

**YENİ NESİL YERKÜRESEL KONUMLAMA SİSTEMİ
SİNYALLERİ KULLANILARAK EĞİK-TOPLAM
ELEKTRON İÇERİĞİNİN KESTİRİLMESİ**

**ESTIMATION OF SLANT TOTAL ELECTRON CONTENT
USING NEW GENERATION GLOBAL POSITIONING
SYSTEM SIGNALS**

AYŞEGÜL OTRAKÇIER

PROF. DR. CENK TOKER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Onurlu duruşlarıyla her zaman bana ilham veren gcl kadınlar,
Sevgili babaannem Seher OTRAKÇIER, sevgili anneannem Edibe KAVAK
ve canım anneme

ÖZET

YENİ NESİL YERKÜRESEL KONUMLAMA SİSTEMİ SİNYALLERİ KULLANILARAK EĞİK-TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİNİN KESTİRİLMESİ

Ayşegül OTRAKÇIER

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cenk TOKER

Ocak 2021, 80 sayfa

İyonküre, güneşten yayılan yüksek enerjili ışınların yüksüz parçacıkları iyonlaştırması sonucu meydana gelen serbest yüklü parçacıklardan oluşan, iyonize plazma yapısındaki havaküre tabakasıdır. İyonküre frekans dağıtım, her noktasında aynı etkileri göstermeyen, zamana göre değişen, yerçekimi ve dünyanın manyetik alanı gibi pek çok faktörden etkilenen karmaşık bir yapıya sahiptir. Kısa Dalga (KD) sinyalleri iyonküreden yansır, uydu sinyalleri iyonkürede kırılmaya uğrar. Bu sebeple iyonkürenin sinyaller üzerindeki etkilerinin anlık olarak çözümlenmesinin pek çok farklı sistem için kritik bir önemi vardır. İyonkürenin sinyaller üzerindeki etkilerinin sebebi yapısındaki serbest elektronlardır. İyonkürede iki nokta arasındaki serbest elektronlara Toplam Elektron İçeriği (TEİ) adı verilir. Bu parametre sayesinde iyonkürenin farklı frekanslardaki sinyalleri nasıl etkileyeceği değerlendirilebilmektedir. Bu tez

kapsamında Eğik Toplam Elektron İçeriği (ETEİ) adı verilen, bir alıcı ve bir uydu arasındaki toplam elektron miktarını ifade eden parametrenin kestirimleri yapılmıştır. Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) sinyalleri kullanılarak bu parametrenin hesaplandığı pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda L1 ve L2 frekanslarındaki YKS sinyalleri kullanılarak bir alıcı istasyonu ve bir YKS uydusu arasındaki ETEİ değerleri kestirilmektedir. Bu çalışmada L5 frekansındaki yeni YKS sinyalleri kullanılarak yeni bir ETEİ kestirim yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem ile farklı alıcı ve farklı uyduların ayrı ayrı sözde menzil ve faz gözlemlerinin kullanıldığı denklem setleri oluşturularak, anlık düşük gürültülü ETEİ kestirimleri, uydu yanlılıkları ve diferansiyel alıcı yanlılıkları kestirimleri yapılabilmektedir. Dünyanın farklı enlem bölgelerindeki alıcılar, farklı uydular ve iyonkürenin pozitif ve negatif bozulmalı ve sakin günleri için yöntem test edilmiştir. Yapılan kestirimlerde elde edilen ETEİ sonuçları IONOLAB-STEÇ yöntemi ile hesaplanan ETEİ sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntem ile karşılaştırıldığında sonuçların genel TEİ görünüşüne uygun olduğu gösterilmiştir. İki yöntem arasındaki farkların, dayanak noktalarının farklı olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu tezde geliştirilen bu yeni yöntem ile L5 frekansındaki YKS sinyallerinin kullanımı ile ETEİ kestirim çalışmalarına yeni bir bakış açısı getirilmiştir, buna ek olarak L5 frekansında uydu yanlılıkları ve L1-L2, L1-L5, L2-L5 frekanslarındaki sinyaller için diferansiyel alıcı yanlılıkları da kestirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), ETEİ, İyonküre, YKS L5 frekansı, Uydu yanlılığı, Diferansiyel alıcı yanlılığı.

ABSTRACT

ESTIMATION OF SLANT TOTAL ELECTRON CONTENT USING NEW GENERATION GLOBAL POSITIONING SYSTEM SIGNALS

Ayşegül OTRAKÇIER

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Cenk TOKER

January 2021, 80 pages

Ionosphere is atmosphere's ionized plasma layer constructed of free ions resulted by the ionization of neutral molecules with the effects of high energy photons radiated from the sun. Ionosphere is a dispersive, nonhomogeneous, time and space dependent complex medium. It is affected by many other phenomenon like the earth's magnetic field and gravity. High frequency (HF) radio waves reflect from ionosphere and satellite signals are refracted at the ionosphere. Therefore, the realization of instant effects of ionosphere on signals is at critical importance for many systems. The ionospheric effects on signals are caused by the free charged particles in the ionosphere. The total free charged ions between two points in ionospheres is called the Total Electron Content (TEC). This parameter is used for defining ionospheric effects on signals with different frequencies. In this thesis study, the total electron content between one Global Positioning System (GPS) receiver and one GPS satellite called Slant

Total Electron Content (STEC) is estimated. GPS signals are used in many different studies. In those studies, the GPS signals with L1 and L2 frequencies are used to estimate STEC between one receiver station and one GPS satellite. In this thesis a new STEC estimation algorithm is proposed which includes new GPS signals with L5 frequency. Using this method separately pseudo range and phase data of different receiver and satellites are composed in equation sets and instantaneous low noise STEC estimations, instantaneous satellite bias estimations and receiver differential coded bias estimations are possible. This method is tested for different receiver stations located on different latitude regions of earth for quiet, positively disturbed and negatively disturbed days of ionosphere. The STEC results are compared with the STEC estimation of IONOLAB-STEC algorithm. The comparisons show results of the developed method is coherent with the TEC profile. The differences with two methods are caused by the usage of different bases. This new method developed in this thesis study proposes a new point of view in the STEC estimation processes by including the GPS signals with L5 frequency. In addition to STEC estimations, the satellite biases in L5 frequency and receiver differential code biases between L1-L2, L1-L5 and L2-L5 frequencies are estimated.

Keywords: Global Positioning System (GPS), STEC, Ionosphere, GPS L5 frequency, Satellite bias, Receiver differential code bias.

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında bana destek olan, çok değerli fikirleri ile yolumu aydınlatan ve hiç bir zaman vazgeçmemem gerektiğini öğreten danışmanım Sayın Prof. Dr. Cenk TOKER'e her őey için en içten teőekkürlerimi sunarım.

Tez savunmamı değerlendiren saygıdeğer jüri üyelerine kıymetli fikirleri için ve jüri başkanım Sayın Prof. Dr. Feza ARIKAN'a vakit ayırarak değerli fikirlerini benimle paylaőtıęı için teőekkürlerimi sunarım.

Tüm başarılarımın mimarı olan sevgili babam TAMER OTRAKÇIER ve her kararında yanımda olan sevgili annem FATMA OTRAKÇIER'e, bana inandıkları için teşekkür ederim. Her zaman size layık bir evlat olma motivasyonu ile daha doğruyu, daha iyiyi aramaya devam edeceğim. Beni cesaretlendiren, bana güvenen, hayattaki en iyi iki dostum olan kardeőlerim MEHMET ALP ve EKREM EMİR'e destekleri için çok teşekkür ederim. Sevgili ailem, sizler olmasaydınız başaramazdım.

Ayőegöl OTRAKÇIER

Ocak 2021, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER.....	vii
ÇİZELGELER.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. İYONKÜRE TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİNİN KESTİRİMİ	8
3. YENİ NESİL YKS SİNYALLERİ İLE ETEİ KESTİRİM YÖNTEMİ	19
3.1. Sözde Menzil Gözlemleri Kullanılarak ETEİ Kestirimi.....	27
3.2. Alıcı ve Uydu Yanlılıklarının Kestirimi	45
3.3. Faz Gözlemleri Kullanılarak ETEİ Kestirimi	46
4. İYONKÜRE ETEİ KESTİRİM ANALİZLERİ	48
5. SONUÇLAR	69
6. YORUM ve GELECEK ÇALIŞMALAR	72
KAYNAKLAR.....	74
EKLER	78
ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİLLER

Şekil 1.1 İyonküre Elektron Yoğunluk Profili [36].....	2
Şekil 1.2. YKS Sinyallerinin Evrimi [12].....	6
Şekil 3.1. İyonküre Katmanları [45]	20
Şekil 3.2. Radyo Dalgalarının Yayılımı [40].....	20
Şekil 3.3. YKS Sinyallerinin Yayılımı	21
Şekil 3.4. 2 Alıcı-3 Uydu YKS ETEİ Kestirim Modeli	41
Şekil 4.1 Orta enlem bölgesi Cebreros istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.....	50
Şekil 4.2. Orta enlem bölgesi Brüksel istasyonu-G10 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü	50
Şekil 4.3. Orta enlem bölgesi Redu istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü	51
Şekil 4.4. Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G32 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.....	51
Şekil 4.5. Yüksek enlem bölgesi Boras istasyonu-G01 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.....	52
Şekil 4.6. Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kiru) istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.....	52
Şekil 4.7. Ekvatorial bölge Kourou (koug) istasyonu-G06 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.....	53
Şekil 4.8. Ekvatorial bölge Kourou (kour) istasyonu-G30 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.....	53
Şekil 4.9. Ekvatorial bölge La Misere istasyonu-G01 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.	54

Şekil 4.10.Yüksek enlem bölgesi Onsala istasyonu-G06 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü	55
Şekil 4.11.Orta enlem bölgesi Cebreros istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü, 4 Mart 2019	56
Şekil 4.12.Orta enlem bölgesi Cebreros istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü, 12 Mart 2020	56
Şekil 4.13.Yüksek enlem bölgesi Onsala istasyonu-G04 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü	57
Şekil 4.14.Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G10 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü	57
Şekil 4.15.Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kiru) istasyonu-G26 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü	58
Şekil 4.16.Ekvatorial bölge La Misere istasyonu-G30 ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü.	58
Şekil 4.17.Yüksek enlem bölgesi Boras istasyonu-G03 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü	59
Şekil 4.18.Yüksek enlem bölgesi Onsala istasyonu-G25 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü	60
Şekil 4.19.Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G32 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü	60
Şekil 4.20.Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kiru) istasyonu-G10 ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü	61
Şekil 4.21.Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kir0) istasyonu-G24 ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü	61
Şekil 4.22.Ekvatorial bölge La Misere istasyonu-G10 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü	62
Şekil 4.23.Orta enlem bölgesi Cebreros istasyonu-G08 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.	63

Şekil 4.24.Yüksek enlem bölgesi Boras istasyonu-G01 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.	64
Şekil 4.25.Ekvatorial bölge Pointe Laure istasyonu-G01 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü.	64
Şekil 4.26.Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G08 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü ...	65
Şekil 4.27.Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kir0) istasyonu-G03 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü ...	66
Şekil 4.28.Yüksek enlem bölgesi Kourou (koug) istasyonu-G03 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü ...	66
Şekil 4.29.Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G10 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü.....	67
Şekil 4.30.Yüksek enlem bölgesi Onsala istasyonu-G01 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü.....	68
Şekil 4.31.Ekvatorial bölge Pointe Laure istasyonu-G08 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü.....	68
Şekil Ek 1.2019 yılı Şubat ve Mart ayları için kp ve Dst indeksi, [48, 49].....	78
Şekil Ek 2.2020 yılı Ocak ve Şubat ayları için kp ve Dst indeksi, [48, 49].....	78
Şekil Ek 3.2019 yılı Eylül ayı ve 2020 yılı Mart ayı için kp ve Dst indeksi, [48,49]	79

ÇİZELGELER

Çizelge 3.1.L1 ve L2 sinyalleri için alıcı-uydu kombinasyonları.....	29
Çizelge 3.2.L1, L2 ve L5 sinyalleri için alıcı-uydu kombinasyonları.....	32
Çizelge 3.3.L1, L2 ve L5 sinyalleri için CODE diferansiyel uydu yanlılıklarının kullanıldığı alıcı-uydu kombinasyonları.....	32
Çizelge 3.4.L1, L2 ve L5 sinyalleri için CODE diferansiyel uydu yanlılıklarının ve farklı zamanlardaki gözlemlerin kullanıldığı alıcı-uydu kombinasyonları	33
Çizelge 3.5.L1, L2 ve L5 sinyalleri için diferansiyel alıcı-uydu yanlılıklarının tanımlandığı alıcı-uydu kombinasyonları	34
Çizelge 3.6.L1, L2 ve L5 sinyalleri için 1 alıcı yanlılığının ve CODE diferansiyel uydu yanlılıklarının bilindiği varsayılan alıcı-uydu kombinasyonları	37
Çizelge 3.7.RINEX 3.03 C2L-C1W, C5Q-C1W ve C5Q-C2W sinyal gözlemleri için alıcı-uydu kombinasyonları	40
Çizelge 4.1.Analizlerde kullanılan YKS alıcıları.....	49
Çizelge 4.2.Alıcı analiz setleri	49
Çizelge 4.3.İyonkürenin sakin günleri için ETEİ kestirimlerinin IONOLAB- STEC ile farklılıkları.....	55
Çizelge 4.4.İyonkürenin pozitif bozulmalı günleri için ETEİ kestirimlerinin IONOLAB-STEC ile farklılıkları	59
Çizelge 4.5.İyonkürenin negatif bozulmalı günleri için ETEİ kestirimlerinin IONOLAB-STEC ile farklılıkları	62

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

ϵ_u	YKS alıcı yanlılığı
ϵ^m	YKS uydu yanlılığı

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
C/A	Coarse Acquisition
CNAV	Civil Navigation
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
DTEİ	Dik Toplam Elektron İçeriği
ETEİ	Eğik Toplam Elektron İçeriği
GIM	Global Ionosphere Map
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IGS	International GNSS Service
IONEX	Ionosphere Map Exchange Format
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KD	Kısa Dalga
LNAV	Legacy Navigation
PPP	Precise Point Positioning
RINEX	Receiver Independent Exchange
SINEX	Solution Independent Exchange
STEC	Slant Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
TEİ	Toplam Elektron İçeriği
YKS	Yerküresel Konumlama Sistemi

1. GİRİŞ

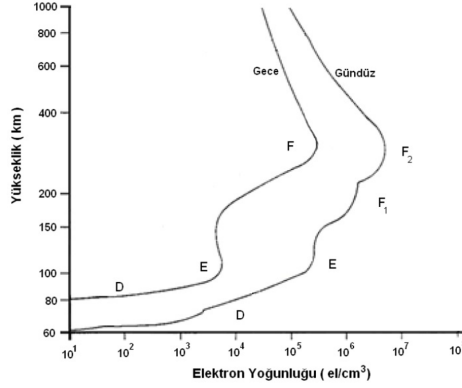
İyonküre, güneşten gelen yüksek enerjili mor ötesi ve x-ışınlarının nötr molekül ve atomları iyonlaştırması sonucu meydana gelen serbest yüklü parçacıkların oluşturduğu iyonize plazma yapısındaki havaküre tabakasıdır [1]. İyonküre dünyadan 50-1000 km yüksekliktedir, uzay ve zamana bağlı olarak yerçekimi, dünyanın manyetik alanı, güneş aktiviteleri, sismik hareketlilikler gibi pek çok olgudan etkilenir, bu sebeple de çok karmaşık bir yapıya sahiptir [2]. Serbest elektron yoğunluğuna göre iyonküre 5 bağımsız katmanda incelenir. [3]'te iyonkürenin 50-80 km arasındaki bölgesi D katmanı, 80-130 km arasındaki bölgesi E katmanı, 150 km ve üstündeki bölgesi de F katmanı olarak adlandırılır. F katmanının da 130 km'den 200-250 km'ye kadar olan bölge için F1, 250 km ve üstündeki bölge için de F2 olarak 2 ayrı katmana ayrıldığı varsayılır [3].

Güneşin, yaydığı foton enerjileri ile dünya üzerinde büyük etkisi vardır. Güneşin yaydığı enerji, fotonların dalga boyuna ve miktarına bağlı olarak değişir [4]. Güneşten gelen yüksek enerjili ışınların miktarı 11 yıllık güneş çevrimlerine göre değişiklik gösterir [1]. Güneşin yaydığı enerjinin büyük bir kısmı 400-800 nm dalga boyundaki fotonlar aracılığıyla iletilir [4]. Bu fotonların dalga boyu 11 yıllık güneş çevriminde yaklaşık %0.1'lik değişimlere uğrar, 120-400 nm dalga boyundaki mor ötesi fotonların güneş çevriminde değişimi ise %15 civarındadır [4]. Güneşin etkilerinin yanı sıra enerjili yüklü parçacıklar ve kozmik ışınlar da iyonküredeki iyonlaşmayı etkiler [1].

İyonkürenin karakteristiğinin modellenmesi için Toplam Elektron İçeriği (TEİ) parametresi, kesit alanı 1 m^2 olan silindir içindeki toplam serbest elektron miktarı olarak tanımlanmıştır; TEİ birimi TECU'dur ve $1 \text{ TECU } 10^{16} \text{ el/m}^2$ 'dir [2]. İyonkürenin TEİ değeri mor ötesi ışınların yayılımı, jeomanyetik fırtınalar ve alçak atmosferdeki dalgaların yukarı doğru yayılmasından etkilenir. Bu sebeple TEİ yerel zamana, enlem ve boylam koordinatlarına, mevsime, güneş çevrimi ve aktivitesine, jeomanyetik koşullara ve troposferdeki değişikliklere bağlı olarak değişir [4].

