

**İSTENEN DÖNEM İÇİN DÜZENLİ**  
**İYONOSFERİK TOPLAM ELEKTRON**  
**İÇERİK TAHMİNİ-DTEİ**

**Prof. Dr. Feza Arıkan,**  
**Hacettepe Üniversitesi, Ankara**  
**[arikan@hacettepe.edu.tr](mailto:arikan@hacettepe.edu.tr)**

# İÇERİK

- GİRİŞ
- GPS SİNYALLERİNİN ÖNİŞLEMESİ
- TOPLAM ELEKTRON MİKTARININ DÜZENLEMELİ KESTİRİM ALGORİTMASI
- ALGORİTMANIN UYGULANMASI
- SONUÇLAR

# GİRİŞ

- **Toplam Elektron Miktarı (Total Electron Content : TEC)** radyo dalgasının izlediği yolun üzerindeki bir metrekare alanda bulunan serbest elektronların sayısıdır.
- **TEC değerleri ile iyonosferdeki kısa ve uzun vadeli değişimler, iyonosferik düzensizlikler ve bozan-etkenler** incelenebilir.
- **Küresel Konumlama Sisteminde (Global Positioning System : GPS)** yer alan uydulardan gelen eşzamanlı çift sinyal (L1, L2) kullanılarak bölgesel ve küresel TEC değerleri tahmin edilebilmektedir.
- **Literatürdeki bir çok çalışmada TEC değerleri tahmin edilirken alıcı üzerindeki ve çevresindeki iyonosfer düzgün dağılmış olarak kabul edilir. TEC iyonosferin en az 5 ila 15 dakika boyunca değişmediği varsayımı altında, alıcının zenit açısına en yakın uydunun seçilmesi ile hesaplanmaktadır.**

• Bu çalışmada gün içinde herhangi bir zaman döneminde ölçülen tüm GPS sinyallerini kullanarak dik TEC (VTEC) değerlerini kestiren bir yöntem geliştirilmiştir.

• Ön inceleme ve elemeden geçirilen tüm eğik TEC (STEC) verileri yerelbaşucu açısı ile orantılı ağırlık katsayısı ile çarpılarak VTEC değerleri hesaplanmıştır.

• Tüm uydulardan ve istenen sürede elde edilen VTEC verileri en küçük kareler yöntemi ile bir araya getirilmiş ve pürüzsüz VTEC iki basamaklı bir düzenleme yöntemi ile kestirilmiştir.

• Bu düzenlemenin ilk basamağında yüksek geçirgen ceza işlevi kullanılarak hata en aza indirgenmiştir.

- **Düzenleyicinin ikinci basamağında kayan pencerele ortanca süzgeç ile kestirilen dik VTEC değerlerindeki istenmeyen hatlar azaltılmaktadır.**
- **Oluşturulan kestirim algoritması çeşitli enlemlerdeki GPS alıcı sinyalleri için güneş lekeleri değişimlerinin 2001 yılı içinde en fazla olduğu tarihler arasında uygulanmıştır.**
- **Düzenlemeli VTEC kestirim algoritmasının hem sakin hem de iyonosferik bozulmaların olduğu günlerde VTEC değerlerini son derece gübüz ve başarılı kestirdiği gözlenmiştir.**
- **Algoritmada kullanılan parametreler ise sakin ve bozulmalı günler için farklılık göstermeden gübüz bir şekilde seçilebilmektedir.**
- **Varolan diğer kestirim ve haritalama algoritmalarının sonuçları ile karşılaştırıldığında, önerilen algoritmanın deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir.**

# GPS SİNYALLERİNİN ÖNİŞLEMESİ



<http://igscb.jpl.nasa.gov>

- Sözde menzilden STEC
- Sözde menzilin faza dayandırılmasından STEC

$$A = 40.3 \text{ m}^3/\text{s}^2; f_1 = 1575.42 \text{ MHz}; f_2 = 1227.60 \text{ MHz}$$

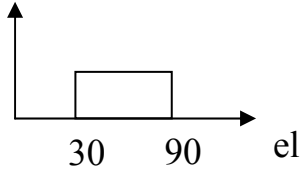
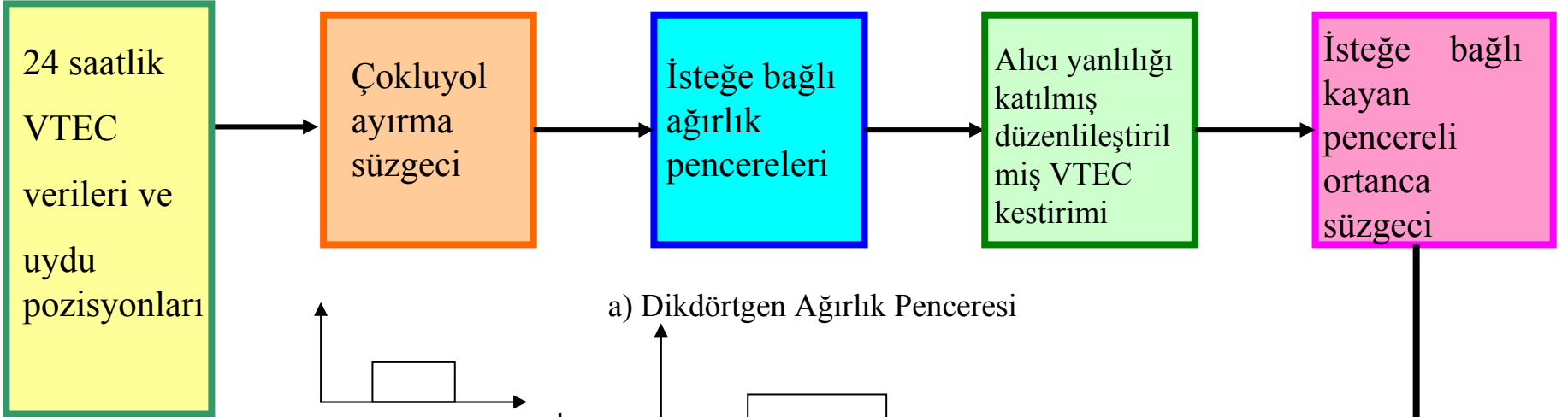
$$\text{VTEC} = \text{STEC}/M(\epsilon) \quad M(\epsilon) = \left[ 1 - \left( \frac{R \cos \epsilon}{R + h} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

$\epsilon$  = başucu açısı;  $R$  = dünya efektif yarıçapı;  $h$  = 428.8 km

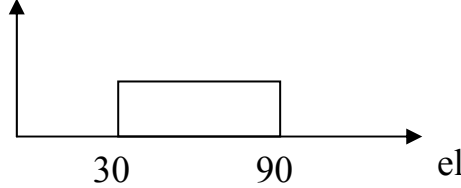


- ✓ 24 saatlik VTEC değerlerini topla (bir uydu için 2880 veri)
- ✓ 24 saatlik uydu pozisyonlarını topla (2880 veri)
- <http://164.214.2.59>
- ✓ Yerel koordinatlara çevir
- ✓ İstenen zaman süresi için bir veri vektörü oluştur

