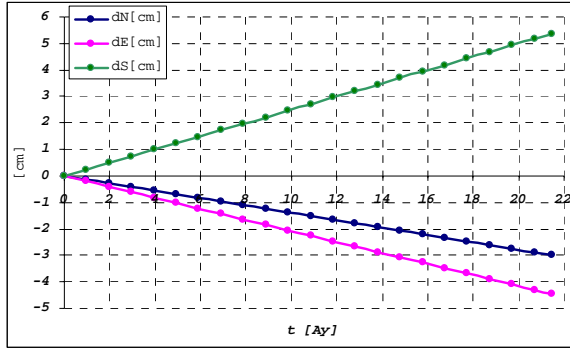
* Baz optimizasyonunda L1 ve L2 faz ölçülerinin kullanıldığı öngörülmüş ve bu ölçülerin duyarlılıkları $\sigma_{L1}=\pm 0.3cm$ ve $\sigma_{L2}=\pm 0.4cm$ olarak alınmıştır. σ_{L1} birim ölçünün duyarlılığı olarak belirlenmiştir. Bu kabuller altında noktaların her bir periyotaki konum bilgileri ve bunlara ait varyans-kovaryans bilgileri elde edilmiştir (Tablo-2).

Tablo-2. Deformasyon noktalarının ilk (t_0) ve son (t_{22}) periyottaki konum bilgileri

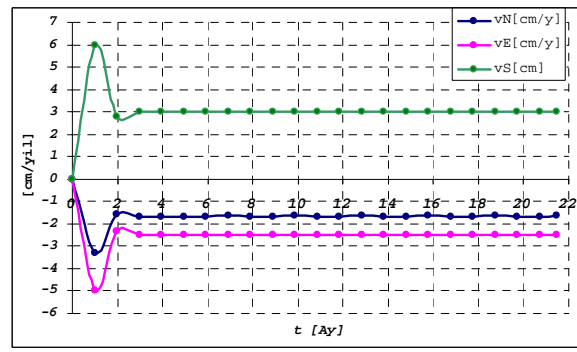
| t_j | NN | x [m] y [m] | K_{xx} [cm ²] | | | | | |
|------------|---------------|----------------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1-1-2006 | 6 | 4502961.02358 | 0.2079 | -0.0595 | 0.0462 | -0.0190 | 0.0562 | -0.0414 |
| | | 494662.71677 | | 0.0580 | -0.0128 | 0.0100 | -0.0224 | 0.0022 |
| | 7 | 4505182.66530 | | | 0.0716 | -0.0120 | 0.0246 | -0.0081 |
| | | 481274.51768 | | | | 0.0327 | -0.0107 | -0.0062 |
| 8 | 4502606.10650 | | | | | 0.0410 | -0.0133 | |
| | 469745.95585 | | | | | | 0.0161 | |
| | | | | | | | | |
| 16-10-2007 | 6 | 4502960.99378 | 0.0706 | -0.0029 | 0.0095 | -0.0047 | 0.0083 | -0.0147 |
| | | 494662.67207 | | 0.0279 | -0.0038 | 0.0066 | -0.0043 | 0.0027 |
| | 7 | 4505182.63550 | | | 0.0275 | -0.0046 | 0.0003 | -0.0092 |
| | | 481274.47298 | | | | 0.0285 | -0.0041 | 0.0086 |
| 8 | 4502606.07670 | | | | | 0.0179 | -0.0131 | |
| | 469745.91116 | | | | | | 0.0327 | |

Kalman Filtrelemesi İle Deformasyonların İzlenmesi

* Her bir ölçme periyodunda elde edilen baz bileşenleri ve varyans-kovaryans matrisleri Kalman Filtreleme yöntemine göre değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.



(a)

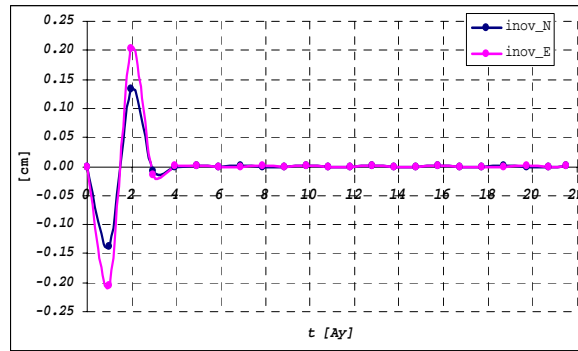


(b)