İyonkürenin günlük elektron yoğunluk profili tipik olarak Şekil 1.1'de görüldüğü

gibidir. İyonkürede kırılan ve iyonküreden yansıyan radyo dalgaları iyonkürenin elektron yoğunluğundan büyük ölçüde etkilenir.



Şekil 1.1: İyonküre Elektron Yoğunluk Profili [36]

Kısa Dalga (KD) olarak adlandırılan 1-30 MHz frekansındaki radyo sinyalleri iyonkürenin yapısından ve elektron yoğunluğundan büyük ölçüde etkilenir [6]. KD sinyalleri amatör radyo işletmelerinden donanmalara, ticari uçaklardan uzun menzilli ufukötesi radarlara kadar pek çok farklı kullanım alanına sahiptir. Güneşten gelen x-ışınları iyonkürenin alt tabakasındaki havaküreyi iyonize ederek genişletilmiş bir iyonküre D tabakası oluşturur [6]. Bu tabaka bazı frekanslardaki radyo dalgaları için yansıtıcı gibi davranırken, belli frekanslardaki radyo dalgaları için de soğurucu gibi davranır. Güneşin etkisini en çok gösterdiği, güneş ışınlarının dik olarak dünyaya geldiği saatlerde KD haberleşmelerinde iyonküre kaynaklı kesintiler meydana gelebilir [6].

Jeomanyetik fırtınalar iyonkürede büyük değişimlere sebep olabilir. Bu fırtınalar sırasında iyonküredeki akımlar ve yüksek enerjili parçacıklar ısı enerjisi oluşturarak üst havaküredeki yoğunluğu ve dağılımı değiştirir [7]. Jeomanyetik fırtınalarda oluşan manyetik akı, şehir şebekelerindeki güç aktarımı yapan sistemlerde akım indüklenmesine sebep olur [7]. Bu akımlar sebebi ile elektrik trafolarında bozulmalar meydana gelir, güç aktarım ve haberleşme ağları bu akımlardan etkilenir. Jeomanyetik fırtınalar her ne kadar görülmeye değer aurora ışıkları oluşturuyorsa da şehir elektriklerinin kesilmesi gibi büyük çaplı sorunlara yol açabilir.

Seyrüsefer konumlama sistemleri, YKS alıcılarının hareketli araçlara ve cep telefonlarına kadar indirgenmesi sonucu yaygın olarak pek çok alanda kullanılmaktadır. Alıcı konumunun belirlenmesinde doğruluğun ve kesinliğin artırılması için bir çok çalışma yapılmakta ve teknolojik gelişmelerle bu sistemler hızla iyileşmektedir. Yüksek keskinlikte çift frekanslı Yerküresel Konumlama Sistemi alıcıları; tarım, inşaat, keşif ve araştırma, kar küreme, finans uygulamaları, haberleşme, halk sağlığı takibi gibi sosyal hayatı doğrudan etkileyen daha pek çok alanda kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra sivil havacılıkta, denizcilikte ve askeri alanlarda da seyrüsefer konumlama sistemlerinin bir çok farklı uygulaması mevcuttur.

Alıcıdan iletilen radyo sinyalleri YKS uydusuna ulaşabilmek için iyonküreden geçmek zorundadır. İyonkürenin yapısındaki yüklü parçacıkların oluşturduğu plazma sebebi ile YKS sinyalleri frekansa bağlı olarak iyonkürede kırılmaya uğrar [5]. Bunun sonucunda da iyonkürenin TEİ miktarına bağlı olarak sinyaller üzerinde gecikme etkisi olur. Uydu tabanlı seyrüsefer sistemlerinde konum belirlemek için kullanılan radyo dalgasının iyonkürede izlediği yoldaki TEİ miktarı ve dalganın hızı, sistemin konum belirleme keskinliği üzerinde kritik etkilere sahiptir. Konum belirleme sistemlerinde iyonküre TEİ değişikliklerini yok saymak onlarca metrelik hatalara sebep olabilir [4].

YKS, konum belirleme operasyonları için tek frekanslı alıcılar kullanılırken, iyonküre gecikmelerini deneysel Klobuchar modelleme yöntemi ile hesaba katarak konum belirlemektedir [4]. İyonkürenin sakin günlerinde tek frekanslı YKS, konum bilgilerini 1 metre altında hata ile sağlarken, iyonkürenin fırtınalı olduğu günlerde konumlama hataları onlarca metreye ulaşmaktadır [8]. Çift frekanslı YKS alıcılarında bu sinyallerdeki sözde menzil gözlem farkları kullanılarak iyonkürenin sinyal üzerindeki etkisi daha gerçeğe yakın modellenir ve bu etki konum belirleme sırasında hesaba katılır. Bu sayede konumlama hataları bir kaç santimetreye kadar indirilebilmektedir.

İyonkürenin yüksek bozulmalı günlerinde YKS alıcılarının bir uyduya kilitlemesi zorlaşır, bu da YKS'nin yanlış konum bilgisi hesaplaması ile sonuçlanır [8]. Je-

omanyetik fırtınalar da iyonkürede çok yüksek bozulmalara sebep olur. Jeomanyetik fırtınalar sırasında açığa çıkan elektrik akımı ve yüksek enerji, iyonküredeki serbest elektron miktarını arttırarak Toplam Elektron İçeriği'ini yükseltir. Jeomanyetik fırtınalar alçak dünya yörüngeli uydular üzerinde ekstra sürüklenme kuvveti oluşturarak YKS alıcı-uydu bağlantılarında kopmalara sebep olur [7]. YKS'nin bu fırtınalar sırasında iyonküreyi doğru şekilde modelleyememesi ve alıcı-uydu bağlantısının sorunsuz sağlanamamasının sonucu olarak konum belirlemede çok yüksek hatalar ile karşılaşılabilir. Yüksek enlem bölgeleri jeomanyetik fırtına etkilerine, diğer enlem bölgelerine göre, daha yüksek oranda maruz kalır.

Dünyanın manyetik ekvatoru çevresindeki elektrik alan değişimleri iyonkürede kararsız bir yapı oluşmasına sebep olur [8]. Özellikle günbatımından hemen sonra bu etki daha da belirgindir. Onlarca kilometreyi kapsayan bu kararsız yapı YKS sinyalleri üzerinde saçılım etkisi yaratır [8]. Bu saçılımlar dünyanın gündüz-gece geçişlerinin doğal bir parçasıdır. İyonküre saçılımları ekvator çevresindeki YKS alıcıları ile uydular arasındaki bağlantılarda kopmalara yol açar [8].

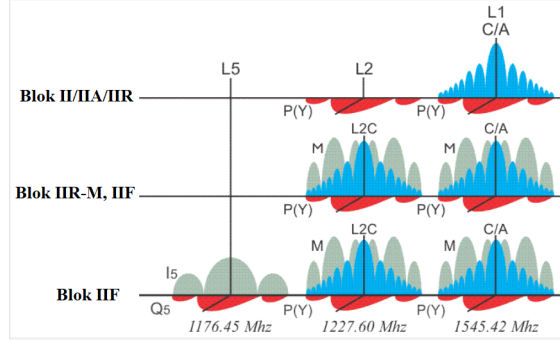
İyonküre; radyo haberleşmelerini, seyrüsefer uygulamalarını ve uydu haberleşmelerini doğrudan etkilediği için uzun yıllardır bilimsel araştırmaların odağında olmuştur. İyonküre TEİ kestirimleri için pek çok çalışmada Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) kullanılmıştır. Dünya üzerinde geniş bir YKS alıcı ağı mevcuttur. Bu alıcı ağındaki gözlemlere CODE, IGS, JPL gibi internet servisleri aracılığı ile ulaşılabilmektedir. Geniş çaplı bir YKS gözlem veri tabanına ulaşmak düşük maliyetli ve kolaydır. Bu sebeplerle iyonkürenin davranışlarını analiz etmek için literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak YKS sinyalleri kullanılmaktadır.

Yerküresel Konumlama Sistemi, uzay tabanlı bir seyrüsefer uydu sistemidir. 1978 yılında ABD hava kuvvetlerince geliştirilen ilk deneysel Blok I YKS uydusu uzaya fırlatılmıştır [9]. 1983'te bir yolcu uçağının yasaklı askeri bölgeye girmesi sebebi ile düşürülmesi üzerine, geliştirilen YKS'nin sivil kullanımlara açılması kararı alınmıştır [9]. İlk modern Blok II YKS uydusu 1989'da uzaya fırlatılmıştır. Bu YKS uyduları L bantta L1, 1575.42 MHz ve L2, 1227.60 MHz iki kanal üzerinden veri

iletimi yapmaktadır [9]. Blok II sistemlerinde ilk aşamada Blok IIA ve Blok IIR uydularında sivil kullanım için L1 frekansında C/A (coarse acquisition) kodlu YKS sinyali mevcutken; askeri kullanım için L1 ve L2 frekanslarında P(Y) (precise) kodlu sinyaller kullanılmıştır [10].

Blok IIR-M uydularına sivil kullanım için L2 frekansında C/A kodlu L2C sinyali eklenmiştir [10]. L2C sinyali çift frekanslı YKS alıcılarında L1 frekansındaki C/A kodlu sinyalle birlikte kullanılarak, iyonküre düzeltmelerinin hesaba katılmasına olanak sağlar [11]. C/A kodlu L1 ve L2C sinyallerini birlikte kullanabilen çift frekanslı sivil YKS alıcıları, askeri sinyallerin doğruluğunda YKS performansına erişebilmektedir [11]. Blok IIR-M programı ile L2C sinyalinin sivil kullanıma açılmasına ek olarak karıştırmaya dayanıklılığı artırılmış M-kodlu yeni sinyaller de askeri kullanıma açılmıştır [10]. Blok IIR-M uyduları 2005-2009 yılları arasında uzaya fırlatılmıştır [10].

2010-2016 yıllarında uzaya fırlatılan Blok IIF uydularına Blok IIR-M uydularındaki sinyallere ek olarak L5, 1176.45 MHz frekansında 3. sivil YKS sinyali dahil edilmiştir [10]. L5 sinyali yüksek performanslı uygulamaların can güvenliği gereksinimlerini karşılayabilmek için geliştirilmiştir [10]. Bu sinyalin özellikle havacılık emniyet servis yayınlarında kullanılması amaçlanmıştır bunun yanı sıra havayolu, demiryolu, denizyolu ve otoyollarda kapasite ve yakıt verimliliğini arttırmak için de kullanılmaktadır [10]. L5 sinyali önceki YKS sinyallerine oranla daha yüksek iletim gücü ve büyük bant açıklığı sunan en gelişmiş tasarıma sahip YKS sinyalidir [10]. Şekil 1.2'de YKS sinyallerinin gelişimi görülmektedir.



Şekil 1.2: YKS Sinyallerinin Evrimi [12]

L1 ve L2 frekanslarındaki YKS sinyallerinde LNAV seyrüsefer verisi, uzay aracı efemeris bilgisi, sistem zamanı, durum mesajları ve C/A'dan P koda geçiş bilgisi gibi verileri içermektedir ve saniyede 50 bitlik modülasyon ile iletilir. Blok IIR-M ve Blok IIF uyduları için CNAV sivil seyrüsefer verisi de benzer bilgileri içerirken saniyede 25 bitlik veri hızıyla iletilmektedir. L1 ve L2 sinyallerini kullanan YKS alıcılarında iyonküre düzeltmesi, T_{GD} , [13]'te P(Y) kodlu L1 ve L2 sinyallerinin grup gecikme farkı kullanılarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$T_{GD} = \frac{1}{1 - \gamma} (t_{L1P(Y)} - t_{L2P(Y)}) \quad (1.1)$$

$$\gamma = (f_{L1} - f_{L2})^2 \quad (1.2)$$

Alıcının sözde menzil gözlemleri, $PR_{L1P(Y)}$ ve $PR_{L2P(Y)}$ kullanılarak düzeltilmiş sözde menzil, PR hesaplanmaktadır.

$$PR = \frac{PR_{L2P(Y)} - \gamma PR_{L1P(Y)}}{1 - \gamma} \quad (1.3)$$

Eşitlik 1.1'de tanımlanan iyonküre düzeltmesi kullanılarak C/A kodlu L1 sinyali ve eş fazlı L5I sinyali arasındaki düzeltilmiş sözde menzil [14]'te tanımlanmıştır.

$$PR = \frac{PR_{L5I5} - \gamma_{15} PR_{L1C/A} + c(ISC_{L5I5} - \gamma_{15} ISC_{L1C/A})}{1 - \gamma_{15}} - cT_{GD} \quad (1.4)$$

$$ISC_{L5I5} = t_{L1P(Y)} - t_{L5I5} \quad (1.5)$$

Benzer şekilde C/A kodlu L1 sinyali ile dört evreli L5Q sinyali arasında, L2C ile L5I sinyali arasında ve L2C ile L5Q sinyali arasında da düzeltilmiş sözde menzil tanımları yapılmıştır [14].

İyonkürenin karmaşık yapısının haberleşme, konumlama ve uydu sistemleri üzerindeki etkisinin kritikliği göz önünde bulundurulduğunda gerçek zamanlı TEİ kestirimleri büyük önem kazanmaktadır. YKS sinyallerinin kullanıldığı TEİ kestirimleri bir çok bilimsel çalışmada yer almıştır. Bugüne kadar yapılan YKS gözlemleri ile TEİ kestirimlerinde L1 ve L2 frekansındaki YKS sinyalleri kullanılmıştır. Gelişen teknolojiler aracılığı ile bugün YKS'nin sivil L5 gözlemlerine de ulaşılabilir. Bu tez kapsamında literatürdeki L1 ve L2 gözlemlerinin kullanıldığı TEİ kestirim yöntemlerine yeni L5 gözleminin dahil edildiği bir algoritma geliştirilmiştir.

2. İYONKÜRE TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİNİN KESTİRİMİ

Toplam Elektron İçeriği kestirimleri, yıllardır pek çok araştırma ile çalışılmıştır. Bu tez kapsamında literatürde bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar detaylı incelenmiştir. Her ne kadar Yerküresel Konumlama Sistemleri TEİ kestirimleri için yaygın olarak kullanılmışsa da, bu çalışmalarda L1 ve L2 frekanslarındaki gözlemler üzerinden ilerlenmiştir. YKS'nin L5 frekansındaki gözlemlerini TEİ kestirimleri için kullanan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

[15]'te International GPS Service for Geodynamics (IGS) ağında bulunan 6 Avrupa istasyonu bölgesel TEİ hesaplamaları için kullanılmıştır. İkili YKS frekanslarının kullanımı ile neredeyse tüm iyonküre etkilerini elimine ederek TEİ kestirimi yapmak mümkündür. Bunun için yeryüzündeki sabit YKS alıcı ağlarından alınan gözlemler kullanılır. [15]'te yapılan çalışmada kullanılmış olan faz seviyelendirme yönteminde L1 ve L2 faz gözlemlerinin farkı kullanılır. Sözde menzil gözlemleri ile faz gözlemlerinde mevcut olan ilk faz belirsizliğine ve faz kopmalarına karşılık gelen bir sabit hesaplanır [15]. [15]'teki bu çalışmada kalibre edilmiş alıcı yanlılıkları kullanılmamış, onun yerine alıcı ve uydu için birleştirilmiş bir yanlılık kestirimi yapılmıştır. Madrid istasyonu, farklı çalışmalarda da kullanıldığı için, bu çalışmadaki diğer alıcı-uydu yanlılık kestirimleri için referans olarak alınmıştır [15].

[15]'te farklı yükselme açılarının ve iyonküre kabuk yüksekliğinin, TEİ ve alıcı-uydu yanlılık kestirimi üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. 15, 20 ve 25 derece yükselme açılarındaki uydular için TEİ hesaplamaları yapıldığında, 15-25 dereceler arasındaki tepeden tepeye değerlerinin değişimlerinin 20-25 derece için olanlardan daha yüksek olduğu belirtilmiştir [15]. Tek kabuklu iyonküre modeli kullanılarak TEİ kestirimleri yapılırken, iyonküre kabuk yüksekliğinin International Reference Ionosphere 1990 (IRI90) modeli kullanılarak 300, 350 ve 400 km olarak belirlendiği durumlar için TEİ kestirimleri yapılmıştır [15]. TEİ üzerinde farklı uydu yükselme açılarının 2 TECU, farklı iyonküre kabuk yüksekliklerinin 2 TECU etkisi olduğuna ulaşılmıştır [15]. Bu sonuçlar IRI90 modeli ile karşılaştırılmıştır ve iyonkürenin sakin olduğu günler için benzer sonuçlara ulaşılmıştır [15]. Alıcı-uydu yanlılıkları kestiriminde ise farklı uydu yükselme açılarının hesaplamalar üzerinde

yüksek bir etkisi olmadığı, farklı iyonküre kabuk yüksekliklerinin ise bu yanlılıkları yok sayılamayacak seviyede düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır [15].

[16]'daki makalede 2 adımdan oluşan Düzgünleştirilmiş TEİ kestirim algoritması önerilmektedir. Algoritmanın ilk adımı hatayı minimize etmek için yüksek geçirgenli bir ceza fonksiyonu uygulamasıdır. İkinci adımı ise 30 saniye çözünürlükte 24-saatlik kestirilen Dik TEİ (DTEİ) değerlerinin pürüzlerini ortadan kaldırmak için bir kayan pencere medyan filtre uygulamasını içerir [16].