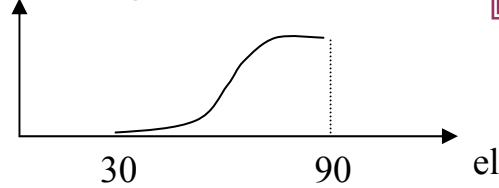
# TOPLAM ELEKTRON MİKTARININ DÜZENLEMELİ KESTİRİM ALGORİTMASI



a) Dikdörtgen Ağırlık Penceresi



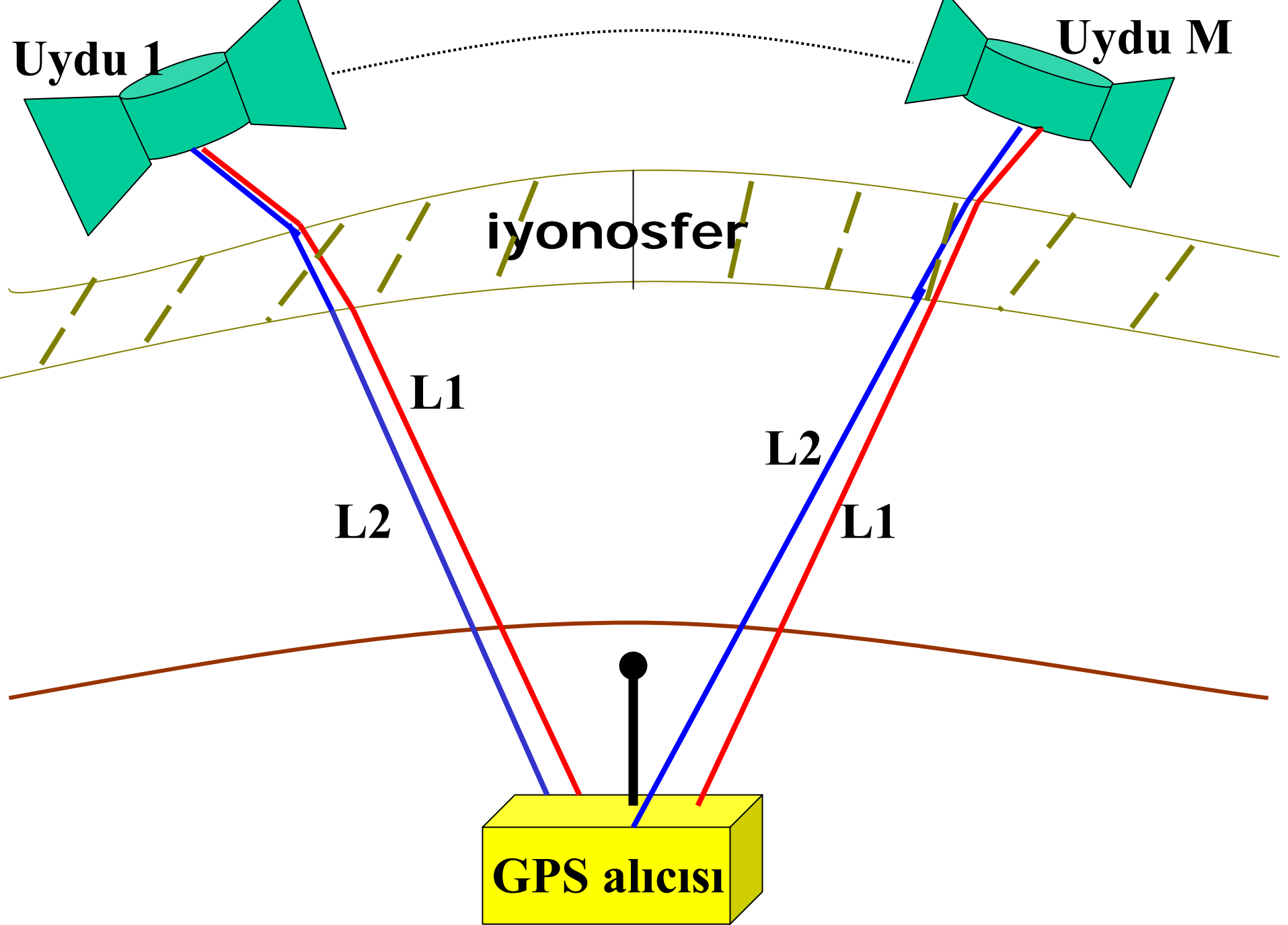
b) Gauss Ağırlık Penceresi



c) Ölçekli Ağırlık Penceresi

24 saatlik VTEC verileri ve 24 saatlik uydu pozisyonları

Düzenlenileştirilmiş TEC





## **$M$ adet uydudan gelen hesaplanmış VTEC işareti**

$$\mathbf{x}_i = [x_i(0) \dots x_i(n) \dots x_i(N-1)]^T$$

$$0 < i < M \quad 0 < n < N-1 \text{ (toplam veri sayısı)}$$

## **İsteğe bağlı ağırlık pencereleri**

$$\mathbf{w}_i = [0 \dots 0 \ w_i(1) \dots w_i(N_{i,m}) \ 0 \dots 0]^T$$

## **En aza indirilecek maliyet işlevi:**

$$J_{\mu, k_c}(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M (\mathbf{x} - \mathbf{x}_m)^T \mathbf{W}_m (\mathbf{x} - \mathbf{x}_m) + \mu (\mathbf{x} - a\mathbf{t})^T \mathbf{H}(k_c) (\mathbf{x} - a\mathbf{t})$$

**$\mathbf{W}_i = \text{diag}(\mathbf{w}_i)$ ;  $\mathbf{H}(k_c)$ =yüksek geçirgen ceza işlevi**

**$k_c$ =kesme sıklığı**

**$(\mathbf{x} - a\mathbf{t})$  = yönseme giderme işlevi**

Seçilmiş  $\mu$  ve  $k_c$  değerleri için  $J$  maliyet işlevini en aza indiren  $\mathbf{x}$  :

$$\mathbf{A}(\mu, k_c) \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ a \end{bmatrix} = \mathbf{b}$$

Sisteminin çözümüyle elde edilir. Burada

$$\nabla_{\mathbf{x}} J_{\mu, k_c}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad \partial J / \partial a = 0$$

$$\mathbf{A}(\mu, k_c) = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m + \mu \mathbf{H}(k_c) & -\mu \mathbf{H}(k_c) \mathbf{t} \\ \mathbf{t}^T \mathbf{H}(k_c) & -\mathbf{t}^T \mathbf{H}(k_c) \mathbf{t} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m \mathbf{x}_m \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{x}'$  in kestirimi  $\tilde{\mathbf{x}}$ ,

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}(\mu, k_c) \\ a \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1}(\mu, k_c) \mathbf{b}$$

**Ceza işlevi 24 saatlik çevrimsel bakışlılığı içerdiği için Toeplitz bir yapı göstermektedir. 24 saatin altında istenen herhangi bir zaman dönemi için kestirim yapıldığında en az kareler yönteminde doğrusal bir oturtma yapılarak sinyalin yönsemesi giderilmiş ve aynı ceza işlevi kullanılarak kestirimler aşırı salınımlardan kurtarılarak yumuşatılmıştır.**

# CEZA İŞLEVİ

$$\mathbf{H}(k_c) = \begin{bmatrix} h_0(k_c) & h_1(k_c) & \cdots & h_{N-1}(k_c) \\ h_{N-1}(k_c) & h_0(k_c) & \cdots & h_{N-2}(k_c) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_1(k_c) & h_2(k_c) & \cdots & h_0(k_c) \end{bmatrix}$$

$$h_n(k_c) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{H}_k(\omega_c) \exp(j \frac{2\pi}{N} kn) \quad \omega_c = 2\pi k_c / N$$

$$H_k(\omega_c) = \begin{cases} 1, & \text{if } \pi - \omega_c \leq \frac{2\pi}{N}k \leq \pi + \omega_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$h_n(k_c) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{N}(2k_c + 1), & \text{for } n = 0 \\ -\sin\left(\frac{\pi n}{N}(2k_c + 1)\right) / \left(N \sin\left(\frac{\pi n}{N}\right)\right), & \text{for } n \neq 0 \end{cases}$$

# ALGORİTMANIN UYGULANMASI

- Oluşturulan kestirim algoritması

**Kiruna**, Norveç (67.32° N, 20.09° E)

**Kiev**, Ukrayna (50.22° N, 30.30° E)

**Ankara**, Türkiye (39.53° N, 32.45° E)

**M. Dragot**, İsrail (31.35° N, 35.23° E)

alıcıları tarafından **23 – 28 Nisan 2001** tarihleri arasında ölçülen GPS verileri için uygulanmıştır.