Şekil-4. N6 Noktasının (a) Yıllık Konumunun ve (b) Yıllık Konum Hızının Kalman Filtrelemesi İle İzlenmesi

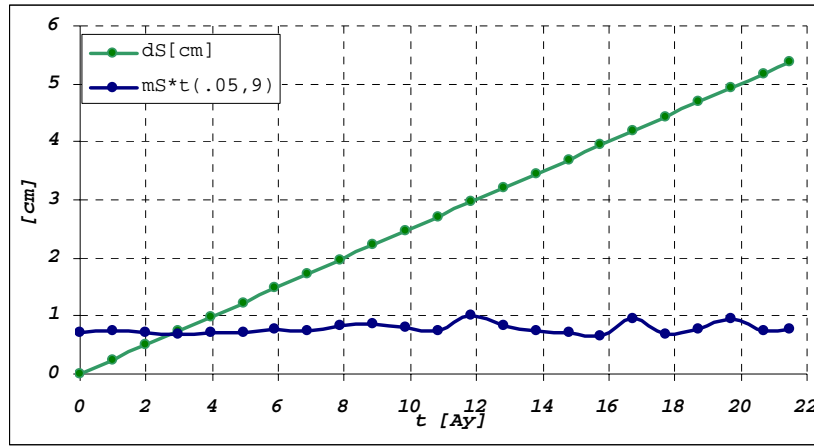
*Kalman Filtreleme yöntemi; başlangıç koordinatları sıfır olarak girildiğinde dahi konum ve hız değerlerini 7~9 periyotları arasında yakalayabilmektedir. Bu durum, problemin yapısına göre bir iki periyot uzayabilmekte yada kısalsabilmektedir. Başlangıç koordinatları için yaklaşık değerlerin verilmesi durumunda yakınsama 4~6 periyotları arasında gerçekleşmektedir.

*Kalman Filtre sonuçlarının güvenilirliği, her periyot için hesaplanan öncül kestirim ile ölçme değerlerinin farklarını yansıtan (innovations) $l_k - A_k \hat{x}_k^-$ değerleri üzerinden test edilir. İnnovasyon değerlerinin umut değerinin sıfır olması, testin sıfır hipotezini oluşturur. Sıfır hipotezinin geçerli olmadığı durumda, filtrenin dinamik modeli geçersizdir. Bu çalışmada N6 noktasında gerçekleştirilen periyotlara ait innovasyon vektörünün grafiği Şekil-5'te verilmiştir.



Şekil-5. N6 Noktasındaki Periyotlarda İnnovasyon Vektörünün ($l_k - A_k \hat{x}_k^-$) Grafiği

* Kalman filtrelemesi sonucu her periyot için elde edilen nokta konum ve varyans-kovaryans bilgilerinden yararlanılarak deformasyon analizi yapılır ve zamana göre deformasyon miktarının grafiği çizilir (Şekil-6).



Şekil-6. N6 Noktasının %95 Güvenle Deformasyon Analizi Grafiği

* N6 noktasının konum değişimine göre çizilen deformasyon grafiği bütün noktalara göre çizilir ve yorumlanır (Şekil-6). Şekil-6 incelendiğinde anlamlı deformasyon büyüklüğünün 4. aydan itibaren belirlenebileceğini görülmektedir. KAF'ın bağıl hareketlerini belirleyebilmek için kurulacak olan bir Mikro GPS Ağının 6 aylık periyotlarda anlamlı değişimleri ortaya çıkarabileceği görülmektedir.

SONUÇ

Çalışmada GPS ile elde edilen konum bilgilerinden yararlanılarak, Kalman Filtreleme yöntemi ile bölgesel bağıl deformasyonların izlenebilmesi aşamaları tartışılmıştır. Bu aşamalar simülasyonla üretilen GPS sonuçlarında test edilmiştir. Simülasyon ile gerçeğine çok uygun GPS gözlem değerlerine ulaşılabilmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri uydu yörünge bilgilerine ulaşılabilmesi ve kurulan GPS matematik modellerinin ölçme anının fiziksel koşullarını ve stokastik bilgilerini yeterince tanımlayabilmesidir.