Öncelikle [16]'daki algoritmanın 3 parametresi düzeltme parametresi ($\mu = 0.1$), sınır frekansı ($k_c = 8$) ve kayan pencere filtre uzunluğu ($N_f = 85$) optimum şekilde belirlenmiş, daha sonra bu seçilen parametreler kullanılarak TEİ kestirim algoritması belirli günlerde, belirli alıcı istasyonlarından alınan gözlemlere uygulanmıştır. İyonkürede 23 Nisan 2011 negatif bozulmanın olduğu, 28 Nisan 2011 pozitif bozulmanın olduğu günler olduğu için [16]'daki hesaplamalarda 23-28 Nisan 2011 haftası kullanılmıştır. Alıcı istasyonları da aynı zaman diliminde olan ve birbirlerine yaklaşık olarak eşit enlemsel uzaklıklarda olan istasyonlar olacak şekilde seçilmiştir [16]. Hesaplanan TEİ değerleri internette mevcut olan diğer modellerle karşılaştırılmıştır. Önerilen algoritmanın hem sakin hem de bozulmalı günler için çok başarılı TEİ kestirimleri ürettiği görülmüştür [16].

Düzgünleştirilmiş TEİ algoritmasında bir YKS istasyonu üzerindeki 24 saatlik Dik TEİ kestirimi yapılabilmektedir [16]. [17]'de anlatılan çalışmada bu algoritma geliştirilmiştir. [17]'deki çalışmada 24 saatlik dönemde istenilen herhangi bir zaman aralığı için Dik TEİ kestirimi yapacak bir algoritma önerilmiştir. Kestirim yapılabilecek minimum zaman aralığı 1 saattir, hesaplamalar 30 saniye çözünürlüğe sahiptir [17]. Geliştirilen bu algoritmanın iyonküredeki keskin ve ani zamansal TEİ değişimlerini oldukça doğru yansıttığı belirtilmiştir [17].

Düzgünleştirilmiş TEİ algoritmasında yalnızca sözde menzil gözlemleri girdi olarak kullanılırken, [18]'de faz-düzeltilmiş dik TEİ kestiriminin, [16, 17] algoritma girdisi olarak kullanılma tekniği geliştirilmiştir.

[18]'de sözde menzil ve faz-düzeltilmiş TEİ değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiş ancak faz-düzeltilmiş TEİ kestirimlerinin daha az gürültü içerdiği belirtilmiştir. Cihaz yanlılıklarının en doğru şekilde algoritmaya eklenme yöntemi, literatürdeki farklı yöntemlerin ayrı ayrı Düzgünleştirilmiş TEİ algoritmasına uygulanması ile çalışılmıştır [18]. Bu detaylı çalışmaların, [18] sonucunda alıcı ve uydu yanlılıkları eğik TEİ hesaplanırken eklenecek şekilde algoritma güncellenmiştir. Tek Katmanlı İyonküre Modeli'ndeki (TKİM) iyonküre kabuk yüksekliğinin Düzgünleştirilmiş TEİ kestirimlerine etkileri incelenmiş ve algoritmanın iyonküre kabuk yüksekliği değişimlerine dirençli olduğu ortaya konmuştur [18]. Geliştirilmiş Düzgünleştirilmiş TEİ algoritmasının iyonkürenin sakin veya bozulmalı olmasından bağımsız, tüm enlemlerde TEİ kestirimleri için kullanılabilmesi ve Düzgünleştirilmiş TEİ kestirimlerinin IGS analiz merkezinin yayınladığı TEİ kestirimleri ile mükemmel bir uyum içinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır [18].

[19]'daki çalışmada Düzgünleştirilmiş TEİ algoritmasındaki iyonküre kabuk yüksekliği, izdüşüm ağırlıklandırma fonksiyonu ve alıcı-uydu yanlılıkları gibi önemli parametreler incelenmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar doğrultusunda Düzgünleştirilmiş TEİ algoritması geliştirilmiştir [19]. Faz-düzeltilmiş TEİ yöntemi Düzgünleştirilmiş TEİ algoritmasına alternatif olarak geliştirilmiş ve bu geliştirilen yeni yöntem IONOLAB-TEC yöntemi olarak adlandırılmıştır [19]. İncelenen parametrelerin farklı değerleri CODE, JPL analiz merkezleri ile karşılaştırılmış en benzer sonuç verenler IONOLAB-TEC yönteminde kullanılmıştır [19].

İyonlaşmanın en yüksek olduğu iyonküre kabuk yüksekliği TEİ kestirimleri için önemli bir parametredir. [19]'da IONOLAB-TEC yönteminin güvenilir TEİ kestirimleri sağladığı ve bu kestirimlerin iyonküre kabuk yüksekliğindeki değişimlere dirençli olduğu gösterilmektedir.

Düşük uydu yükselme açılarından gelen sinyaller çok yol etkisine maruz kaldığı için bozulmaya uğrar [19]. [19]'daki çalışmada iyonküreden kaynaklanmayan gürültüleri en aza indirmek için optimum ağırlıklandırma fonksiyonu geliştirilmiştir.

Sözde menzil gözlemleri kullanılarak elde edilen mutlak TEİ kestirimleri veya faz düzeltilmiş düşük gürültülü TEİ kestirimleri IONOLAB-TEC yöntemine girdi olabilir [19].

Bir diğer önemli parametre olan ve çeşitli uzay havası analiz merkezlerinin internet servislerince yayınlanan alıcı-uydu yanlılıklarının TEİ hesaplamalarına nasıl ekleneceği de farklı çalışmaların tartışma konusudur. IONOLAB-TEC algoritmasında alıcı ve uydu yanlılıklarının ETEİ hesaplamaları sırasında eklenme yöntemi izlenmiştir [19]. IONOLAB-TEC yönteminin alıcı-uydu yanlılıklarını TEİ kestirimine ekleme yöntemi ile hesaplanan TEİ sonuçlarının IGS analiz merkezinin kestirimleri ile uyumlu olduğu gösterilmiştir [19].

İyonkürenin anlık TEİ kestirimi KD haberleşme menzilin hesaplanmasında ve seçilecek haberleşme frekansının seçilmesinde büyük önem taşır. IONOLAB-TEC ile DTEİ kestirim yöntemi [20, 21] çalışmalarında kullanıcı dostu bir yazılım haline getirilmiştir. [20]'deki çalışmada IONOLAB-BIAS yönteminin Düzgünleştirilmiş TEİ algoritmasında kullanılması ile elde edilen IONOLAB-TEC yöntemi kullanılarak, kullanıcılara otomatik TEİ hesaplaması yapan internet tabanlı bir uygulama geliştirilmiştir. TEİ hesaplamaları için YKS sözde menzil gözlemleri, faz gözlemleri, alıcı yanlılıkları, YKS uydularının yükselme açıları ve uydu yanlılıklarına ihtiyaç vardır [20]. Bu girdiler için IGS analiz merkezinin YKS alıcı ağının RINEX formatındaki verileri kullanılmaktadır [20]. Sözde menzil ve faz verileri günlük olarak 30 saniyelik periyotlarla yayınlanır. Uydu yükselme açılarını elde etmek için de IGS veri merkezinin SP3 formatındaki yayınları kullanılmıştır [20]. Alıcı ve uydu diferansiyel yanlılıkları da aylık olarak yayınlanmaktadır.

[20] ve [21]'deki makalelerde anlatılan TEİ hesaplama uygulamasında kullanıcının seçtiği tarih, alıcı ve zaman parametrelerine göre gerekli veriler internet servislerinden otomatik olarak indirilir. Bu verilere IONOLAB-TEC yöntemi uygulanarak ETEİ, DTEİ hesaplamaları gerçekleştirilir [20, 21]. Sonuçlar kullanıcı arayüzünde kullanıcıya sunulur. Uygulama aynı zamanda IGS analiz merkezinin IONEX formatında yayınladığı iyonküre haritalarını da internet üzerinden indirerek

kullanıcının seçtiği alıcı için TEİ kestirimlerini kullanıcı arayüzünde gösterir [20]. Geliştirilen uygulama internet tabanlıdır, kullanıcı sağlayıcılarında çalışır. İnternet tarayıcıları üzerinden www.ionolab.org adresinden uygulamaya ulaşılabilmektedir [20, 21, 47].

[22]'de faz seviyelendirmesi yöntemi ile TEİ kestirimi yapılmıştır. Düşük uydu yükseklik açılarındaki karşılaşılan çok yol etkilerini azaltmak amacı ile kaydırılmış faz seviyelendirme yöntemi uygulanmıştır. L1, L2 frekansındaki YKS gözlemlerinin birinci dereceden doğrusal kombinasyonu kullanılarak iyonküre kaynaklı gecikmeler elimine edilmiştir [22].

P_1 ve P_2 sözde menzil gözlem farkları kullanılarak aşağıdaki ETEİ kestirim yöntemi kullanılmıştır [22].

$$TEC_s = \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (P_1 - P_2) \quad (2.1)$$

L_1 ve L_2 faz gözlem farkları kullanılarak aşağıdaki ETEİ kestirim yöntemi kullanılmıştır [22].

$$TEC_{sPH} = \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (L_1 - L_2) \quad (2.2)$$

Kaydırılmış seviyelendirme denklemi için Eş. 2.3'teki yöntem kullanılmıştır.

$$sLev = (L_1 - L_2) + [(P_2 - P_1) - (L_1 - L_2)] \quad (2.3)$$

Elde edilen faz gözlem farkları diferansiyel grup gecikmesi eğrisine sığdırılarak, düşük uydu yükselme açısı kaynaklı çok yol etkisi ve diferansiyel grup gecikme verisi TEİ kestiriminden çıkarılmıştır [22].

[23]'teki çalışmada TEİ tahminleri için Least Squares Harmonic Estimation (LSHE) yöntemi kullanılmıştır. Bu makalede önerilen TEİ kestiriminin Klobuchar yön-

teminin iyileştirilmesi veya geliştirilmesi olarak görülebileceği ancak önerilen yöntemin kısa zaman aralıklarında yapılan TEİ kestirimlerinde etkili olduğu ifade edilmiştir [23].

[2]'de YKS tabanlı ve model tabanlı ETEİ hesaplamaları arasındaki ilişkiyi incelemek amacı ile Simetrik Kullback Leibler Mesafesi (SKLD), Uzaklık Metriği (L2N) ve Çapraz İlinti Katsayısı, Burg Entropi ve Dual Bit Entropi karşılaştırma yöntemleri, İyonkürenin 2011 yılındaki sakin ve bozulmalı günlerinde elde edilen ETEİ verilerine uygulanmıştır. İONOLAB grup tarafından geliştirilen İONOLAB-BIAS yöntemi ile elde edilen alıcı yanlılıklarının YKS gözlemlerinin faz seviyelendirilmiş modelleri ile birlikte kullanıldığı ETEİ hesaplamalarını içeren yöntem İONOLAB-STEÇ algoritmasıdır [19, 24].

[25]'teki çalışmada İRI-Plas-STEÇ ile elde edilen model tabanlı ETEİ ile İONOLAB-STEÇ algoritması kullanılarak elde edilen ölçüm tabanlı ETEİ verileri arasındaki ilişki incelenmiştir. İyonkürenin bozulmalı ve sakin günlerinde farklı alıcı ve uydular kullanılarak [19]'daki İONOLAB-STEÇ ve İRI-Plas-STEÇ yöntemleri ile yapılan hesaplamalar incelenmiştir [25]. Bu incelemeler ile İyonkürenin sakin günlerinde ETEİ grafiklerinin benzer, pozitif bozulmalı günlerinde ETEİ grafiklerinin şekil ve ETEİ büyüklüğü açısından farklı, negatif bozulmanın olduğu günlerde ise ETEİ grafiklerinin şekil açısından benzer ancak ETEİ büyüklüklerinin farklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [25].

2011 yılı boyunca referans alıcılar için en küçük kareler yöntemi ile kestirilen ETEİ değerlerinden alıcı yanlılıkları hesaplanmıştır [25]. Bu yanlılıklar [24]'teki İONOLAB-BIAS yöntemi ile elde edilen alıcı yanlılık değerleri ile karşılaştırılmış ve değerlerin tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sözde menzil gözlemleri kullanılarak faz gözlemlerindeki ilk faz belirsizliğinin kestirildiği seviyelendirilmiş faz yöntemi ile ETEİ hesaplamalarında seviyelendirme işlemindeki hatalardan dolayı performans düşüklüğü olduğu [26]'da belirtilmiştir. Bu hataları azaltmak amacı ile [26]'daki çalışmada seviyelendirilmiş faz gözlem-

lerine hassas nokta konumlama (PPP) yöntemi uygulanarak ETEİ ve alıcı yanlılık değerleri kestirilmiştir. Seviyelendirilmiş faz yöntemi ile çıkarılan iyonküre parametrelerine birleştirilmemiş hassas nokta konumlandırması uygulanarak, 8 alıcı istasyon grubu için GIM kestirimleri yapılmıştır [26].

CCL, PPP-float ve PPP-AR yöntemleri ile iyonküre parametreleri kestirilmiş ve iyonküre haritaları oluşturulmuştur ve bu iyonküre haritaları CODE'nin yayınladığı GIM'ler ile karşılaştırılmıştır. Gerçek zamanlı iyonküre faz bilinmezliği kestirimleri konusunda PPP yönteminin etkili bir araç olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [26].

Tek frekanslı GNSS sinyal operasyonlarındaki en büyük gecikme iyonküreden kaynaklanmaktadır. L1 YKS sinyali için iyonküre gecikmesi kaynaklı yol hassaslığı 1 TECU için 0.162 metredir [27]. [27]'de GNSS sinyallerinin iyonküre plazmada kırılmasının elektron yoğunluğu ile orantılı, sinyal frekansının karesi ile ters orantılı olduğu yaklaşımından yola çıkılarak farklı frekanslardaki eş zamanlı GNSS gözlemleri kullanılarak; alıcı-uydu arasındaki ETEİ kestirimleri yapılabileceği ifade edilmiştir. Sözde menzil gözlemlerinin faz gözlemlerine göre yaklaşık 100 kat daha gürültülü olması ve faz gözlemlerinin de ilk faz belirsizliği barındırması sebebi ile bu iki gözlemin birlikte kullanıldığı seviyelendirilmiş faz gözlemleri ile TEİ kestirimi yapılmaktadır. [27]'de seviyelendirilmiş faz gözlemlerinin sistematik hatalarını azaltmak için birbirlerine birkaç metre uzaklıktaki YKS alıcılarının gözlemleri kullanılarak hesaplanan ETEİ değerlerinin eşit olacağı varsayımı kullanılmıştır. Bu şekilde yakın iki alıcının aynı uyduyu kullandıkları sözde menzil ve faz gözlem değerlerinin farkı alınarak ETEİ ve uydu yanlılıkları denklemden çıkarılmış ve seviyelendirme hatası (levelling error) elde edilmiştir [27]. Seviyelendirme hatası sözde menzil gözlemlerindeki gürültü ve çok yol etkisinden oluşmaktadır [27].

Farklı frekanslardaki uydu ve alıcı yanlılık farkları ETEİ hesaplamalarını 100 TECU'ya kadar etkileyebilmektedir [27]. Bu sebeple ETEİ değerlerinin kalibrasyon çalışmaları için bu yanlılıkların 1-3 gün sabit kaldığı varsayılmıştır [27]. Bu makalede, [27] ETEİ hesaplamalarında faz seviyelendirme işlemindeki hatalar ve diferansiyel alıcı yanlılıkları incelenmiştir. Seviyelendirilmiş faz gözlemlerindeki sistematik hatalar-

rın en büyük kaynağı sözde menzil gözlemlerindeki çok yol gecikmeleridir [27]. Aynı uydu için incelenen 2 farklı alıcı-uydu yayının genellikle aynı seviyelendirme hatasını barındırması sebebi ile gecikme gözlemlerinin frekans bağımlı yanlılık yerine yay bağımlı yanlılık kullanılarak daha iyi modellenebileceği savunulmaktadır [27].

[28]'de L1 ve L2 frekansındaki sinyallerin kullanılarak hesaplandığı bir YKS uydusu ve YKS alıcısı arasındaki TEİ değerlerinin iyonküre gecikmelerini karakterize edilebileceği belirtilmiştir.

[28]'deki çalışmada YKS ölçümleri kullanılarak mutlak TEİ hesaplamalarındaki hata kaynaklarını ortadan kaldırmak için üç yöntem incelenmiştir. Bu yöntemler alıcı yanlılık ölçümü yerine alıcı yanlılık kestiriminin kullanılmasını, indirgenmiş gecikmeli TEİ düzgünleştirmesini ve indirgenmiş iyonküre ıraklık yanlılık TEİ düzgünleştirilmesini içerir [28].

İyonkürede iyonlaşma uzayda her noktada aynı olmadığı, zamana ve güneş aktivitelerine bağlı olarak değiştiği için literatürde yapılan araştırmalarda TEİ kestirimlerinin farklı zamanlarda ve koşullarda incelemeleri yapılmıştır. Bu tez kapsamında bu çalışmalar incelenmiş ve elde edilen sonuçlar veri setleri oluşturulurken göz önünde bulundurulmuştur.

TOPEX/POSEIDON ölçüm çalışmaları ile, orta enlem bölgelerinde iyonkürenin düşük ve orta aktiviteli zamanlarında TEİ değerlerinin arttığı, yüksek aktiviteli zamanlarında ise TEİ değerlerinin azaldığı sonuçlarına ulaşılmıştır [29].

[30]'daki çalışmada sözde menzil modelinin az bilinmezlik barındırması ancak gürültülü olması ve faz gözlem modelinin az gürültülü olması ancak ilk faz bilinmezliği barındırması sebebi ile bu iki model birleştirilerek bileşik ETEİ adı verilen yeni bir ETEİ modeline ulaşılmıştır. Bu model aracılığı ile 2000 yılının Temmuz ayında gerçekleşmiş olan Bastille günü fırtınasında alıcı-uydu yanlılıklarının dahil edildiği ETEİ hesaplanarak, bu yanlılıklarının dahil edilmediği ETEİ hesaplanarak,

Kalman filtre kullanılarak alıcı-uydu yanlılıkları hesaplanarak ve son olarak DTEİ çıkarımları yapılarak iyonküre incelenmiştir [30].