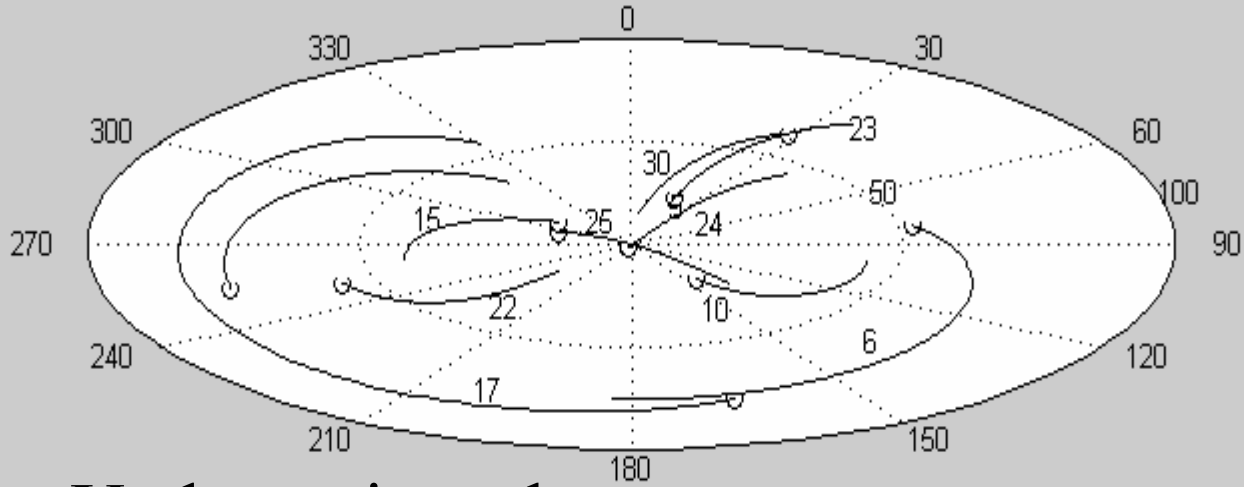
**23 Nisan** : Nisan 2001 içinde **en negatif** bozulmanın olduğu gün

**25 Nisan** : Nisan 2001 içinde beşinci en **sakin** gün

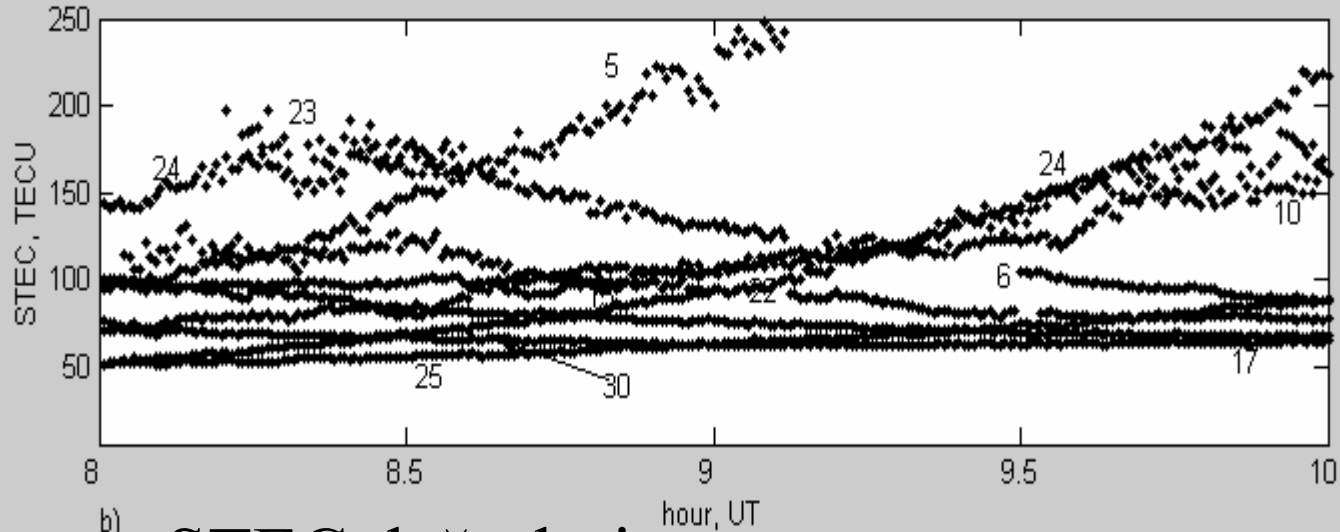
**28 Nisan** : Nisan 2001 içinde **en pozitif** bozulmanın olduğu gün

- CODE, NRCan, ESA/ESOC, JPL-GNISD, IRI, gAGE/UPC modelleri ile karşılaştırılmıştır.