Kalman Filtrelemesi ile hareketli cisimler sürekli izlenirken eski epok bilgileri depolanmaz. Uzun süreli ve sürekli ölçmelerin yapıldığı deformasyon izleme ağlarında filtrenin bu özelliği avantajlıdır. Filtre konum bilgilerinin yanı sıra deformasyona ilişkin dinamik veya kinematik parametrelerin izlenebilmesi olanağını da sağlar. Bu parametrelerin sürekli izlenmesi ve bu büyüklüklerde oluşabilecek anlamlı değişikliklerin belirlenmesi afetlerin izlenmesi ve tahmini süreçleri için önemlidir.

KAYNAKLAR

Açııcı, E., Kurt, O., Açıık, M. ve Akyüz, Ö., 2003, GPS Ölçüleri ile Geçerli Konum Bilgilerinin Elde Edilmesi, **TMMOB HKMO Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu**, 30-31 Ekim, İstanbul.

Aksoy, A., 1987, Jeodezik Değerlerin Matematik-İstatistik Testlerle İrdelenmesi, TMMOB, HKMO, **Türkiye I. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı**, s.559-593, 23-27 Şubat, Ankara.

İnce, C. D., 1999, Dinamik Sistemlerin GPS ve Kalman Filtresi ile Anlık Olarak İzlenmesi, **İTÜ Fen Bilimler Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Anabilim Dalı**, İstanbul.

Kalman, R. E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, **Journal of Basic Engineering**, Vol. 82D, 35-45.

McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y.,

Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M.N., Veis, G., 2000, Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus **J. Geophys. Res.** Vol. 105, No. B3, p. 5695-5719.

Konak H., Kurt O. Ve Öztürk E., 2004, Günümüzde Mühendislik Ağlarının Tasarımı Üzerine Öneriler, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (Tujk), **2004 Yılı Bilimsel Toplantısı, Mühendislik Ölçmelerinde Jeodezik Ağlar Çalıştayı, Çağrılı Bildiri**, 14-16 Ekim 2004, Zonguldak.

Konak H., Kurt O. Ve Öztürk E., 2005, Gps Ağları İçin Bir Optimizasyon Stratejisi, **10. Türkiye Harita Bilimsel Ve Teknik Kurultayı**, 28 Mart-1 Nisan 2005, Ankara.

Kurt, O., 2003, GPS Gözlemlerinin Simülasyonu, **9. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı**, s.399-418, Ankara, 31 Mart-4 Nisan.

Kurt O., 2005, Yapay Uydu Bazlı Alıcılarda Çoklu Frekansın Önemi, **10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı**, 28 Mart-1 Nisan, Ankara.

Kurt O., Konak H. Ve Öztürk E., 2005, Gps Ağlarında En Uygun Gözlem Anlarının Planlanması, **10. Türkiye Harita Bilimsel Ve Teknik Kurultayı**, 28 Mart-1 Nisan 2005, Ankara.

Öztürk, E. ve Şerbetçi, M., 1992, Dengeleme Hesabı, Cilt III, **KTÜ, MMF, Genel Yayın No:144, Fakülte Yayın No:40**, Trabzon.

Şahin, M., Tari, E., İnce, C. D., 1999 Continuous Earthquake Monitoring with Global Positioning System, **Proceedings of International Conference on The Kocaeli Earthquake, 17 August 1999**, eds. Karaca, M., Ural, D.N., December 2-5, 1999, pp. 231-238, Istanbul, Turkey.

Teknik Rapor, 2007, HKMO TUSAGA Aktif CORS-TR Ön Raporu, **Harita Bülteni**,Yıl:17, Sayı:67, Haziran, s.21-23.

Teknik Rapor, 2001, Harita Genel Komutanlığı İnternet Sitesi, Harita Genel Komutanlığı Jeodezi Dairesi, 2001, Şubat, *Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA-99)*, or, Ankara, 15 Şubat 2007. http://www.hgk.mil.tr/haritalar_projeler/jeodezi/tutga/default.htm

Web kaynakları

[1] <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/> , Precise Ephemeris (SP3).

[2] <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/>, Broadcast Ephemerides .

[3] <http://gmt.soest.hawaii.edu/>, GMT (Generic Mapping Tools) harita çizim yazılımı, C dilinde yazılmış.

[4] <http://www.bloodshed.net/dev/devcpp.html>, Dev-C++, C/C++ derleyicisi, (Delphi de yazılmış)

[5] <http://www.gnuplot.info/>, Gnuplot, Grafik çizim yazılımı, C dilinde yazılmış.