Ekvator ve düşük enlem bölgelerindeki iyonküre, manyetik ekvator etkileri ile çeşitli jeofiziksel durumdan kaynaklı iyonlaşma bozulmalarına sahiptir; bu bozulmalar ekvatorial iyonlaşma anomalisi (equatorial ionisation anomaly, EIA) olarak adlandırılır [31].

[31]'de ekvatora yerleştirilmiş olan YKS alıcı ağının gözlemleri kullanılarak DTEİ ölçümlerinin 2012 yılının 12 aylık dönemi için DTEİ hesaplamaları kullanılmıştır. Ekvatorial iyonküre değişimleri mevsimlik, aylık ve günlük dönemler için incelenmiştir [31]. DTEİ değerlerinin ekvatorial bölgede gündüz saatlerinde gece saatlerine göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır [31].

[32]'deki çalışmada 1-8 TECU hata payı içeren geleneksel iyonküre gecikme modellerine alternatif olarak, 0.05 TECU'ten az hata payı içeren yeni bir model önerilmektedir. Bu modeldeki, [32] çerçevesinde kullanılan eş değerlendirme, söz konusu veriye makine öğrenmesi aracılığı ile otomatik olarak adapte olur. Bu adaptasyon kabiliyetinin da geleneksel yöntemlere karşılık iyonküre gecikmelerinin modellenmesi konusunda çok yüksek keskinlik sağladığı ifade edilmektedir [32]. Bu yöntem üç boyutlu yöntemlere kıyasla daha az parametre kullanır [32].

[33]'te yapılan çalışmada GIM TEİ değerlerine her adımda üst ve alt sınırların hesaplandığı bir analiz uygulanarak sinyal ayrıklıkları tespit edilir. İyonkürenin sakin olduğu zamanlarda yalnızca bir kaç TEİ ayrıklığının 24 saatten uzun süreceği savunulur [33]. İyonkürenin 2005'ten 2018'e kadar olan negatif ve pozitif bozulmalı günlerindeki CODE GIM verileri incelendiğinde, TEİ ayrıklıklarının pozitif bozulmalı günlerde %3.78'inin, negatif bozulmalı günlerde ise %1.45'inin 24 saatten uzun sürdüğü sonucuna ulaşılmıştır [33].

İyonkürenin karakteristiğinin anlaşılabilmesi için TEİ hesaplamaları kullanılır. Bu karakteristiğin ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılabilmesi için iyonküre mo-

delleri oluşturulur. TEİ kestirimleri kullanılarak iyonküre haritalarının oluşturulması ve iyonkürenin modellenmesi konularında pek çok bilimsel çalışma yapılmıştır.

İyonküre ve KD yayılım modellemesini mühendislik uygulamalarında kullanmak amacı ile IONOLAB-RAY algoritması geliştirilmiştir [34]. [34]'teki IONOLAB-RAY algoritması ile ışın izleme prensipleri iyonkürenin 3 boyutlu modeline uygulanabilir. IONOLAB-RAY, TEİ girdisi ile iyonküre modelini mevcut koşullara göre güncelleyerek, jeomanyetik fırtınaların iyonküre üzerindeki etkisinin incelenmesine de olanak sağlar [35].

[34]'teki çalışmada kısa dalga bandında yayılımın en önemli bileşenlerinden olan kırılma indisi için Appleton-Hartree eşitliği ve iyonkürenin 3 boyutlu küresel modellemesi için IRI-Plas yöntemi kullanılmıştır. Algoritmanın girdilerinden olan TEİ değerleri IGS analiz merkezinin yayınladığı GIM-TEC haritaları kullanılarak bir eş değerlendirme işlemi ile elde edilmiştir [34].

IONOLAB-RAY yönteminin bu yöntemden önceki çalışmalar üzerindeki avantajları iyonkürenin hem yatay hem de dikey homojen olmama özelliğinin, yönlülüğünün, zamana bağımlılığının modellenmiş olmasını; gelişmiş eş değerlendirme teknikleri kullanılarak ve GIM-TEC değerleri ile algoritmanın iyonkürenin mevcut haline güncellenebilmesini; elektron, iyon ve nötr moleküllere ait yoğunluk, kütle ve sıcaklık parametrelerinin otomatik olarak hesaplanabilirliğini içermektedir [18, 19].

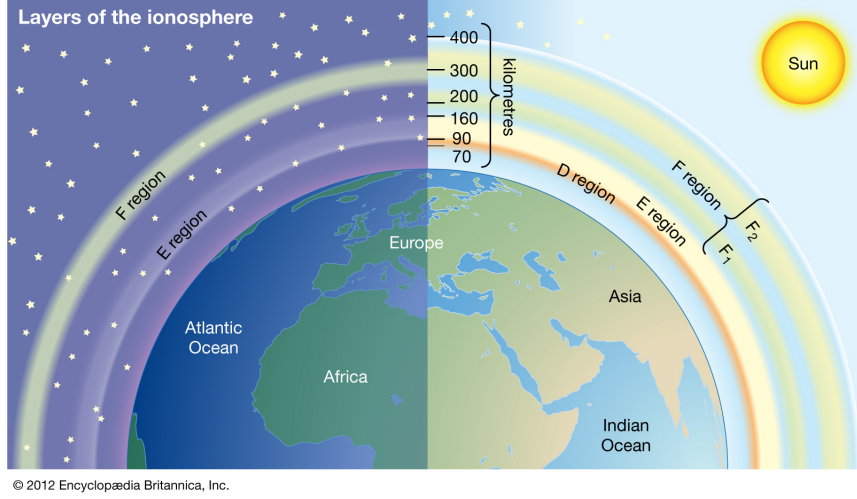
[36]'daki çalışmada 2 farklı kriging algoritması kullanılarak kullanıcı dostu, güvenilir bir otomatik TEİ haritalandırma yöntemi geliştirilmiştir. Kriging yöntemi, TEİ'nin istatistiksel birikimi mevcut olduğu için diğer haritalandırma yöntemlerinden avantajlı görülmüştür [36]. [36]'daki algoritma orta-enlem bölgelerindeki YKS alıcı ağlarından alınan gözlemlere uygulanmış ve kriging yönteminin eş değerlendirme yöntem hatalarına ek olarak dış değerlendirme hatalarını da içerdiği görülmüştür. Kriging hatalarını düzeltmek için GIM'lerdeki kayıp YKS TEİ değerleri kestirilmiş ve bu kestirimlerle bölgesel sınırlar çerçeveye alınmıştır [36]. Bu sayede diğer haritalandırma algoritmalarından farklı olarak bir kestirim algoritmasını da barındıran

ve her koşulda minimum hata payı ile çalışan orijinal bir haritalandırma algoritması olan IONOLAB-MAP geliştirilmiştir [35, 36].

3. YENİ NESİL YKS SİNYALLERİ İLE ETEİ KESTİRİM YÖNTEMİ

Uzun menzilli haberleşme sistemlerini etkileyen faktörlerin incelenmesi ile iyonküre araştırmaları başlamıştır. Bu araştırmaların devamında iyonkürenin dünya yörüngesindeki uydular ve askeri alanda balistik füzeler için oluşturduğu ortamın anlaşılabilmesi için iyonküre karakteristiğini tanımlama çalışmaları gelir [38]. İyonküre, iyonların ve serbest elektronların radyo dalgalarının yayılımını etkileyecek yoğunluklarda bulunduğu atmosfer tabakasıdır [38]. Bu tabakadaki yüklü parçacıklar temelini güneşin oluşturduğu dış kaynaklı ışınların enerjisiyle nötr molekül ve atomların iyonlaşması sonucunda oluşur. Güneşten gelen yüksek enerjili X-ışınları ve mor ötesi (UV) ışınlarının, dünyanın üst atmosferindeki nötr atomlar ve gaz molekülleri ile çarpışması sonucu elektronların atom ve moleküllerden ayrılması sonucu iyonlaşmış yüklü parçacıklar ve serbest elektronlar meydana gelir. Gündüz güneşin etkisiyle sürekli olarak gelen bu yüksek enerjili ışınlar gece azaldığı için, iyonlaşmış parçacıklar ve serbest elektronlar tekrar birleşerek nötrleşir. Bu da gece iyonkürenin elektron yoğunluğunun azalmasına sebep olur.

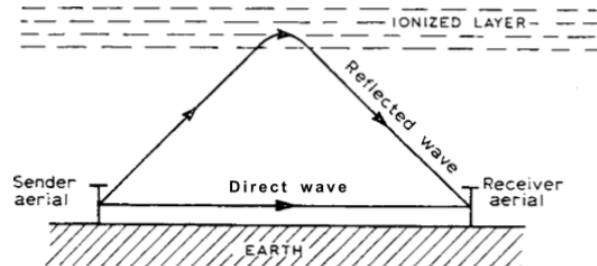
İyonküre yerden 50 km yükseklikte başlar, en yoğun etkisi 80 kilometreden fazla yüksekliklerde görülür [38]. 1920'lerin başında yerden 100-250 km yükseklikteki atmosfer tabakası Kenelly-Heaviside katmanı olarak adlandırılırken, Edward Appleton'ın çalışmalarında elektrik dalgalarının yansıdığı katmanı ifade eden 'E' harfi ile belirtilmiştir [38]. 1924 yılında Appleton tarafından elektromanyetik dalgaların yansıdığı iki katman daha keşfedilmiştir. Appleton ve Robert Watson-Watt tarafından bu katmanlar D ve F katmanları olarak tanımlanmıştır. Yerden 50-90 km yüksekliğindeki atmosfer tabakası D katmanıdır [38]. F katmanının ise gündüzleri iyonlaşmanın daha yoğun olması sebebi ile F_1 ve F_2 katmanlarına bölündüğü; F_1 katmanının yerden 200 km yükseklikte bulunarak karakteristik olarak E katmanına benzediği; F_2 katmanının ise iyonkürenin en yüksek katmanı olarak yerden 250-400 km yükseklikteki atmosfer tabakası olduğu ifade edilmiştir [38]. Kısa dalga yayılımı F_2 katmanı aracılığı ile yapıldığı için bu katmanın radio dalgaları üzerindeki etkisi büyük önem taşır. Öncelerde Appleton katmanı olarak adlandırılan F_2 katmanı, günün saatleri, mevsimler ve güneş lekeleri etkinliklerine göre değişkenlik gösterir [38].



Şekil 3.1: İyonküre Katmanları [45]

Radyo dalgaları tipik olarak düz çizgi halinde ilerler. Bu sebeple yeryüzünün eğimli yapısı radyo haberleşme menzilini limitler. Belirli frekanslardaki radyo dalgalarının iyonkürenin bazı katmanlarından yansıdığı keşfedilmiştir [39].

Kısa dalga haberleşme menzilini arttırmak için iyonküre yansımaları kullanılmıştır. Bu sayede haberleşme sistemindeki alıcı ve verici antenlerin görüş hattından olma gereksinimi ortadan kalkmıştır ve ufuk ötesi haberleşme mümkün olmuştur. İyonkürenin serbest elektron ve iyon yoğunluğu radyo dalgalarını etkiler, gecikmeye sebep olur. Bu nedenle kısa dalga haberleşmesi gibi iyonküreyi radyo dalgalarını yansıtmak amacı ile kullanan haberleşme sistemleri için iyonkürenin yapısındaki elektron yoğunluğu büyük önem taşır.

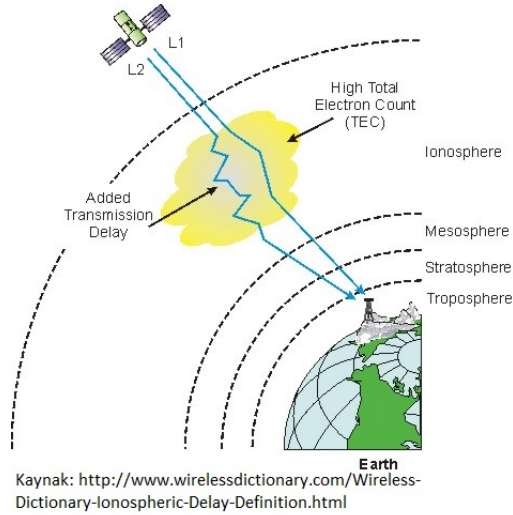


Kaynak: Appleton, E. V., The Ionosphere, Nobel Lecture, 1947.

Şekil 3.2: Radyo Dalgalarının Yayılımı [40]

İyonküre radyo dalgalarını yansıttığı gibi soğurur, zayıflatır ve bükür [39]. İyonkürenin spesifik davranışları radyo dalgalarının frekansına ve iyonkürenin bölgesel özelliklerine bağlıdır. Radyo haberleşmelerinde, kullanılan radyo frekansı iyonkürenin zayıflatacağı hatta soğuracağı bir frekans olursa haberleşme kaybı yaşanabilir. Uzun dalga ve orta dalga frekans bantlarındaki sinyaller, iyonkürenin elektron yoğunluğunun en düşük olduğu D katmanında zayıflatılır ve soğrulur. Frekansı 100 MHz üzerinde olan sinyaller, iyonkürenin E katmanından yansır. Kısa dalga bandındaki sinyaller de iyonkürenin F katmanından yansır, F katmanı kısa dalga haberleşmesi için çok büyük öneme sahiptir [41].

KD haberleşmelerine benzer şekilde seyrüsefer sistemlerinin sinyalleri de iyonküreden etkilenmektedir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi konum belirlemek için YKS uydularının kullandığı radyo sinyalleri iyonküre bölgelerinden geçtiği için iyonkürenin kırma ve bükme etkilerine maruz kalır. İyonkürenin YKS sinyalleri üzerindeki etkileri, YKS'nin konum belirlemedeki doğruluğunu etkiler.



Şekil 3.3: YKS Sinyallerinin Yayılımı

İyonküreyi delip geçebilen en küçük frekans kritik frekans olarak tanımlanmıştır; 30 MHz ve altındaki sinyaller iyonküreden yansır, çok daha yüksek frekanstaki sinyaller iyonküreyi delip geçebilir ancak iyonkürenin yapısından kaynaklı zayıflamalara uğrar [41]. Radyo sinyallerinin iyonkürede kırılma indisi Appleton-Hartree formülü ile tanımlanmıştır.

$$n_p^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1-X-iZ)} \pm \left[\frac{Y_T^4}{4(1-X-iZ)^2} + Y_L^2 \right]^{1/2}} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte $X = N_e e^2 / \epsilon_0 m \omega^2$, $Y_L = f_H \cos \theta / f$, $Z = f_v / f$ ve $\omega = 2\pi f$ olarak ifade edilir [41].

N_e (el/m³): Elektron yoğunluğu

f_{N_e} (30 MHz'i geçmez): Elektron plazma frekansı

f : Radyo sinyal frekansı

e (-1.602x10⁻¹⁹C): Elektron yükü

ϵ_0 (8.854x10⁻¹²F/m): Uzaydaki serbest dielektrik sabiti

B (Tesla): Dünya manyetik alanının akı yoğunluğu

m (9.107x10⁻³¹): Elektron kütlesi

θ : Manyetik alan ilerleme yönü ile manyetik alan arasındaki açı

f_v (yaklaşık 10⁴ Hz): Elektronun büyük parçacıklarla çarpışma frekansı

f_H (1.5 MHz): Elektronun dönme frekansı

Faz kırılma indisi n_p ve grup kırılma indisi n_g [41]'de aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$n_p = 1 - \frac{X}{2} \quad (3.2)$$

$$n_g = 1 + \frac{X}{2} \quad (3.3)$$

Bu denklemler kullanılarak X ile elektron yoğunluğu arasındaki ilişki yazılabilir [41].

$$\frac{X}{2} = \frac{40.28}{f^2} N_e \quad (3.4)$$

Grup kırılma indisi kullanılarak iyonküreden kaynaklanan gecikme [41]'de Δr olarak tanımlanmıştır.

$$\Delta r = \int (n_g - 1) dl \quad (3.5)$$

l sinyalin iyonkürede aldığı yoldur [41]. Grup kırılma indisi Eş. 3.5'te yerine yazıldığında grup gecikmesi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Delta r = \frac{40.28}{f^2} \int N_e dl \quad (3.6)$$

Elektron yoğunluğunun sinyalin iyonkürede ilerlediği yol boyunca integrali Eğik Toplam Elektron İçeriği (ETEİ) veya STEC olarak tanımlanır [22].

$$\int N_e dl = STEC \quad (3.7)$$

Bilim insanları iyonküreyi karakterize ederek anlık değişimlerini analiz etmek ve iyonküre gecikmelerini hesaba katmak için sürekli ölçümler yapmakta ve iyonküre modelleri oluşturmaktadır.

İyonkürenin toplam elektron içeriği kestirimleri için yapılmış olan pek çok farklı çalışma mevcuttur; bu çalışmalar 2. bölümde ayrıntılı anlatılmıştır. H. Nayir'in 2007'deki yüksek lisans tezi [41], YKS işaretlerini kullanarak iyonküre toplam elektron içeriği kestirimini içerir, bu tezde geliştirilen TEİ kestirim yöntemi daha sonra IONOLAB-TEC yöntemi olarak, ETEİ kestirimi ise IONOLAB-STEC yöntemi olarak adlandırılmıştır [19]. [41]'deki tezde L1 ve L2 temel YKS frekanslarındaki sinyaller ile elde edilen sözde menzil gözlemleri kullanılarak, faz gözlemleri kullanılarak ve bu iki gözlem birlikte kullanılarak TEİ kestirimleri yapılmıştır.