# Ankara, 25 NİSAN 2001



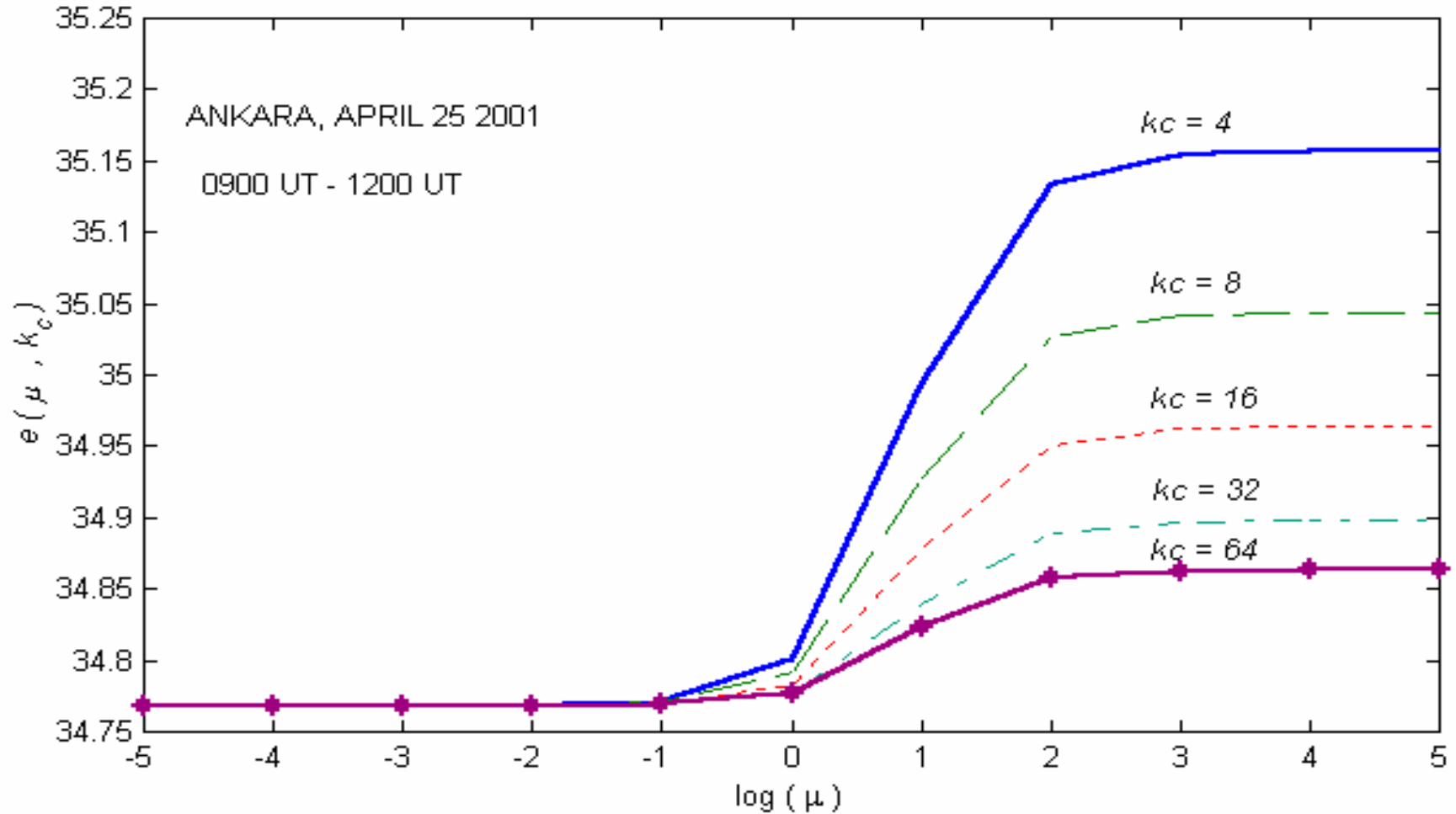
a) Uydu pozisyonları



b) STEC değerleri

# $\mu$ ve $k_c$ değerlerinin bulunması için hata işlevi

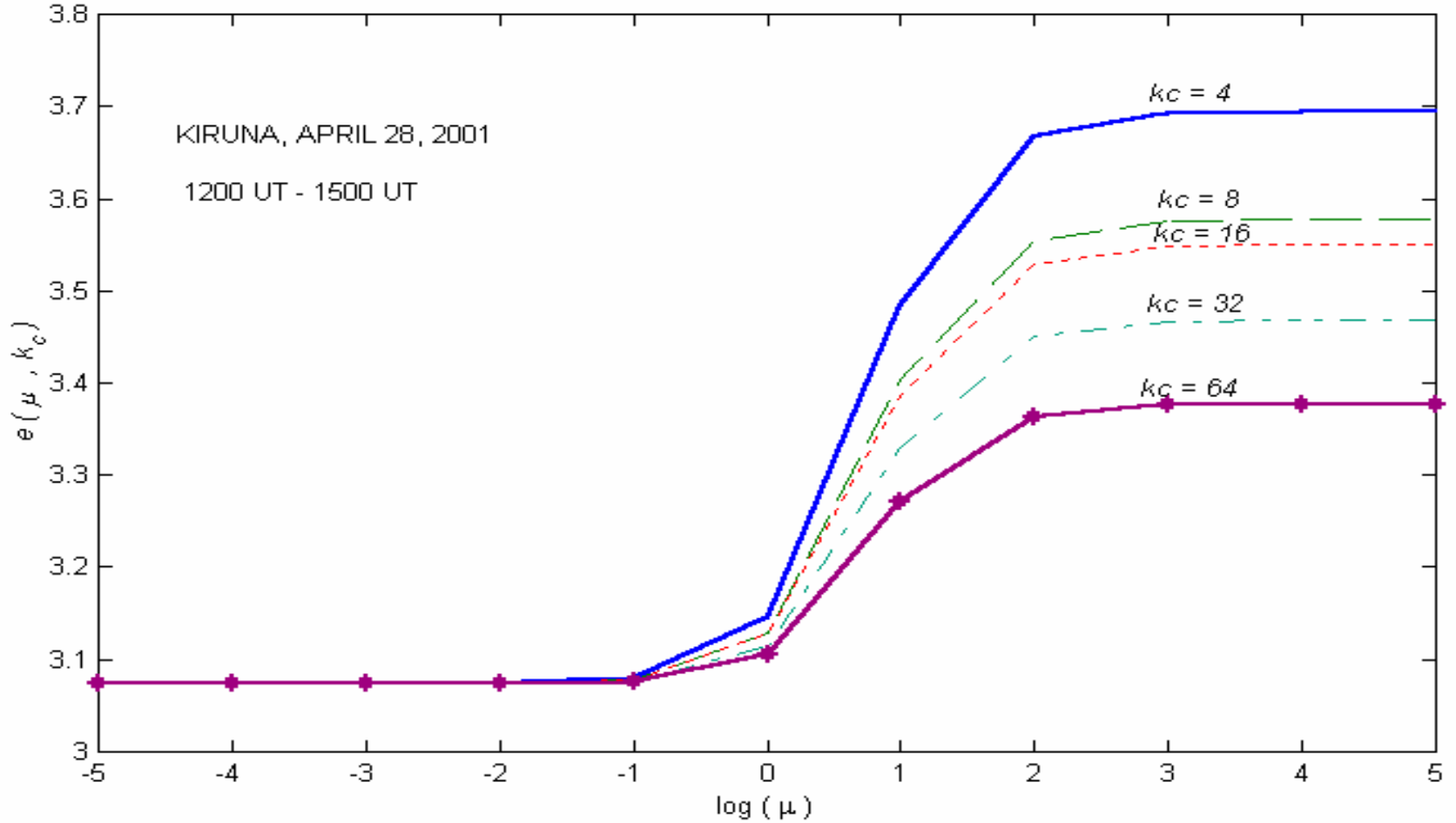
$$e(\mu, k_c) = \sum^M ||\mathbf{W}_i(\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_i)||^2$$



**En iyi seçim:  $\mu = 0.1$  ve  $k_c = 8$**

# $\mu$ ve $k_c$ değerlerinin bulunması için hata işlevi

$$e(\mu, k_c) = \sum_{i=1}^M ||\mathbf{W}_i(\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_i)||^2$$