Sözde menzil kullanılarak TEİ kestirimleri için [30] ve [41]'deki sözde menzil gözlem modeli kullanılmıştır. Bu modele göre sözde menzil u alıcısı ve m uydu arasındaki gerçek uzaklığın; alıcı ve uydu saatleri arasındaki farklardan $\Delta t_u - \Delta t^m$,

YKS frekansına bağılı ionküre etkilerinden d_{ion} , YKS frekansına bağılı olmadığı varsayılan troposfer etkilerinden d_{trop} , alıcı ve uydu yanlılıklarından ϵ_u, ϵ^m ve hesaplama hatalarından α kaynaklanan gecikmeler kadar sapmasıdır [41].

$$P_{1;u}^m = p_{0;u}^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{ion1;u}^m + d_{trop;u}^m + c(\epsilon_{1;u} + \epsilon_1^m) + \alpha \quad (3.8)$$

$$P_{2;u}^m = p_{0;u}^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{ion2;u}^m + d_{trop;u}^m + c(\epsilon_{2;u} + \epsilon_2^m) + \alpha \quad (3.9)$$

Bu sözde menzil gözlem modeli pek çok ionküre ETEİ kestiriminde kullanılmıştır.

İyonkürenin güneş etkisiyle iyonlaşmanın meydana getirdiği serbest elektronlar ve nötr atomlardan oluşan yapısı, YKS sinyallerinde gecikmelere sebep olmaktadır. İyonküre frekans dağıtım, yön bağımlı, düzgün dağılmayan, uzaya ve zamana bağımlı çok karmaşık bir yapıya sahiptir. İyonküreyi karakterize etmek için kullanılan elektron yoğunluğu, güneş ışınlarının sebep olduğu iyonlaşma ile oluşur. Bu elektron yoğunluğu jeomanyetik, yer küresel ve sismik hareketlerden etkilenir. İyonkürenin iyonlaşmasındaki en büyük etken güneş ışınlarının enerjisi olduğu için elektron yoğunluğu güneşe olan yakınlıkla doğru orantılıdır. Bu sebeple gündüzleri ionküre elektron yoğunluğu gecelere göre daha yüksektir. Yine aynı sebepten ekvatorial bölgelerde diğer enlem bölgelerine göre daha yüksek elektron yoğunluğu gözlenir.

İyonkürenin YKS sinyalleri üzerindeki etkisi Appleton-Hartree kırılma indisi kullanılarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır [41].

$$\Delta r = \frac{A}{f^2} \int N_e dl \quad (3.10)$$

$$d_{ion,u}^m = A \frac{STEC}{f^2} \quad (3.11)$$

Burada l YKS sinyalinin ionkürede aldığı yol, N_e elektron yoğunluğu, f YKS frekansı ve A $40.28m^3/s^2$ olan sabittir [41].

ETEİ kestirimi için $P_{1;u}^m$ ve $P_{2;u}^m$ sözde menzil gözlemlerinin farkı alınarak frekansa

bağımlı olmayan gerçek menzil, alıcı uydu saatleri arasındaki farklardan kaynaklı gecikme ve troposfer etkilerinden kaynaklı gecikme denklemden çıkarılmış; hesaplama hataları da görece küçük oldukları için yok sayılmıştır [41]. $P_{1;u}^m$ ve $P_{2;u}^m$ gözlemleri arasındaki fark $P_{4;u}^m$ olarak adlandırılmıştır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir [41].

$$P_{4;u}^m = P_{2;u}^m - P_{1;u}^m \quad (3.12)$$

$$P_{4;u}^m = d_{ion2;u}^m - d_{ion1;u}^m + c(\epsilon_{2;u} - \epsilon_{1;u}) + c(\epsilon_2^m - \epsilon_1^m) \quad (3.13)$$

Nayir [41]'de diferansiyel alıcı ve uydu yanlılık farklarını

$$DCB_u = \epsilon_{1;u} - \epsilon_{2;u} \quad (3.14)$$

$$DCB^m = \epsilon_1^m - \epsilon_2^m \quad (3.15)$$

olarak tanımlamıştır. Eş. 3.13'te diferansiyel yanlılıklar ve iyonküre gecikmesi yerlerine yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilmiştir [41].

$$P_{4;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1 f_2} STEC_u^m - c(DCB_u + DCB^m) \quad (3.16)$$

Bu durumda STEC değeri aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$STEC_u^m = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4;u}^m + c(DCB_u + DCB^m)] \quad (3.17)$$

[41]'de bir diğer ETEİ kestirim yöntemi olarak faz gözlem modeli kullanılmıştır. Faz Φ YKS sinyalinin u alıcısı ve m uydu arasında kaç dalga boyu yol aldığıdır; bu değer dalga boyu λ ile çarpılarak sözde menzil modeline benzer bir model elde edilir [41]. Sözde menzil modelinden farklı olarak faz gözlemlerinde ilk faz belirsizliğinden kaynaklanan bir N bilinmeyi mevcuttur [41]. Nayir [41]'de faz gözlem modelini L1 ve L2 YKS frekansları için aşağıdaki şekilde tanımlamıştır.

$$\lambda_1 \Phi_{1;u}^m = p_{0;u}^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + \lambda_1 \Phi_{ion1;u}^m + \lambda_1 \Phi_{trop;u}^m - c(\epsilon_{1;u} + \epsilon_1^m) + \lambda_1 N_1^m + \alpha \quad (3.18)$$

$$\lambda_2 \Phi_{2;u}^m = p_{0;u}^m - c(\Delta t_u - \Delta t^m) + \lambda_2 \Phi_{ion2;u}^m + \lambda_2 \Phi_{trop;u}^m - c(\epsilon_{2;u} + \epsilon_2^m) + \lambda_2 N_2^m + \alpha \quad (3.19)$$

Sözde menzil modeli kullanılarak TEİ kestiriminde olduğu gibi faz gözlemlerinin farkı kullanılarak frekanstan bağımsız olan parametreler denklemden çıkarılmıştır.

$$L_{4;u}^m = \lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2 \quad (3.20)$$

$$L_{4;u}^m = \lambda_1 \Phi_{ion1;u}^m - \lambda_2 \Phi_{ion2;u}^m + c(\epsilon_2^m - \epsilon_1^m) + c(\epsilon_{2;u} - \epsilon_{1;u}) + \Delta N^m \quad (3.21)$$

$$\Delta N^m = \lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m \quad (3.22)$$

İyonkürenin faz ve sözde menzil ölçümlerine etkisi ve TEİ ilişkileri $STEC = \int N_e dl$ eşitliği kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılmıştır [41].

$$d_{ion;u}^m = -\Phi_{ion;u}^m \frac{c}{f} \approx A \frac{STEC}{f^2} \quad (3.23)$$

Eş. 3.21'de $\lambda_1 \Phi_{ion1;u}^m$ ve $\lambda_2 \Phi_{ion2;u}^m$ yerine yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilir.

$$L_{4;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m - c(DCB^m + DCB_u) + \Delta N^m \quad (3.24)$$

ETEİ değeri Eş. 3.25'teki gibi tanımlanır.

$$STEC_u^m = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [L_{4;u}^m + c(DCB^m + DCB_u) - \Delta N^m] \quad (3.25)$$

Sözde menzil gözlemleri ile TEİ kestirimi yapmak daha kolayken, bu gözlemlerde gürültü seviyesi yüksektir. Faz gözlemlerinin kullanıldığı gözlemlerde ise gürültü seviyesi düşüktür ancak bu yöntemlerde ilk faz belirsizliği mevcuttur.

[41]'de ETEİ değerlerini kullanarak, Tek Katmanlı İyonküre Modeli varsayımı ile

DTEİ kestirimleri yapılmıştır.

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n)/M(\epsilon_m(n)) \quad (3.26)$$

Bu eşitlikte farklı zamanlardaki gözlemler kullanılarak kestirilen TEİ değerleri için n zaman parametresi kullanılmıştır. $M(\epsilon_m(n))$, ETEİ kestirimlerinden DTEİ hesaplamak için kullanılan izdüşüm fonksiyonudur [41].

$$M(\epsilon_m(n)) = [1 - (\frac{R \cos \epsilon_m(n)}{R + h})^2]^{-1/2} \quad (3.27)$$

Eş. 3.27'deki izdüşüm fonksiyonunda ϵ yerel yükseklik açısı, h iyonkürede en yüksek iyonlaşma olan yükseklik ve R dünyanın yarıçapıdır (6.387,137 m) [41]. [16] ve [17]'de geliştirilmiş olan Düzgünleştirilmiş TEİ algoritması kullanılarak [41]'deki izdüşüm fonksiyonunda h değeri 428.8 km olarak kullanılmıştır. [41]'de geliştirilmiş olan ETEİ kestirim yöntemi IONOLAB-STEÇ, alıcı yanlılıkları kestirim yöntemi ise IONOLAB-BIAS yöntemi olarak tanımlanmıştır.

3.1 Söзде Menzil Gözlemleri Kullanılarak ETEİ Kestirimi

Söзде menzil gözlemleri f_1 ve f_2 YKS frekansları için kullanılarak ETEİ hesaplama yönteminde her bir alıcı-uydu için 1 denklem elde edilmektedir. Farklı alıcı ve uydular kullanılarak denklem sayısını arttırmak mümkündür; eğer denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşitse denklem seti çözülebilir. Farklı alıcı ve uydular kullanıldığında denklemlerdeki alıcı ve uydu yanlılıkları ortak olacaktır; bu da gözlem bilgisini artırırken bilinmeyen sayısını sabit tutmaya yarar. Ancak her alıcı-uydu için 1 ETEİ değeri olacağından her denklemde farklı bir $STEC_u^m$ bilinmeyeni olacaktır. Örneğin alıcı ve uydu sayıları 2 olduğunda $u : a, b$ ve $m : A, B$ YKS söзде menzil modeli her bir alıcı-uydu için aşağıdaki şekilde yazılır.

$$P_{4;a}^A = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_a^A + c(\epsilon_{2;a} - \epsilon_{1;a}) + c(\epsilon_2^A - \epsilon_1^A) \quad (3.28)$$

Denklem: 1

Bilinmeyen: 5

$$P_{4;a}^B = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_a^B + c(\epsilon_{2;a} - \epsilon_{1;a}) + c(\epsilon_2^B - \epsilon_1^B) \quad (3.29)$$

Denklem: 2

Bilinmeyen: 8

$$P_{4;b}^A = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_b^A + c(\epsilon_{2;b} - \epsilon_{1;b}) + c(\epsilon_2^A - \epsilon_1^A) \quad (3.30)$$

Denklem: 3

Bilinmeyen: 11

$$P_{4;b}^B = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_b^B + c(\epsilon_{2;b} - \epsilon_{1;b}) + c(\epsilon_2^B - \epsilon_1^B) \quad (3.31)$$

Denklem: 4

Bilinmeyen: 12

Her bir frekans ikilisi için STEC çarpanları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$c_{12} = 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \quad (3.32)$$

$$c_{15} = 40.28 \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} \quad (3.33)$$

$$c_{25} = 40.28 \frac{f_2^2 - f_5^2}{f_2^2 f_5^2} \quad (3.34)$$

Bu denklem seti; **A** katsayı matrisi, **x** bilinmeyen vektörü ve **b** sözde menzil gözlem vektörü olacak şekilde **Ax = b** sistemi olarak ifade edilir.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} STEC_a^A \\ STEC_a^B \\ STEC_b^A \\ STEC_b^B \\ \epsilon_{1;a} \\ \epsilon_{2;a} \\ \epsilon_{1;b} \\ \epsilon_{2;b} \\ \epsilon_1^A \\ \epsilon_2^A \\ \epsilon_1^B \\ \epsilon_2^B \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} c_{12} & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 \\ 0 & c_{12} & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & c \\ 0 & 0 & c_{12} & 0 & 0 & 0 & -c & c & -c & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{12} & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & -c & c \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} P_{4;a}^A \\ P_{4;a}^B \\ P_{4;b}^A \\ P_{4;b}^B \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Alıcı ve uydu sayılarını arttırarak denklem sayısını arttırmak mümkündür.

Çizelge 3.1: L1 ve L2 sinyalleri için alıcı-uydu kombinasyonları

Uydu Sayısı (m)	Alıcı Sayısı (u)	Denklem Sayısı (m*u)	Bilinmeyen Sayısı (2*m+2*u+m*u)
1	1	1	5
1	2	2	8
2	2	4	12
2	3	6	16
3	3	9	21
4	4	16	32
5	5	25	45
6	6	36	60

Görüldüğü üzere denklem sayısı arttıkça bilinmeyen sayısı da artmaktadır, doğrusal denklemlerin çözülebilmesi için bilinmeyen sayısı kadar denklem olması gerektiğinden 2 frekanstaki gözlemler kullanılarak farklı alıcı-uydular için bu denklem seti çözülememektedir. Denklem sayısını arttırabilmek için bu sözde menzil göz-

lemlerinin kullanıldığı ETEİ kestirim modeline 3. denklem olarak L5 frekansındaki sözde menzil gözlemleri aşağıdaki şekilde eklenebilir.

$$P_{1;u}^m = p_{0;u}^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{ion1;u}^m + d_{trop;u}^m + c(\epsilon_{1;u} + \epsilon_1^m) + \alpha \quad (3.38)$$

$$P_{2;u}^m = p_{0;u}^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{ion2;u}^m + d_{trop;u}^m + c(\epsilon_{2;u} + \epsilon_2^m) + \alpha \quad (3.39)$$

$$P_{5;u}^m = p_{0;u}^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{ion5;u}^m + d_{trop;u}^m + c(\epsilon_{5;u} + \epsilon_5^m) + \alpha \quad (3.40)$$

YKS frekansına bağlı olmadığı varsayılan alıcı-uydu arasındaki gerçek uzaklık, alıcı ve uydu saatleri arasındaki uyumsuzluk ve troposfer etkisinden kaynaklanan gecikme tüm denklemlerde ortaktır. Bu sebeple denklemlerin ikili farkları alındığında frekanstan bağımsız olan ortak bilinmeyenler sistemden çıkarılabilir.

$$P_{2;u}^m - P_{1;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m + c(\epsilon_{2;u} - \epsilon_{1;u}) + c(\epsilon_2^m - \epsilon_1^m) \quad (3.41)$$

$$P_{5;u}^m - P_{1;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_u^m + c(\epsilon_{5;u} - \epsilon_{1;u}) + c(\epsilon_5^m - \epsilon_1^m) \quad (3.42)$$

Bu durumda IONOLAB-STEÇ yönteminde ve literatürdeki diğer çalışmalarda mevcut olan $P_2 - P_1$ denklemine ek olarak $P_5 - P_2$ veya $P_5 - P_1$ denklemi eklenerek denklem sayısı 2'ye çıkarılırken *STEÇ* bilinmeyeni aynı alıcı ve uydu için aynı olacağından, bilinmeyen sayısı aynı oranda artmamış olur. Bu model kullanılarak 2 alıcı (a, b) ve 2 uydu (A, B) içeren örnek bir çözüm seti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_{2;a}^A - P_{1;a}^A = c_{12} STEC_a^A + c(\epsilon_{2;a} - \epsilon_{1;a}) + c(\epsilon_2^A - \epsilon_1^A) \quad (3.43)$$

$$P_{5;a}^A - P_{1;a}^A = c_{15} STEC_a^A + c(\epsilon_{5;a} - \epsilon_{1;a}) + c(\epsilon_5^A - \epsilon_1^A) \quad (3.44)$$

$$P_{2;b}^A - P_{1;b}^A = c_{12} STEC_b^A + c(\epsilon_{2;b} - \epsilon_{1;b}) + c(\epsilon_2^A - \epsilon_1^A) \quad (3.45)$$

$$P_{5;b}^A - P_{1;b}^A = c_{15} STEC_b^A + c(\epsilon_{5;b} - \epsilon_{1;b}) + c(\epsilon_5^A - \epsilon_1^A) \quad (3.46)$$

$$P_{2;a}^B - P_{1;a}^B = c_{12} STEC_a^B + c(\epsilon_{2;a} - \epsilon_{1;a}) + c(\epsilon_2^B - \epsilon_1^B) \quad (3.47)$$

$$P_{5;a}^B - P_{1;a}^B = c_{15} STEC_a^B + c(\epsilon_{5;a} - \epsilon_{1;a}) + c(\epsilon_5^B - \epsilon_1^B) \quad (3.48)$$

$$P_{2;b}^B - P_{1;b}^B = c_{12} STEC_b^B + c(\epsilon_{2;b} - \epsilon_{1;b}) + c(\epsilon_2^B - \epsilon_1^B) \quad (3.49)$$

$$P_{5;b}^B - P_{1;b}^B = c_{15}STEC_b^B + c(\epsilon_{5;b} - \epsilon_{1;b}) + c(\epsilon_5^B - \epsilon_1^B) \quad (3.50)$$

Denklem: 8

Bilinmeyen: 16

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} STEC_a^A \\ STEC_a^B \\ STEC_b^A \\ STEC_b^B \\ \epsilon_{1;a} \\ \epsilon_{2;a} \\ \epsilon_{5;a} \\ \epsilon_{1;b} \\ \epsilon_{2;b} \\ \epsilon_{5;b} \\ \epsilon_1^A \\ \epsilon_2^A \\ \epsilon_5^A \\ \epsilon_1^B \\ \epsilon_2^B \\ \epsilon_5^B \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} c_{12} & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{15} & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & c & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & c & -c & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{12} & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 \\ 0 & 0 & c_{15} & 0 & -c & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 & c_{12} & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{15} & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & c & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} P_{2;a}^A - P_{1;a}^A \\ P_{5;a}^A - P_{1;a}^A \\ P_{2;a}^B - P_{1;a}^B \\ P_{5;a}^B - P_{1;a}^B \\ P_{2;b}^A - P_{1;b}^A \\ P_{5;b}^A - P_{1;b}^A \\ P_{2;b}^B - P_{1;b}^B \\ P_{5;b}^B - P_{1;b}^B \end{bmatrix}$$

Yeterli sayıda alıcı-uydu ikilisi için denklem sayısı, bilinmeyen sayısına eşit veya bilinmeyen sayısından daha büyük olabilir.