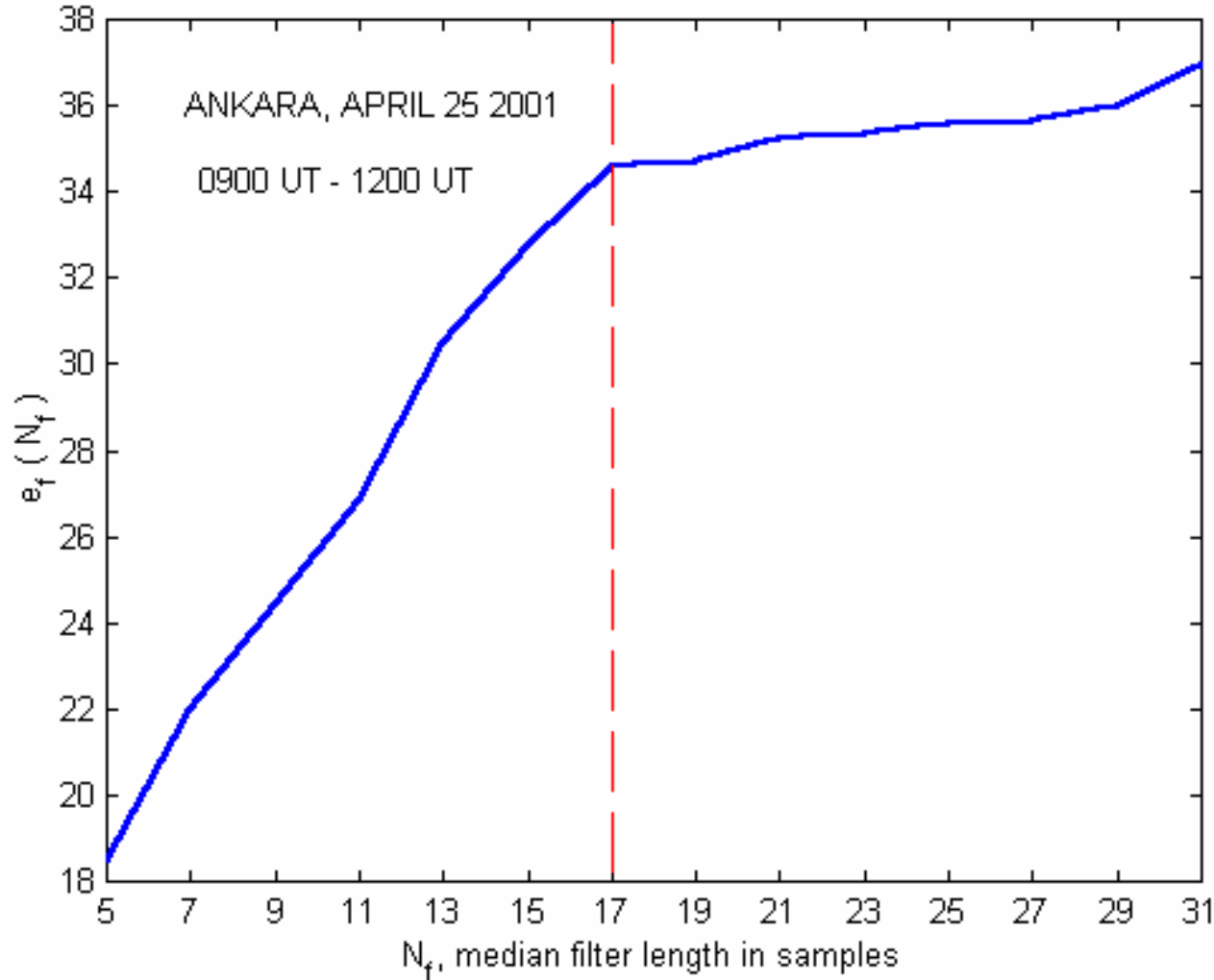


**En iyi seçim:  $\mu = 0.1$  ve  $k_c = 8$**



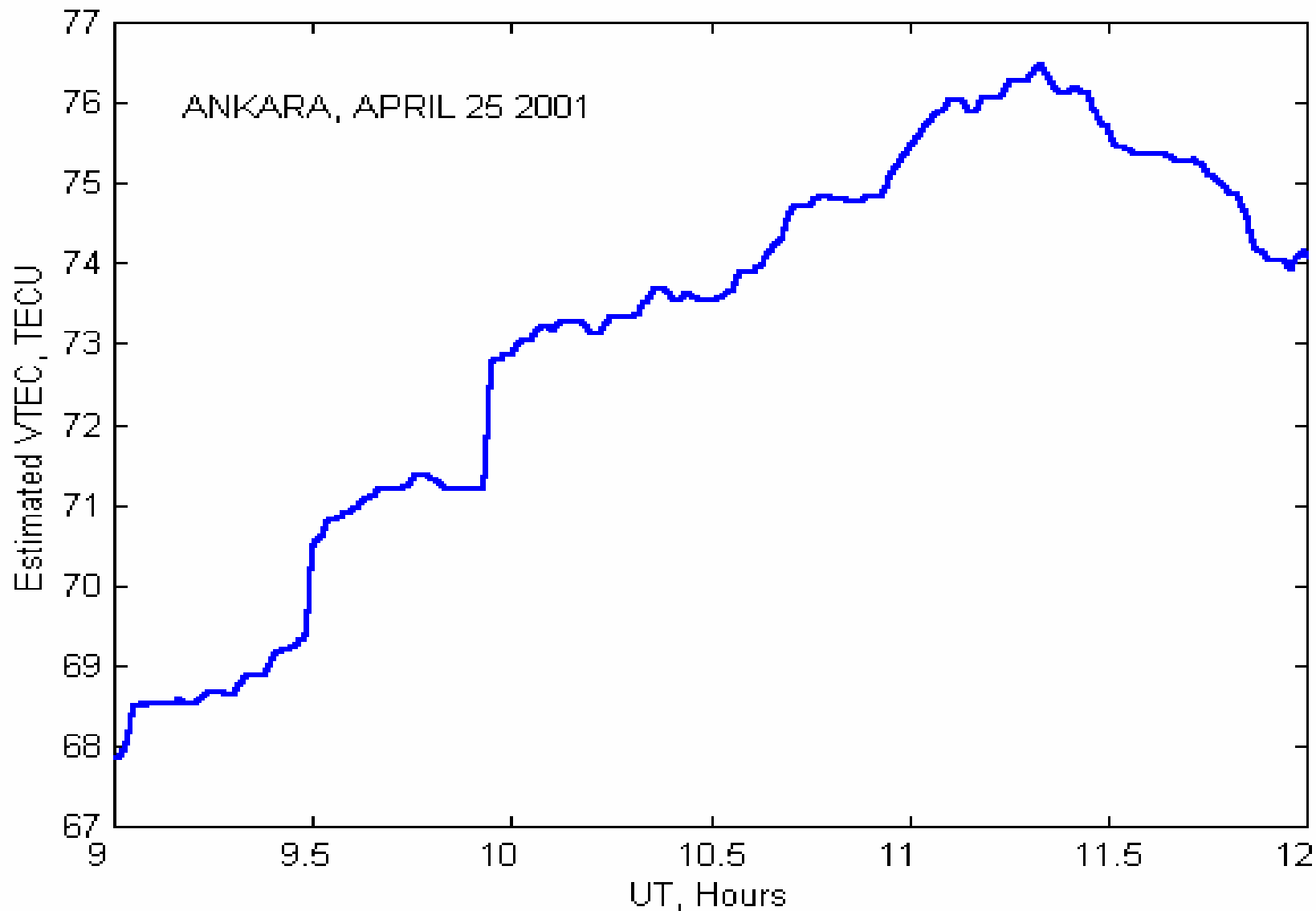
# İsteğe bağlı kayan pencere ortanca süzgeci hata işlevi

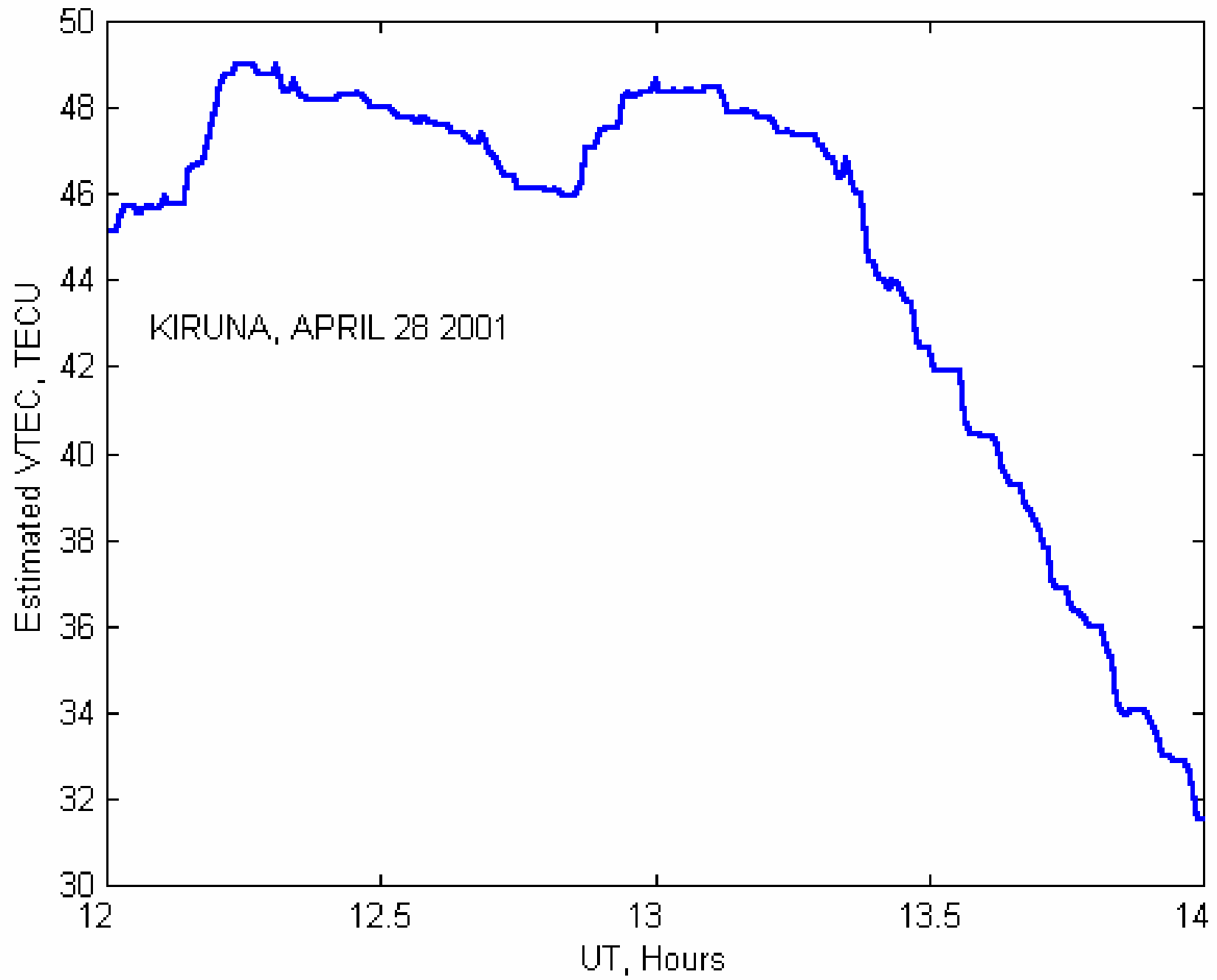
$$\text{med error}(N_m) = \|\tilde{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{x}}_{N_m}\|^2$$



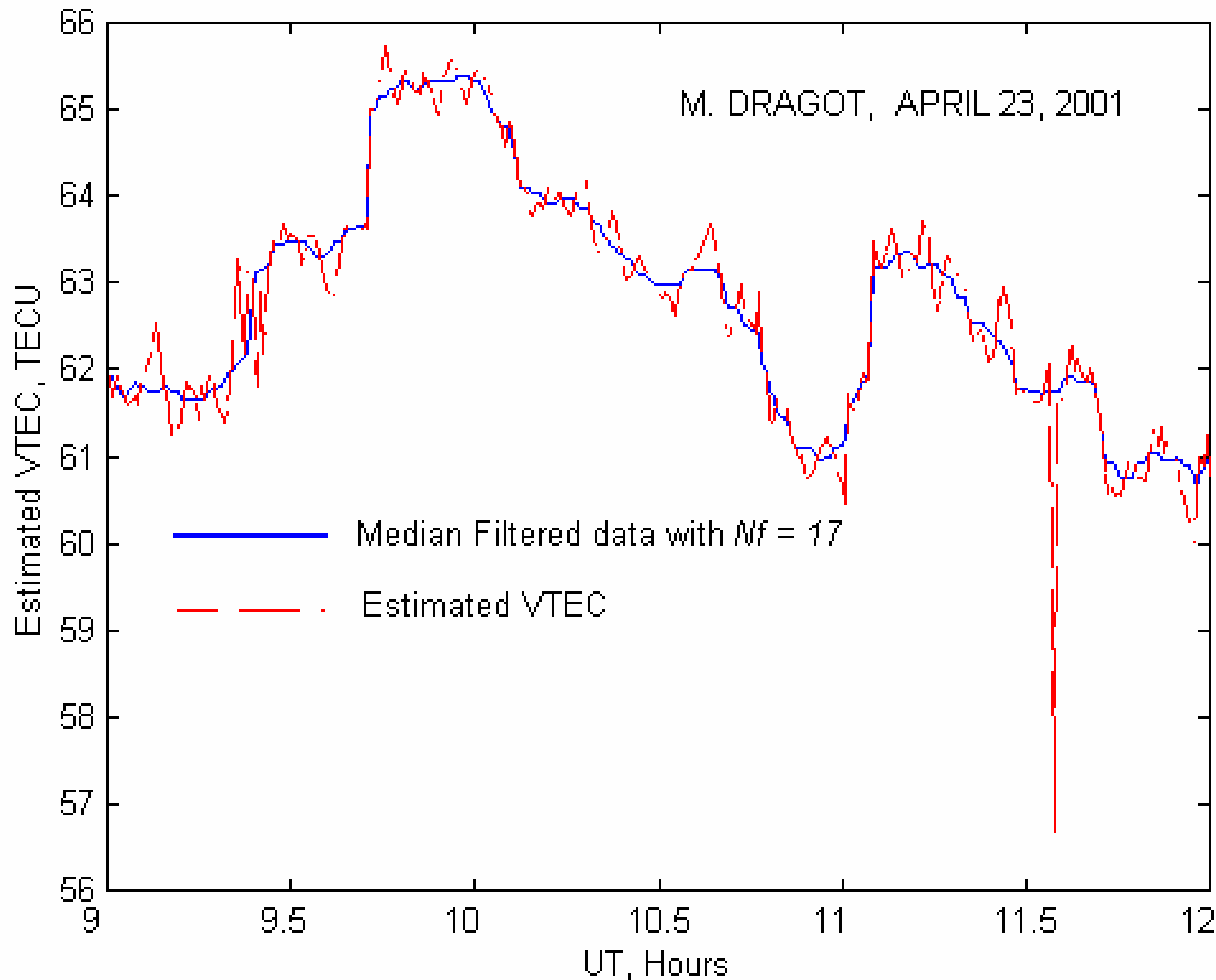
**En iyi seçim:  $N_f = 17$**

# İstenen süreler için kestirilmiş ve ortanca süzgeçten geçirilmiş VTEC