Çizelge 3.2: L1, L2 ve L5 sinyalleri için alıcı-uydu kombinasyonları

Uydu Sayısı (m)	Alıcı Sayısı (u)	Denklem Sayısı (2*m*u)	Bilinmeyen Sayısı (3*m+3*u+m*u)
1	1	2	7
1	2	4	11
2	2	8	16
2	3	12	21
3	3	18	27
4	4	32	40
5	5	50	45
6	6	72	72

Sistem $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ olarak tanımlanırsa 6 alıcı ve 6 uydu için 72 denklem ve 72 bilinmeyi olan bir doğrusal denklem sistemi elde edilir ancak bu sistemde (72x72) olan katsayı matrisi \mathbf{A} tersi alınamayan bir matristir. Sözde tersini alarak sistemi çözmek düşünülebilir ancak bu durumda da 6 alıcının aynı anda uygun yükselme açılarında aynı 6 uyduyu görmesi için bu alıcıların çok yakın yerleştirilmiş olmaları gerekmektedir. Bu modeli bir adım daha sadeleştirmek için L1 ve L2 frekansındaki sinyaller için CODE tarafından yayınlanan diferansiyel uydu yanlılıkları sisteme aşağıdaki şekilde dahil edilebilir.

$$P_{2;u}^m - P_{1;u}^m + cDCB^m = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m + c(\epsilon_{2;u} - \epsilon_{1;u}) \quad (3.51)$$

$$P_{5;u}^m - P_{1;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_u^m + c(\epsilon_{5;u} - \epsilon_{1;u}) + c(\epsilon_5^m - \epsilon_1^m) \quad (3.52)$$

Çizelge 3.3: L1, L2 ve L5 sinyalleri için CODE diferansiyel uydu yanlılıklarının kullanıldığı alıcı-uydu kombinasyonları

Uydu Sayısı (m)	Alıcı Sayısı (u)	Denklem Sayısı (2*m*u)	Bilinmeyen Sayısı (2*m+3*u+m*u)
1	1	2	6
1	2	4	10
2	2	8	14
2	3	12	19
3	3	18	24
4	4	32	36
5	5	50	50

Bu durumda 5 alıcı ve 5 uydu için 50 denklem sayısına karşılık 50 bilinmeyen ile sistem çözülebilir hale getirilir. Ancak bu sistem doğrusal olarak bağımlı denklem-

ler içerdiği için **A** katsayı matrisi tersi alınamayan bir matristir.

Alıcı ve uydu yanlılıkları 1 günlük aralıklarla yayınlandığı için, 1 gün içinde farklı zamanlarda yapılan gözlemlerde bu yanlılıkların aynı olduğu varsayımı kullanılarak denklem seti farklı zaman aralıklarında yapılan n gözlem için genişletilebilir.

$$P_{2;u}^m(n) - P_{1;u}^m(n) + cDCB^m = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m(n) + c(\epsilon_{2;u} - \epsilon_{1;u}) \quad (3.53)$$

$$P_{5;u}^m(n) - P_{1;u}^m(n) = A \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_u^m(n) + c(\epsilon_{5;u} - \epsilon_{1;u}) + c(\epsilon_5^m - \epsilon_1^m) \quad (3.54)$$

Çizelge 3.4: L1, L2 ve L5 sinyalleri için CODE diferansiyel uydu yanlılıklarının ve farklı zamanlardaki gözlemlerin kullanıldığı alıcı-uydu kombinasyonları

Uydu Sayısı (m)	Alıcı Sayısı (u)	Zaman Örnek Sayısı (n)	Denklem Sayısı Sayısı (2*m*u*n)	Bilinmeyen Sayısı Sayısı (2*m+3*u+m*u*n)
1	1	10	20	15
1	2	5	20	18
2	2	3	24	22
2	3	5	120	73
3	3	5	90	60
4	4	2	64	52
5	5	1	50	50

Bu yaklaşım kullanıldığında Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi denklem sayılarının bilinmeyen sayılarından fazla olduğu farklı sistemler oluşturulabilmektedir. Ancak farklı zamanlardaki gözlemlerin dahil edildiği sistemlerin katsayı matrislerinin çözülebilirliği, tek bir zamandaki gözlemlerin kullanıldığı denklem setinin katsayı matrisinin çözülebilirliği ile aynı kalmaktadır. Gözlem örneklerini bu şekilde arttırmak, doğrusal olarak bağımsız olmayan denklemlerin tekrar etmesi anlamına gelir; bu sebeple sistemi çözülebilir hale getirmemektedir.

Bilinmeyen sayısını azaltmak için alıcı ve uydu yanlılıklarını ayrı ayrı denkleme dahil etmektense, diferansiyel yanlılık tanımı L5 frekansı dahil edilerek genişletilebilir.

$$DCB_{12;u} = \epsilon_{1;u} - \epsilon_{2;u} \quad (3.55)$$

$$DCB_{15;u} = \epsilon_{1;u} - \epsilon_{5;u} \quad (3.56)$$

$$DCB_{12}^m = \epsilon_1^m - \epsilon_2^m \quad (3.57)$$

$$DCB_{15}^m = \epsilon_1^m - \epsilon_5^m \quad (3.58)$$

Gözlem modelinde diferansiyel yanlılıklar yerine yazıldığında aşağıdaki model elde edilir.

$$P_{2;u}^m - P_{1;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m - cDCB_{12;u} - cDCB_{12}^m \quad (3.59)$$

$$P_{5;u}^m - P_{1;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_u^m - cDCB_{15;u} - cDCB_{15}^m \quad (3.60)$$

Çizelge 3.5: L1, L2 ve L5 sinyalleri için diferansiyel alıcı-uydu yanlılıklarının tanımlandığı alıcı-uydu kombinasyonları

Uydu Sayısı (m)	Alıcı Sayısı (u)	Denklem Sayısı (2*m*u)	Bilinmeyen Sayısı (2*m+2*u+m*u)
1	1	2	5
1	2	6	8
2	2	8	12
2	3	12	16
3	3	18	21
4	4	32	32

Bu model kullanıldığında 4 alıcı 4 uydu için denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşittir, ancak yine denklem setinde doğrusal olarak bağımsız olmayan denklemler mevcuttur.

Diferansiyel alıcı ve uydu yanlılıklarını $DCB_{12;u}^m$ ve $DCB_{15;u}^m$ olarak tek bir bilinmeyen şeklinde tanımlayarak ETEİ kestirimini modellemek mümkündür.

$$DCB_{12;u}^m = \epsilon_{1;u} - \epsilon_{2;u} + \epsilon_1^m - \epsilon_2^m \quad (3.61)$$

$$DCB_{15;u}^m = \epsilon_{1;u} - \epsilon_{5;u} + \epsilon_1^m - \epsilon_5^m \quad (3.62)$$

$$P_{2;u}^m - P_{1;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m - cDCB_{12;u}^m \quad (3.63)$$

$$P_{5;u}^m - P_{1;u}^m = A \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_u^m - cDCB_{15;u}^m \quad (3.64)$$

Örnek olarak 2 alıcı (a; b); 2 uydu (A; B) için bu model aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P_{2;a}^A - P_{1;a}^A = 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_a^A - cDCB_{12;a}^A \quad (3.65)$$

$$P_{5;a}^A - P_{1;a}^A = 40.28 \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_a^A - cDCB_{15;a}^A \quad (3.66)$$

$$P_{2;a}^B - P_{1;a}^B = 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_a^B - cDCB_{12;a}^B \quad (3.67)$$

$$P_{5;a}^B - P_{1;a}^B = 40.28 \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_a^B - cDCB_{15;a}^B \quad (3.68)$$

$$P_{2;b}^A - P_{1;b}^A = 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_b^A - cDCB_{12;b}^A \quad (3.69)$$

$$P_{5;b}^A - P_{1;b}^A = 40.28 \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_b^A - cDCB_{15;b}^A \quad (3.70)$$

$$P_{2;b}^B - P_{1;b}^B = 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_b^B - cDCB_{12;b}^B \quad (3.71)$$

$$P_{5;b}^B - P_{1;b}^B = 40.28 \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_b^B - cDCB_{15;b}^B \quad (3.72)$$

Denklem: 8

Bilinmeyen: 12

Bu denklem sisteminde her bir alıcı-uydu için 2 denklem ve 2 diferansiyel yanlılık bilinmeyeni mevcuttur. Bu sebeple alıcı ve uydu sayılarının artırıldığı durumda dahi denklem sayısı sistemi çözmek için yeterli olmayacaktır.

Bu sistemi çözülebilir hale getirmek için ilk değer bulma yöntemi kullanılmıştır. $P_{2;u}^m - P_{1;u}^m$ denklemi IONOLAB-STEAC [19] yöntemi ile çözülerek ilk $STEC_u^m$ değeri kestirilmiştir ve bu değer diğer denklemlerde kullanılacak şekilde sistem modellenmiştir. Bu durumda L1 ve L2 frekansında uydu diferansiyel yanlılığının yanı sıra, bir alıcı için alıcı diferansiyel yanlılığının $\epsilon_{2;u} - \epsilon_{1;u}$ da bilindiği varsayılmıştır.

$$P_{2;u}^m - P_{1;u}^m + cDCB_{12;u}^m = 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m \quad (3.73)$$

$$STEC_u^m = \frac{1}{40.28} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{2;u}^m - P_{1;u}^m + cDCB_{12;u}^m] \quad (3.74)$$

$$P_{5;u}^m - P_{1;u}^m = 40.28 \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_u^m + c(\epsilon_{5;u} - \epsilon_{1;u}) + c(\epsilon_5^m - \epsilon_1^m) \quad (3.75)$$

Alıcı diferansiyel yanlılığı bilindiği varsayılan referans bir alıcının uydular ile arasındaki ETEİ değeri, L1 ve L2 YKS frekansındaki sözde menzil gözlemleri ile IONOLAB-STEÇ, [19] yöntemi kullanılarak hesaplanır. 2 alıcı ve 2 uydu sistemi için denklemler aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$P_{2;a}^A - P_{1;a}^A + cDCB_{12;a}^A = 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_a^A \quad (3.76)$$

$$STEC_a^A = \frac{1}{40.28} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4;a}^A + cDCB_{12;a}^A] \quad (3.77)$$

$$P_{2;a}^B - P_{1;a}^B + cDCB_{12;a}^B = 40.3 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_a^B \quad (3.78)$$

$$STEC_a^B = \frac{1}{40.28} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4;a}^B + cDCB_{12;a}^B] \quad (3.79)$$

IONOLAB-STEÇ yöntemi ile hesaplanan $STEC_a^A$ ve $STEC_a^B$ bilinen değerler olarak yerlerine yazılacak şekilde denklem seti düzenlenir.

$$P_{5;a}^A - P_{1;a}^A - c_{15} STEC_a^A = c(\epsilon_{5;a} - \epsilon_{1;a}) + c(\epsilon_5^A - \epsilon_1^A) \quad (3.80)$$

$$P_{5;a}^B - P_{1;a}^B - c_{15} STEC_a^B = c(\epsilon_{5;a} - \epsilon_{1;a}) + c(\epsilon_5^B - \epsilon_1^B) \quad (3.81)$$

$$P_{2;b}^A - P_{1;b}^A + cDCB_{12}^A = c_{12} STEC_b^A + c(\epsilon_{2;b} - \epsilon_{1;b}) \quad (3.82)$$

$$P_{5;b}^A - P_{1;b}^A = c_{15} STEC_b^A + c(\epsilon_{5;b} - \epsilon_{1;b}) + c(\epsilon_5^A - \epsilon_1^A) \quad (3.83)$$

$$P_{2;b}^B - P_{1;b}^B + cDCB_{12}^B = c_{12} STEC_b^B + c(\epsilon_{2;b} - \epsilon_{1;b}) \quad (3.84)$$

$$P_{5;b}^B - P_{1;b}^B = c_{15} STEC_b^B + c(\epsilon_{5;b} - \epsilon_{1;b}) + c(\epsilon_5^B - \epsilon_1^B) \quad (3.85)$$

Denklem: 6

Bilinmeyen: 11

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} STEC_b^A \\ STEC_b^B \\ \epsilon_{1;a} \\ \epsilon_{5;a} \\ \epsilon_{1;b} \\ \epsilon_{2;b} \\ \epsilon_{5;b} \\ \epsilon_1^A \\ \epsilon_5^A \\ \epsilon_1^B \\ \epsilon_5^B \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & c \\ c_{12} & 0 & 0 & 0 & -c & c & 0 & -c & c & 0 & 0 \\ c_{15} & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & c & -c & c & 0 & 0 \\ 0 & c_{12} & 0 & 0 & -c & c & 0 & 0 & 0 & -c & c \\ 0 & c_{15} & 0 & 0 & -c & 0 & c & 0 & 0 & -c & c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} P_{5;a}^A - P_{1;a}^A - c_{15} STEC_a^A \\ P_{5;a}^B - P_{1;a}^B - c_{15} STEC_a^B \\ P_{2;b}^A - P_{1;b}^A + c DCB_{12}^A \\ P_{5;b}^A - P_{1;b}^A \\ P_{2;b}^B - P_{1;b}^B + c DCB_{12}^B \\ P_{5;b}^B - P_{1;b}^B \end{bmatrix}$$

Çizelge 3.6: L1, L2 ve L5 sinyalleri için 1 alıcı yanlılığının ve CODE diferansiyel uydu yanlılıklarının bilindiği varsayılan alıcı-uydu kombinasyonları

Uydu Sayısı (m)	Alıcı Sayısı (u)	Denklemler Sayısı (2*m*u-2)	Bilinmeyen Sayısı (m*u+m+3*u-1)
2	2	6	11
2	3	12	16
3	2	10	14
2	3	10	16
3	3	16	20
4	4	30	31
5	4	38	36

Bu model L1 ve L2 frekansları için uydu diferansiyel yanlılıkları ve bir alıcı için alıcı diferansiyel yanlılığı bilindiği varsayılarak 5 uydu ve 4 alıcı için genişletildiğinde 38 denkleme karşılık 36 bilinmeyene sahip bir denklem sistemine ulaşılır. Ancak bu

denklem sistemi de doğrusal olarak bağımsız olmayan denklemler içerdiği için çözülememektedir.

P1, P2 ve P5 gözlemleri doğrusal denklem seti oluşturarak ETEİ kestirimi yapmak için yeterli değildir.

Nayir'in [41]'deki tezindeki sözde menzil ile TEİ kestirimlerinde RINEX 2 formatında [42, 43] yayınlanan L1 ve L2 frekanslarındaki P1, P2, C1, C2 YKS gözlemleri kullanılmıştır. Yerküresel konumlama sistemlerinin gelişmesinden yeni bir YKS sinyali ihtiyacı doğmuştur ve L1, L2 frekanslarına ek olarak L5 frekansında sivil gözlemler RINEX 2.11 ve sonrasında yayınlanmaya başlamıştır. RINEX 2.11'de C5 sözde menzil gözlemi olarak eklenen L5 sinyalleri, RINEX 3 ve sonrasında çeşitlendirilmiştir. Bu kısma kadar C5 sözde menzil gözlemini [41]'deki ETEİ kestirim modeline dahil etme yöntemi açıklanmıştır. C5 gözlemlerinin de eklendiği farklı sözde menzil modelleri oluşturulmuş ve bu modellerin çözülebilirliği tartışılmıştır. Bu tez kapsamında RINEX 3.03, [44] formatındaki sözde menzil gözlemleri kullanılarak farklı ETEİ kestirim modelleri incelenmiştir. RINEX 3.03, [44] formatında YKS L1 frekansı için C1C, C1W; L2 frekansı için C2C, C2W, C2L; L5 frekansı için C5I, C5Q, C5X gibi sözde menzil gözlemleri bulunmaktadır.

L5 frekansındaki gözlemler yeni bilgiler içerdiği için doğrusal denklem sistemi farklı alıcı ve uydular için genişletilerek çözülebilir hale getirilebilir. RINEX 3.03 sinyalleri kullanılarak aşağıdaki gözlem farkları, farklı alıcı ve uydu kombinasyonları ile oluşturulan denklem setleri için incelenmiştir.

- $C1C_u^m - C1W_u^m, C1C_u^m - C2C_u^m, C1C_u^m - C2W_u^m, C1C_u^m - C5Q_u^m, C1C_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C1W_u^m, C1C_u^m - C2C_u^m, C1W_u^m - C2W_u^m, C1C_u^m - C5Q_u^m, C2W_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C1W_u^m, C1C_u^m - C2C_u^m, C1W_u^m - C2W_u^m, C1C_u^m - C5Q_u^m, C2W_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C1W_u^m, C1C_u^m - C2W_u^m, C2W_u^m - C5X_u^m$

- $C1C_u^m - C2C_u^m, C1C_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C1W_u^m, C2C_u^m - C2W_u^m, C5Q_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C2C_u^m, C1W_u^m - C5Q_u^m, C2W_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C2C_u^m, C1W_u^m - C2W_u^m, C1C_u^m - C5Q_u^m, C2C_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C2C_u^m, C1W_u^m - C2W_u^m, C2C_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C1W_u^m, C1C_u^m - C2C_u^m, C2C_u^m - C5X_u^m, C5Q_u^m - C5X_u^m$
- $C1C_u^m - C2C_u^m, C1W_u^m - C2W_u^m, C2C_u^m - C5Q_u^m$
- $C1C_u^m - C1W_u^m, C1W_u^m - C2W_u^m, C1C_u^m - C5Q_u^m$
- $C1C_u^m - C2L_u^m, C1W_u^m - C2W_u^m, C2W_u^m - C5Q_u^m$
- $C1W_u^m - C2W_u^m, C1C_u^m - C5Q_u^m, C2W_u^m - C5Q_u^m$

Bütün bu modeller karşılaştırılmış ve en ideal olarak çözülebilen denklem setinin $C2L_u^m - C1W_u^m, C5Q_u^m - C1W_u^m, C5Q_u^m - C2W_u^m$ gözlemleri kullanılarak elde edildiği model seçilmiştir. [44]'teki C1W, C2L, C2W ve C5Q gözlem sinyallerini içeren bu denklemlerin Eş. 3.38-3.40'taki sözde menzil gözlemlerinin farkları kullanılarak modellenmesi ile aşağıdaki denklem seti oluşturulmuştur.

$$C2L_u^m - C1W_u^m = 40.28 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m - c(\epsilon_{C1W;u} - \epsilon_{C2L;u}) - c(\epsilon_{C1W}^m - \epsilon_{C2L}^m) \quad (3.86)$$

$$C5Q_u^m - C1W_u^m = 40.28 \frac{f_1^2 - f_5^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_u^m - c(\epsilon_{C1W;u} - \epsilon_{C5Q;u}) - c(\epsilon_{C1W}^m - \epsilon_{C5Q}^m) \quad (3.87)$$

$$C5Q_u^m - C2W_u^m = 40.28 \frac{f_2^2 - f_5^2}{f_2^2 f_5^2} STEC_u^m - c(\epsilon_{C2W;u} - \epsilon_{C5Q;u}) - c(\epsilon_{C2W}^m - \epsilon_{C5Q}^m) \quad (3.88)$$

C1C, C1W ve C2W sinyalleri için uydu yanlışlıkları $\epsilon_{C1C}^m, \epsilon_{C1W}^m, \epsilon_{C2W}^m$, IGS analiz merkezi tarafından SINEX formatında, [37] yayınlanmaktadır.

$$C2L_u^m - C1W_u^m + c\epsilon_{C1W}^m = c_{12} STEC_u^m - c(\epsilon_{C1W;u} - \epsilon_{C2L;u}) + c\epsilon_{C2L}^m \quad (3.89)$$

$$C5Q_u^m - C1W_u^m + c\epsilon_{C1W}^m = c_{15} STEC_u^m - c(\epsilon_{C1W;u} - \epsilon_{C5Q;u}) + c\epsilon_{C5Q}^m \quad (3.90)$$

$$C5Q_u^m - C2W_u^m + c\epsilon_{C2W}^m = c_{25} STEC_u^m - c(\epsilon_{C2W;u} - \epsilon_{C5Q;u}) + c\epsilon_{C5Q}^m \quad (3.91)$$

Bilinmeyen sayısını azaltmak için alıcı yanlılıkları her bir frekans ikilisi için diferansiyel yanlılık olarak, $(\epsilon_{C1W;u} - \epsilon_{C2L;u}) = DCB_{12;WL;u}$, $(\epsilon_{C1W;u} - \epsilon_{C5Q;u}) = DCB_{15;WQ;u}$ ve $(\epsilon_{C2W;u} - \epsilon_{C5Q;u}) = DCB_{25;WQ;u}$ tanımlanmıştır.

$$C2L_u^m - C1W_u^m + c\epsilon_{C1W}^m = c_{12}STEC_u^m - cDCB_{12;WL;u} + c\epsilon_{C2L}^m \quad (3.92)$$

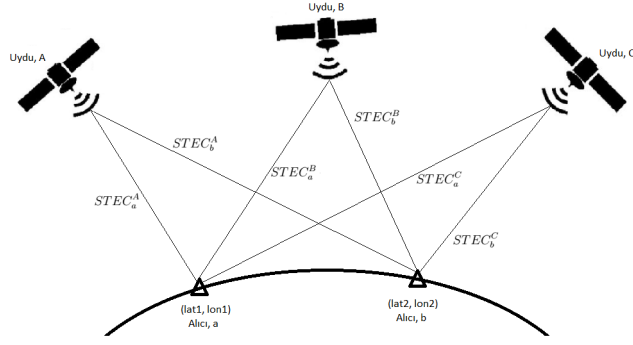
$$C5Q_u^m - C1W_u^m + c\epsilon_{C1W}^m = c_{15}STEC_u^m - cDCB_{15;WQ;u} + c\epsilon_{C5Q}^m \quad (3.93)$$

$$C5Q_u^m - C2W_u^m + c\epsilon_{C2W}^m = c_{25}STEC_u^m - cDCB_{25;WQ;u} + c\epsilon_{C5Q}^m \quad (3.94)$$

Çizelge 3.7: RINEX 3.03 C2L-C1W, C5Q-C1W ve C5Q-C2W sinyal gözlemleri için alıcı-uydu kombinasyonları

Uydu Sayısı (m)	Alıcı Sayısı (u)	Denklem Sayısı (3*m*u)	Bilinmeyen Sayısı (m*u+2*m+3*u)	Kerte
1	2	6	10	6
2	2	12	14	10
2	3	18	19	4
3	2	18	18	14
3	3	27	24	19
4	2	24	22	18
4	3	36	29	24
4	4	48	36	30

2 alıcı ve 3 uydu kombinasyonu için 18 denkleme karşılık 18 bilinmeyenden oluşan bir doğrusal denklem sistemi, $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ elde edilir. Gerçek zamanlı ETEİ kestirimleri için, bu çalışma kapsamında Eş. 3.92-3.94'teki sistem 2 alıcı ve 3 uydu için modellenerek kullanılmıştır.



Şekil 3.4: 2 Alıcı-3 Uydu YKS ETEİ Kestirim Modeli

İlk alıcı ve uydular arasındaki denklemler:

$$C2L_a^A - C1W_a^A + c\epsilon_{C1W}^A = c_{12}STEC_a^A - cDCB_{12;WL;a} + c\epsilon_{C2L}^A \quad (3.95)$$

$$C5Q_a^A - C1W_a^A + c\epsilon_{C1W}^A = c_{15}STEC_a^A - cDCB_{15;WQ;a} + c\epsilon_{C5Q}^A \quad (3.96)$$

$$C5Q_a^A - C2W_a^A + c\epsilon_{C2W}^A = c_{25}STEC_a^A - cDCB_{25;WQ;a} + c\epsilon_{C5Q}^A \quad (3.97)$$

$$C2L_a^B - C1W_a^B + c\epsilon_{C1W}^B = c_{12}STEC_a^B - cDCB_{12;WL;a} + c\epsilon_{C2L}^B \quad (3.98)$$

$$C5Q_a^B - C1W_a^B + c\epsilon_{C1W}^B = c_{15}STEC_a^B - cDCB_{15;WQ;a} + c\epsilon_{C5Q}^B \quad (3.99)$$

$$C5Q_a^B - C2W_a^B + c\epsilon_{C2W}^B = c_{25}STEC_a^B - cDCB_{25;WQ;a} + c\epsilon_{C5Q}^B \quad (3.100)$$

$$C2L_a^C - C1W_a^C + c\epsilon_{C1W}^C = c_{12}STEC_a^C - cDCB_{12;WL;a} + c\epsilon_{C2L}^C \quad (3.101)$$

$$C5Q_a^C - C1W_a^C + c\epsilon_{C1W}^C = c_{15}STEC_a^C - cDCB_{15;WQ;a} + c\epsilon_{C5Q}^C \quad (3.102)$$

$$C5Q_a^C - C2W_a^C + c\epsilon_{C2W}^C = c_{25}STEC_a^C - cDCB_{25;WQ;a} + c\epsilon_{C5Q}^C \quad (3.103)$$

İkinci alıcı ve uydular arasındaki denklemler:

$$C2L_b^A - C1W_b^A + c\epsilon_{C1W}^A = c_{12}STEC_b^A - cDCB_{12;WL;b} + c\epsilon_{C2L}^A \quad (3.104)$$

$$C5Q_b^A - C1W_b^A + c\epsilon_{C1W}^A = c_{15}STEC_b^A - cDCB_{15;WQ;b} + c\epsilon_{C5Q}^A \quad (3.105)$$

$$C5Q_b^A - C2W_b^A + c\epsilon_{C2W}^A = c_{25}STEC_b^A - cDCB_{25;WQ;b} + c\epsilon_{C5Q}^A \quad (3.106)$$

$$C2L_b^B - C1W_b^B + c\epsilon_{C1W}^B = c_{12}STEC_b^B - cDCB_{12;WL;b} + c\epsilon_{C2L}^B \quad (3.107)$$

$$C5Q_b^B - C1W_b^B + c\epsilon_{C1W}^B = c_{15}STEC_b^B - cDCB_{15;WQ;b} + c\epsilon_{C5Q}^B \quad (3.108)$$

$$C5Q_b^B - C2W_b^B + c\epsilon_{C2W}^B = c_{25}STEC_b^B - cDCB_{25;WQ;b} + c\epsilon_{C5Q}^B \quad (3.109)$$

$$C2L_b^C - C1W_b^C + c\epsilon_{C1W}^C = c_{12}STEC_b^C - cDCB_{12;WL;b} + c\epsilon_{C2L}^C \quad (3.110)$$

$$C5Q_b^C - C1W_b^C + c\epsilon_{C1W}^C = c_{15}STEC_b^C - cDCB_{15;WQ;b} + c\epsilon_{C5Q}^C \quad (3.111)$$

$$C5Q_b^C - C2W_b^C + c\epsilon_{C2W}^C = c_{25}STEC_b^C - cDCB_{25;WQ;b} + c\epsilon_{C5Q}^C \quad (3.112)$$

Denklem: 18

Bilinmeyen: 18

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} STEC_a^A \\ STEC_a^B \\ STEC_a^C \\ STEC_b^A \\ STEC_b^B \\ STEC_b^C \\ DCB_{12;WL;a} \\ DCB_{12;WL;b} \\ DCB_{15;WQ;a} \\ DCB_{15;WQ;b} \\ DCB_{25;WQ;a} \\ DCB_{25;WQ;b} \\ \epsilon_{C2L}^A \\ \epsilon_{C2L}^B \\ \epsilon_{C2L}^C \\ \epsilon_{C5Q}^A \\ \epsilon_{C5Q}^B \\ \epsilon_{C5Q}^C \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} c_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ c_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & c_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & c_{12} & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 & c_{12} & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{12} & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{12} & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{15} & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} C2L_a^A - C1W_a^A + c\epsilon_{C1W}^A \\ C5Q_a^A - C1W_a^A + c\epsilon_{C1W}^A \\ C5Q_a^A - C2W_a^A + c\epsilon_{C2W}^A \\ C2L_a^B - C1W_a^B + c\epsilon_{C1W}^B \\ C5Q_a^B - C1W_a^B + c\epsilon_{C1W}^B \\ C5Q_a^B - C2W_a^B + c\epsilon_{C2W}^B \\ C2L_a^C - C1W_a^C + c\epsilon_{C1W}^C \\ C5Q_a^C - C1W_a^C + c\epsilon_{C1W}^C \\ C5Q_a^C - C2W_a^C + c\epsilon_{C2W}^C \\ C2L_b^A - C1W_b^A + c\epsilon_{C1W}^A \\ C5Q_b^A - C1W_b^A + c\epsilon_{C1W}^A \\ C5Q_b^A - C2W_b^A + c\epsilon_{C2W}^A \\ C2L_b^B - C1W_b^B + c\epsilon_{C1W}^B \\ C5Q_b^B - C1W_b^B + c\epsilon_{C1W}^B \\ C5Q_b^B - C2W_b^B + c\epsilon_{C2W}^B \\ C2L_b^C - C1W_b^C + c\epsilon_{C1W}^C \\ C2L_b^C - C1W_b^C + c\epsilon_{C1W}^C \\ C2L_b^C - C2W_b^C + c\epsilon_{C2W}^C \end{bmatrix}$$

Modellenmiş olan sistem aynı anda aynı uydulardan gözlem alabilen, birbirlerine yakın yerleştirilmiş olan alıcılar seçilerek aşağıdaki şekilde çözülmüştür.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (3.113)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^\dagger \mathbf{b} \quad (3.114)$$

Bu tezde önerilen ETEİ kestirim yöntemi farklı enlem bölgelerindeki alıcıların, yılın farklı zamanlarındaki verileri için analiz edilmiştir. Her alıcıda aynı YKS gözlemleri mevcut olmadığı için bazı alıcı setlerinde C1W yerine C1C; C2L yerine C2X, C5Q yerine C5X sözde menzil gözlemleri kullanılmıştır. Sonuçlar gürbüzlüğü [18], [19], [2] ve [25]'teki çalışmalar ile ortaya konulmuş olan IONOLAB-STEAC algoritmasının çıktıları ile karşılaştırılmıştır.

2 alıcı-3 uydu kullanılarak geliştirilen ETEİ hesaplama yönteminde, ETEİ'nin yanı sıra diferansiyel alıcı yanlılıkları $DCB_{12;WL;u}$, $DCB_{15;WQ;u}$, $DCB_{25;WQ;u}$ ve uydu yanlılıkları ϵ_{C2L}^m , ϵ_{C5Q}^m da hesaplanmaktadır; hesaplanan bu değerler farklı alıcı ve uydular için Bölüm 4'te incelenmiştir.

3.2 Alıcı ve Uydu Yanlılıklarının Kestirimi

2 alıcı 3 uydu yöntemi kullanılarak L2 ve L5 frekanslarında uydu yanlılıkları ve L1-L2, L1-L5, L2-L5 frekansları arasında diferansiyel alıcı yanlılıklarının kestirimi yapılabilmektedir. RINEX 2 formatında yayınlanan P1, P2 sinyalleri için CODE analiz merkezi, diferansiyel uydu yanlılıklarını 1 aylık süre ile yayınlamaktadır. Bu sebeple 2 frekanslı ETEİ kestirim çalışmalarında uydu yanlılıklarının 1 ay boyunca aynı olduğu varsayımı yapılmıştır. SINEX formatında yayınlanan sinyal bazlı uydu yanlılıkları ise 1 günlük olarak yayınlanmaktadır. Bu çalışmadaki denklem seti anlık ETEİ kestirimi yapabilmek için 30 saniye aralıklarla sonuç ürettiğinden yanlılıklar da 30 saniye çözünürlüklü ve günlük olarak kestirilmektedir.

Bu tezde mevcut ETEİ kestirimlerini çoklu alıcı-uydu setleri için kullanarak yeni bir alıcı ve uydu yanlılık kestirim yöntemi geliştirilmiştir. Bu tez kapsamında IONOLAB-STECC'in faz gözlemlerini kullanarak elde ettiği ETEİ değerleri denklem setine dahil edilmiştir ve aşağıdaki denklem seti oluşturulmuştur.

$$C2L_u^m - C1W_u^m + c\epsilon_{C1W}^m - c_{12}STEC_u^m = c\epsilon_{C2L}^m - cDCB_{12;WL;u} \quad (3.115)$$

$$C5Q_u^m - C1W_u^m + c\epsilon_{C1W}^m - c_{15}STEC_u^m = c\epsilon_{C5Q}^m - cDCB_{15;WQ;u} \quad (3.116)$$

$$C5Q_u^m - C2W_u^m + c\epsilon_{C2W}^m - c_{25}STEC_u^m = c\epsilon_{C5Q}^m - cDCB_{25;WQ;u} \quad (3.117)$$

Yanlılıkların kestirilmesi için oluşturulan bu yeni denklem seti 1 alıcı ve 3 uydu için genişletildiğinde 9 bilinmeyenli 9 denklem elde edilir.

$$C2L_a^A - C1W_a^A + c\epsilon_{C1W}^A - c_{12}STEC_a^A = c\epsilon_{C2L}^A - cDCB_{12;WL;a} \quad (3.118)$$

$$C5Q_a^A - C1W_a^A + c\epsilon_{C1W}^A - c_{15}STEC_a^A = c\epsilon_{C5Q}^A - cDCB_{15;WQ;a} \quad (3.119)$$

$$C5Q_a^A - C2W_a^A + c\epsilon_{C2W}^A - c_{25}STEC_a^A = c\epsilon_{C5Q}^A - cDCB_{25;WQ;a} \quad (3.120)$$

$$C2L_a^B - C1W_a^B + c\epsilon_{C1W}^B - c_{12}STEC_a^B = c\epsilon_{C2L}^B - cDCB_{12;WL;a} \quad (3.121)$$

$$C5Q_a^B - C1W_a^B + c\epsilon_{C1W}^B - c_{15}STEC_a^B = c\epsilon_{C5Q}^B - cDCB_{15;WQ;a} \quad (3.122)$$

$$C5Q_a^B - C2W_a^B + c\epsilon_{C2W}^B - c_{25}STEC_a^B = c\epsilon_{C5Q}^B - cDCB_{25;WQ;a} \quad (3.123)$$

$$C2L_a^C - C1W_a^C + c\epsilon_{C1W}^C - c_{12}STEC_a^C = c\epsilon_{C2L}^C - cDCB_{12;WL;a} \quad (3.124)$$

$$C5Q_a^C - C1W_a^C + c\epsilon_{C1W}^C - c_{15}STEC_a^C = c\epsilon_{C5Q}^C - cDCB_{15;WQ;a} \quad (3.125)$$

$$C5Q_a^C - C2W_a^C + c\epsilon_{C2W}^C - c_{25}STEC_a^C = c\epsilon_{C5Q}^C - cDCB_{25;WQ;a} \quad (3.126)$$

Bu denklem setinin katsayı matrisinin tersi alınamamaktadır. Sözde tersi alınarak sistem çözülebilir.