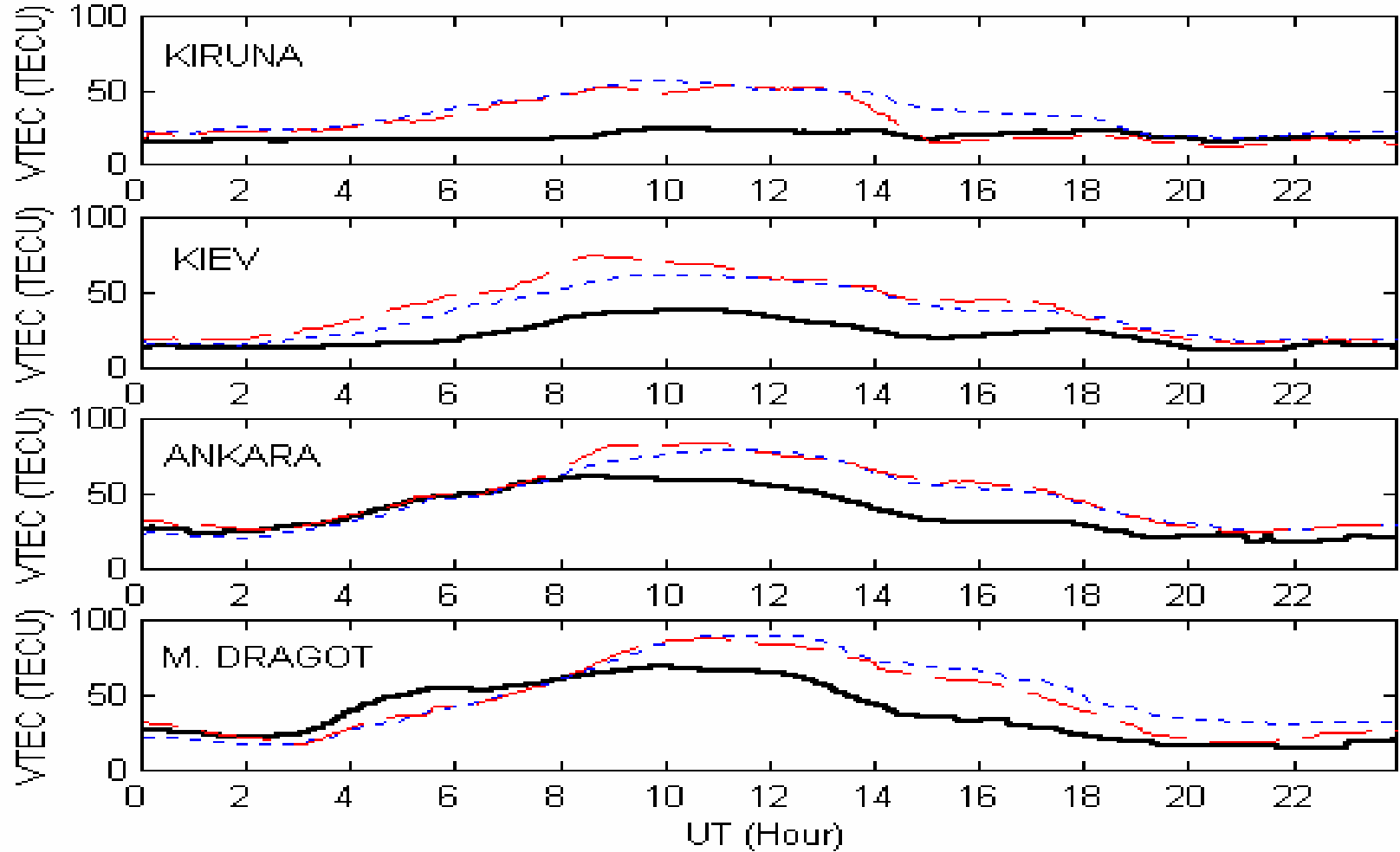




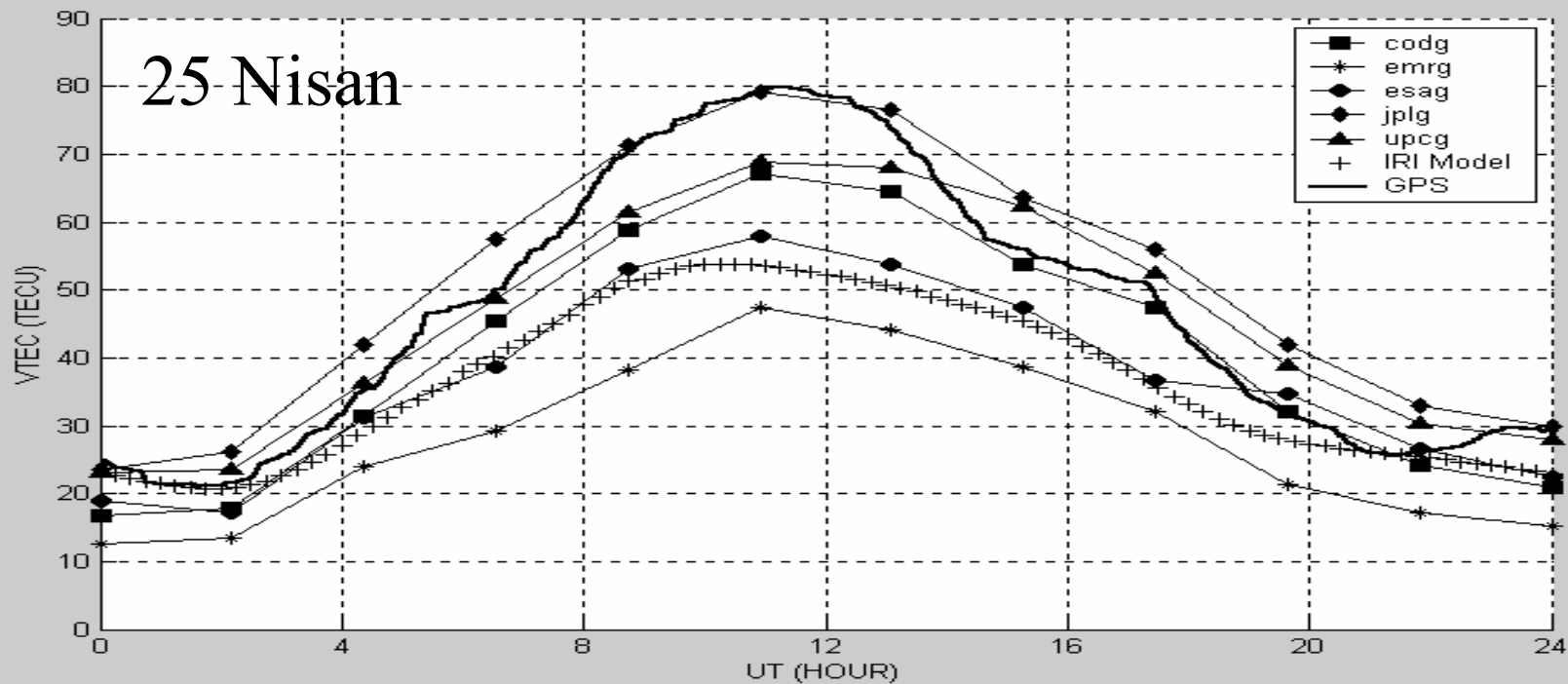
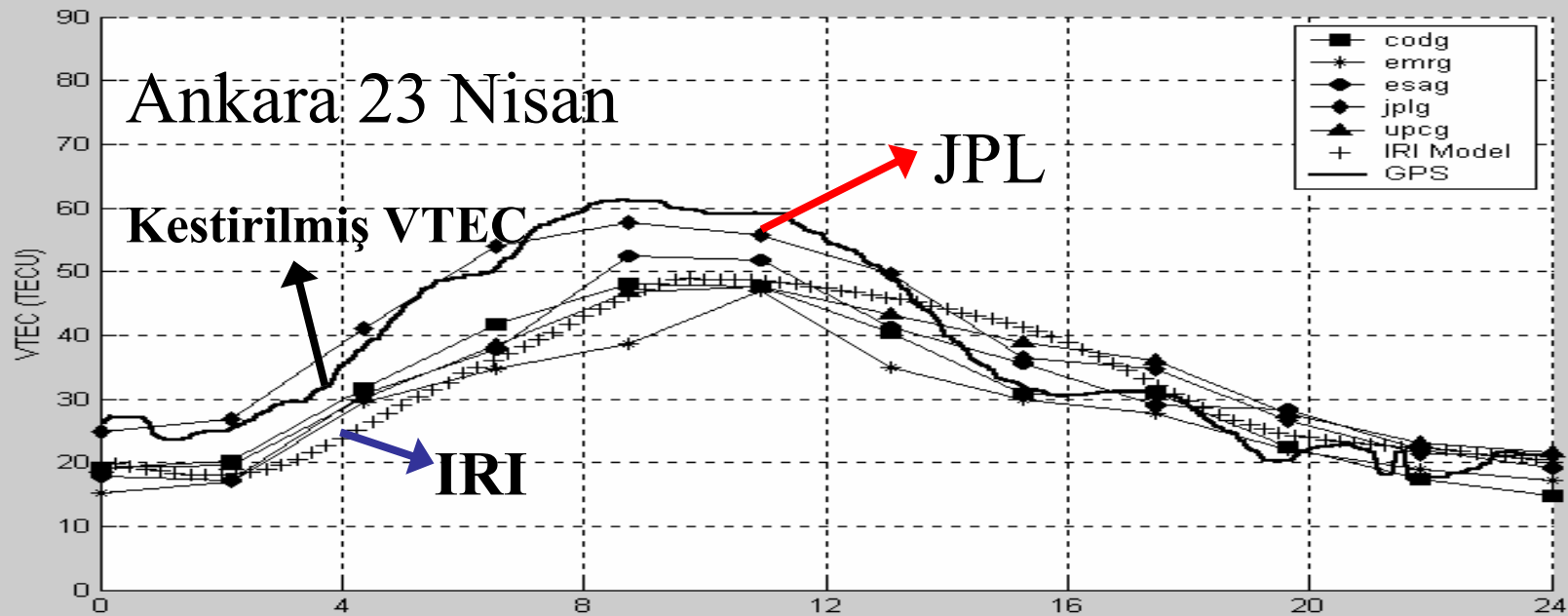
M. DRAGOT, APRIL 23, 2001

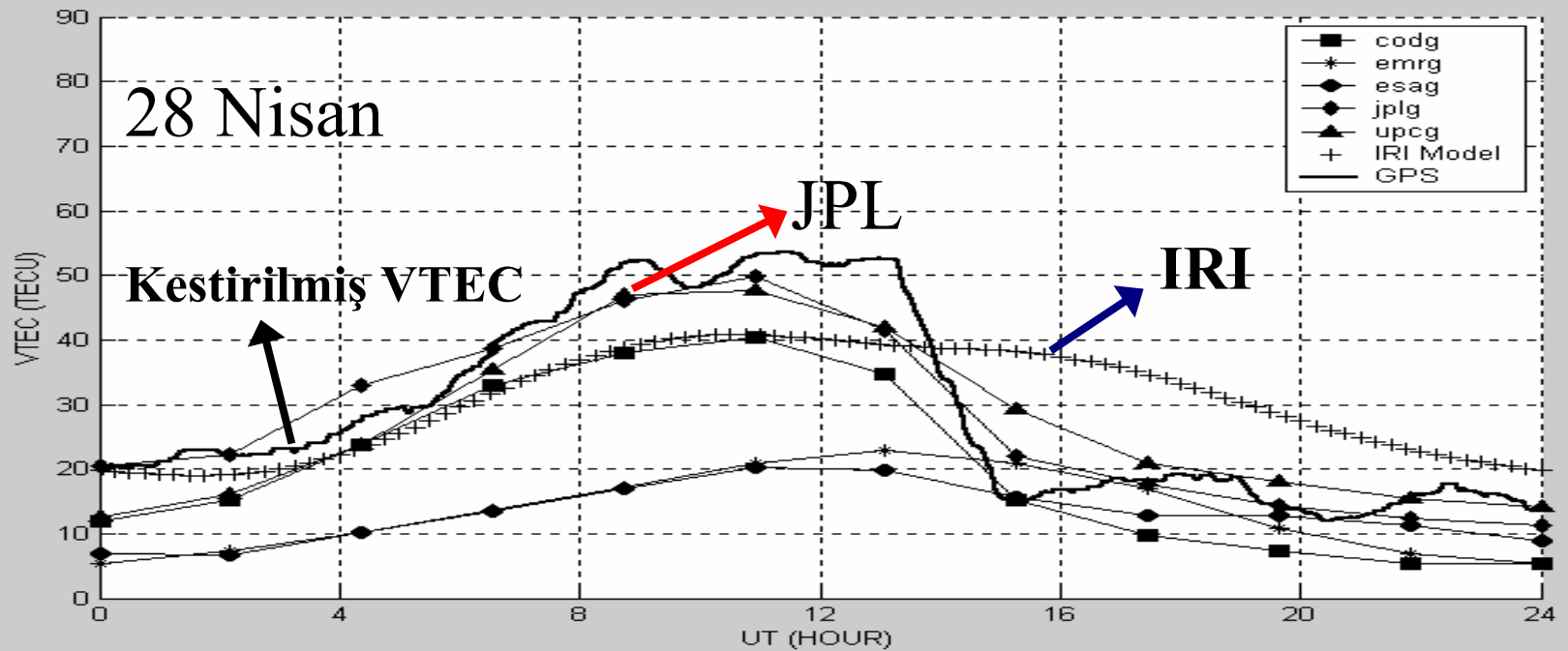
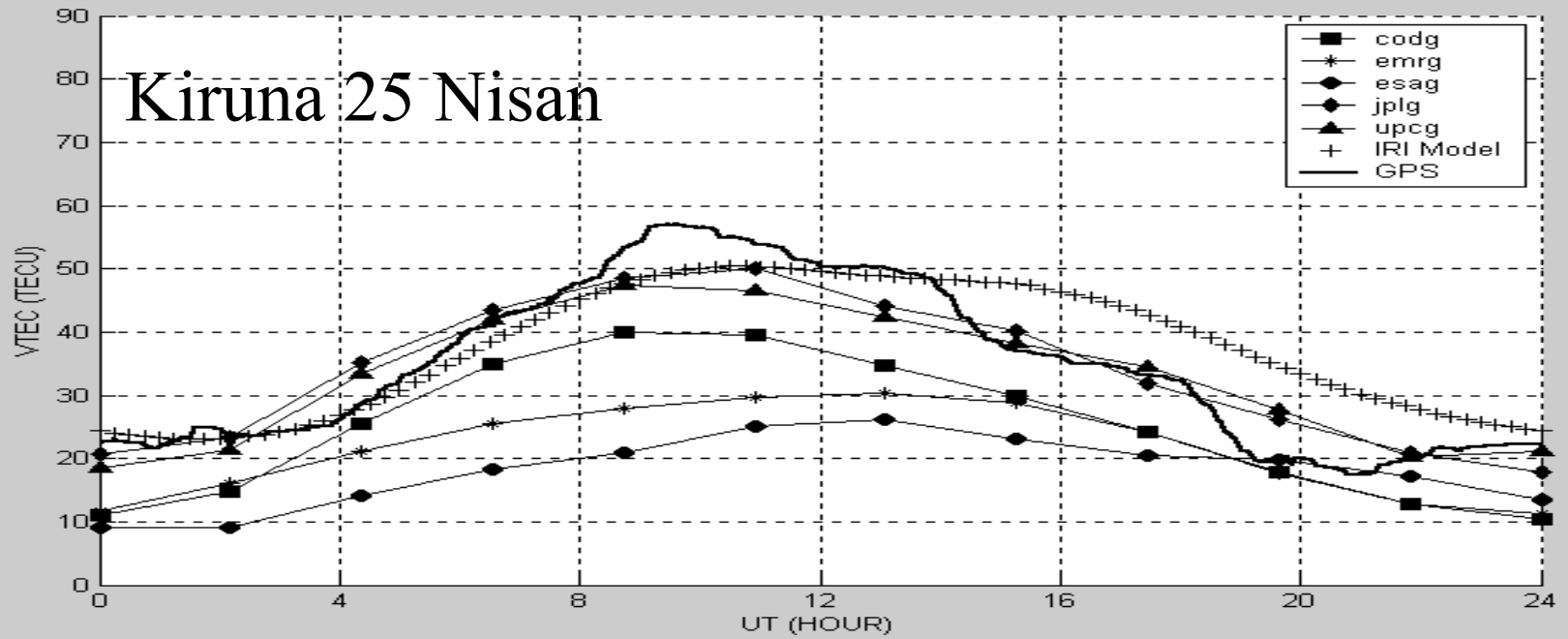


# 24 saat için Kestirilmiş ve ortanca süzgeçten geçirilmiş VTEC



— 23 Nisan    ..... 25 Nisan    - - - - 28 Nisan





# SONUÇLAR

- **En küçük kareler yöntemi kullanılarak 24 saatlik ve daha kısa süreler için GPS uydu sinyallerinden VTEC değeri kestirilmiş ve başarımı diğer kestirim algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. En iyi uyum JPL harita sonuçları ile olduğu gözlenmiştir.**
- **Düzenleştirme kestirim algoritmasının ve ortanca süzgecin parametreleri iyonosferin durumundan ve GPS alıcısının yerinden bağımsız olarak son derece gürbüz bir şekilde seçilebilmektedir.**
- **GPS alıcısının çokluyol bölgesi dışında kalan tüm uydu sinyalleri kullanılmaktadır. Hiçbir zaman ortalaması alınmamıştır. İyonosferdeki tüm zaman değişimleri gözlenebilmektedir.**