3.3 Faz Gözlemleri Kullanılarak ETEİ Kestirimi

Şekil 3.4'teki 2 alıcı 3 uydudan oluşan ETEİ kestirim modeli faz gözlemlerine de uygulanabilir. $L1C_u^m - L2L_u^m$, $L1C_u^m - L5Q_u^m$, $L2W_u^m - L5Q_u^m$ gözlemleri kullanılarak sözde menzil gözlemlerinin kullanıldığı yönteme benzer olarak aşağıdaki denklem seti oluşturulmuştur.

$$L1C_u^m - L2L_u^m = 40.28 \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2} STEC_u^m + c(\epsilon_{L1C;u} - \epsilon_{L2L;u}) + c(\epsilon_{L1C}^m - \epsilon_{L2L}^m) + \lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m \quad (3.127)$$

$$L1C_u^m - L5Q_u^m = 40.28 \frac{f_5^2 - f_1^2}{f_1^2 f_5^2} STEC_u^m + c(\epsilon_{L1C;u} - \epsilon_{L5Q;u}) + c(\epsilon_{L1C}^m - \epsilon_{L5Q}^m) + \lambda_1 N_1^m - \lambda_5 N_5^m \quad (3.128)$$

$$L2W_u^m - L5Q_u^m = 40.28 \frac{f_5^2 - f_2^2}{f_2^2 f_5^2} STEC_u^m + c(\epsilon_{L2W;u} - \epsilon_{L5Q;u}) + c(\epsilon_{L2W}^m - \epsilon_{L5Q}^m) + \lambda_2 N_2^m - \lambda_5 N_5^m \quad (3.129)$$

L1W, L1C ve L2W sinyalleri için uydu yanlılıkları ϵ_{L1W}^m , ϵ_{L1C}^m , ϵ_{L2W}^m , IGS analiz merkezi tarafından SINEX formatında, [37] yayınlanmaktadır. Alıcı yanlılıkları her bir sinyal ikilisi için diferansiyel yanlılık olarak $(\epsilon_{L1C;u} - \epsilon_{L2L;u}) = DCB_{L;12;CL;u}$, $(\epsilon_{L1C;u} - \epsilon_{L5Q;u}) = DCB_{L;15;CQ;u}$ ve $(\epsilon_{L2W;u} - \epsilon_{L5Q;u}) = DCB_{L;25;WQ;u}$ tanımlanmıştır. İlk faz bilinmezlikleri de diferansiyel olarak $(\lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m) = \Delta N_{12}^m$, $(\lambda_1 N_1^m - \lambda_5 N_5^m) = \Delta N_{15}^m$, $(\lambda_2 N_2^m - \lambda_5 N_5^m) = \Delta N_{25}^m$ tanımlanmıştır. [41]'deki çalışmada faz kopmalarının olmadığı bir zaman dilimi boyunca sözde menzil ve faz ölçümleri arasındaki farkın ortalaması bir dayanak değeri olarak tanımlanmış ve faz ölçümlerine eklenerek faz kopmaları giderilmiştir. Bu çalışmada da ilk faz belirsizliklerini gidermek için bu dayanak değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [41].

$$B_{12} = \frac{1}{N_{me}} \sum_{n_{me}}^{N_{me}} [(C2L_u^m(n_{me}) - C1C_u^m(n_{me})) - (L1C_u^m(n_{me}) - L2L_u^m(n_{me}))] \approx \Delta N_{12}^m \quad (3.130)$$

$$B_{15} = \frac{1}{N_{me}} \sum_{n_{me}}^{N_{me}} [(C5Q_u^m(n_{me}) - C1C_u^m(n_{me})) - (L1C_u^m(n_{me}) - L5Q_u^m(n_{me}))] \approx \Delta N_{15}^m \quad (3.131)$$

$$B_{25} = \frac{1}{N_{me}} \sum_{n_{me}}^{N_{me}} [(C5Q_u^m(n_{me}) - C2W_u^m(n_{me})) - (L2W_u^m(n_{me}) - L5Q_u^m(n_{me}))] \approx \Delta N_{25}^m \quad (3.132)$$

Dayanak değerleri ve diferansiyel yanlılıklar yerine yazıldığında aşağıdaki denklem seti elde edilir.

$$L1C_u^m - L2L_u^m - c\epsilon_{L1C}^m - B_{12} = -c_{12}STEC_u^m + cDCB_{L;12;CL;u} - c\epsilon_{L2L}^m \quad (3.133)$$

$$L1C_u^m - L5Q_u^m - c\epsilon_{L1C}^m - B_{15} = -c_{15}STEC_u^m + cDCB_{L;15;CQ;u} - c\epsilon_{L5Q}^m \quad (3.134)$$

$$L2W_u^m - L5Q_u^m - c\epsilon_{L2W}^m - B_{25} = -c_{25}STEC_u^m + cDCB_{L;25;WQ;u} - c\epsilon_{L5Q}^m \quad (3.135)$$

2 alıcı ve 3 uydu kombinasyonu için 18 denkleme karşılık 18 bilinmeyenden oluşan bir doğrusal denklem sistemi, $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ elde edilir.

Modellenmiş olan sistem 2 alıcı ve 3 uydu için aynı anda aynı uydulardan gözlem alabilen, birbirlerine yakın yerleştirilmiş olan alıcılar seçilerek çözülmüştür.

4. İYONKÜRE ETEİ KESTİRİM ANALİZLERİ

Bu çalışmada YKS sözde menzil gözlemlerinin kullanıldığı mevcut iyonküre ETEİ kestirimlerinden daha az gürültülü sonuçlara ulaşmak için yeni nesil YKS sinyallerini kullanan ETEİ kestirim algoritmaları geliştirilmiştir. 2 alıcının 3 uydudan aldığı sözde menzil gözlemleri kullanılarak Bölüm 3'te anlatılan yöntem ile ETEİ kestirimleri yapılmaktadır. Bu kestirim sonuçlarını analiz etmek için aşağıdaki yöntemler geliştirilmiştir.

- U_2M_3/TUY ETEİ Algoritması: 2 alıcının aynı anda gördüğü tüm uydular arasından 3 uydu seçilerek, o an için söz konusu alıcılar ile uydular arasındaki ETEİ değeri hesaplanır.
- $D-U_2M_3/TUY$ ETEİ Algoritması: U_2M_3/TUY ETEİ algoritması kullanılarak hesaplanan ETEİ sonuçları uydu setinin değiştiği anlara göre segmentlere bölünür. IONOLAB-STEÇ sonuçları kullanılarak uydu setlerine özgü denkleştirme değerleri hesaplanır. Denkleştirme değeri her bir ETEİ segmenti için C olarak, IONOLAB TEİ ($STEC_{ion,u}^m$) verileri kullanılarak N zaman aralıklarında aşağıdaki şekilde hesaplanır ve bu değerler ilgili kısımlara eklenerek $STEC_{u,E}^m(n)$ denkleştirilmiş ETEİ değerlerine ulaşılır.

$$C = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (STEC_{ion,u}^m(n) - STEC_u^m(n)) \quad (4.1)$$

$$STEC_{u,E}^m(n) = C + STEC_u^m(n) \quad (4.2)$$

- U_2M_3/AUY ETEİ Algoritması: 2 alıcının aynı anda gördüğü ve yükselme açısı iki alıcı için de 30 dereceden fazla olan uydular arasından 3 uydu seçilerek, o an için söz konusu alıcılar ile uydular arasındaki ETEİ değeri hesaplanır.
- $D-U_2M_3/AUY$ ETEİ Algoritması: U_2M_3/AUY ETEİ algoritması kullanılarak hesaplanan ETEİ sonuçları uydu setinin değiştiği anlara göre segmentlere bölünür. IONOLAB-STEÇ sonuçları kullanılarak uydu setlerine özgü denkleştir-

tirme değerleri hesaplanır ve bu değerler ilgili segmentlere eklenerek aktif uyduların kullanıldığı denkleştirilmiş ETEİ değeri hesaplanır.

Bu tez kapsamında incelenen alıcılar izelge 4.1’de verilmiştir. Analizler 2019-2020 yıllarındaki gözlemleri kapsamaktadır.

Çizelge 4.1: Analizlerde kullanılan YKS alıcıları

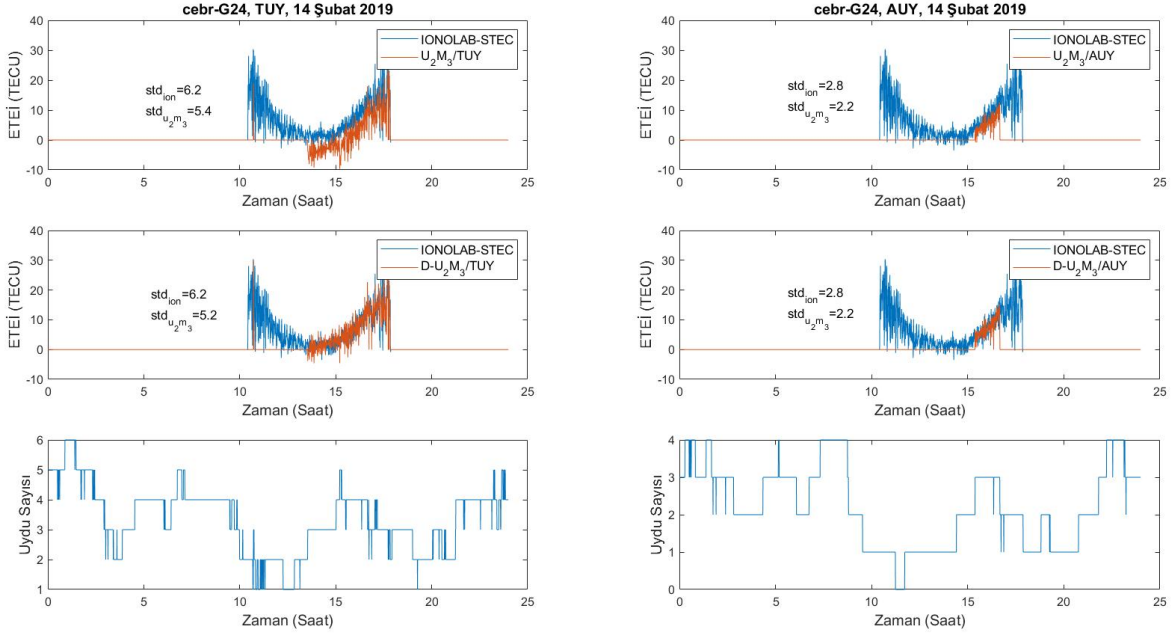
YKS İstasyonu	YKS Alıcı Kodu	Enlem	Boylam	Bölge
Brüksel, Belçika	brux	50.79°	4.35°	Orta Enlem
Cebreros, İspanya	cebr	40.45°	-4.37°	Orta Enlem
Kiruna, İsveç	kir0	67.88°	21.06°	Yüksek Enlem
Kiruna, İsveç	kiru	67.86°	20.97°	Yüksek Enlem
Kourou, Fransız Guiana	koug	5.09°	-52.64°	Ekvatorial
Kourou, Fransız Guiana	kour	5.25°	-52.81°	Ekvatorial
Onsala, İsveç	onsa	57.39°	11.93°	Yüksek Enlem
Redu, Belçika	redu	50.00°	5.15°	Orta Enlem
La Misere, Seyşeller	sey2	-4.67°	55.48°	Ekvatorial
Pointe Laure, Seyşeller	seyg	-4.68°	55.53°	Ekvatorial
Boras, İsveç	spt0	57.72°	12.89°	Yüksek Enlem
Villafranca, İspanya	vill	40.44°	-3.95°	Orta Enlem

Çizelge 4.1’de verilen alıcılar arasından aynı gözlemleri yayınlayan ve aynı anda aynı uyduları görebilen alıcılardan izelge 4.2’deki alıcı analiz setleri oluşturulmuştur.

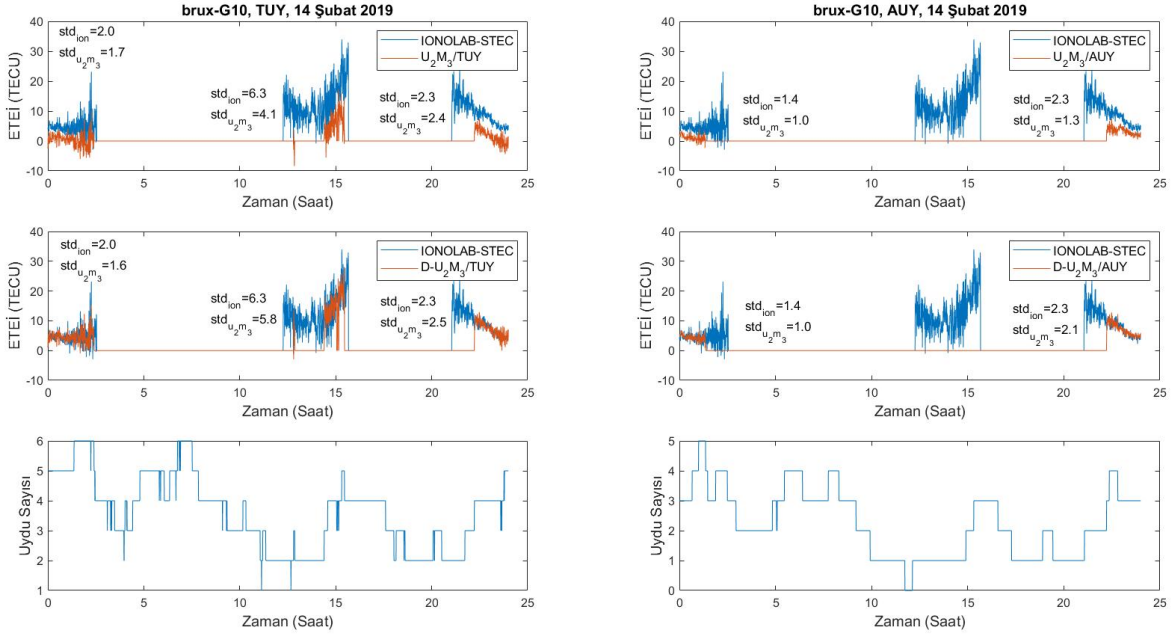
Çizelge 4.2: Alıcı analiz setleri

1. YKS Alıcısı	2. YKS Alıcısı	YKS İstasyonları Arasındaki Mesafe
cebr	vill	35.25 km
kiru	kir0	4.51 km
koug	kour	21.20 km
onsa	spt0	67.75 km
redu	brux	104.20 km
sey2	seyg	5.80 km

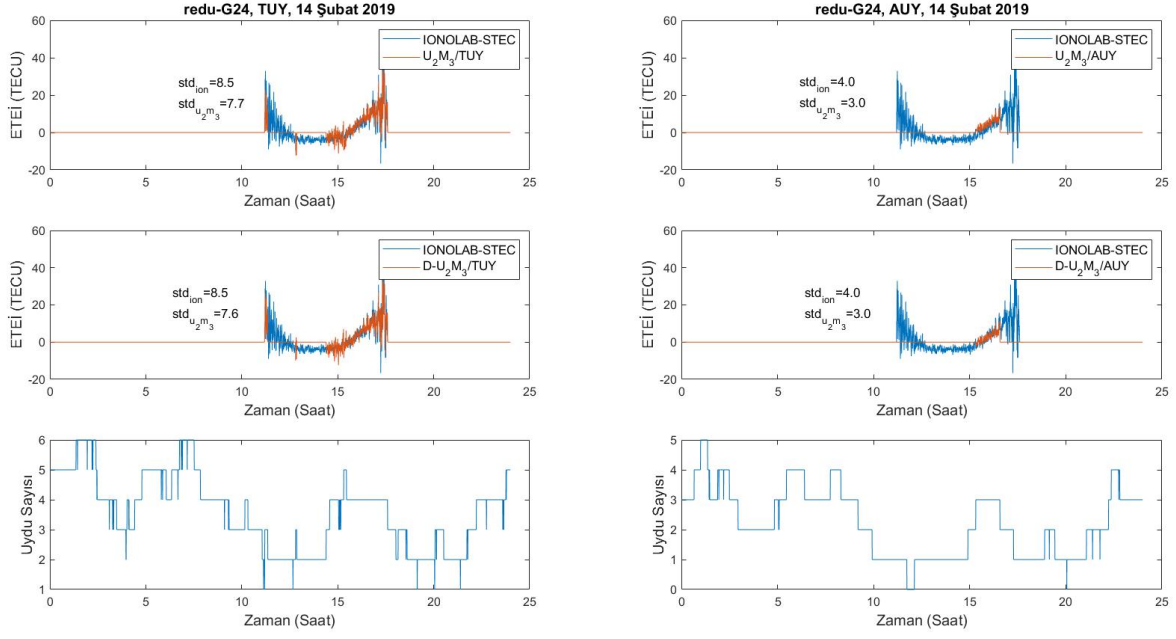
İyonkürenin sakin günleri 14 şubat 2019, 8 Kasım 2019, 11 şubat 2020, [46] için U_2M_3/TUY , $D-U_2M_3/TUY$, U_2M_3/AUY ve $D-U_2M_3/AUY$ ile hesaplanan 1 günlük ETEİ kestirimleri orta ve yüksek enlem bölgelerindeki ve ekvatorial bölgedeki istasyonlar için IONOLAB-STEÇ algoritmasının sonuçları ile şekil 4.1-4.9’da karşılaştırılmıştır.



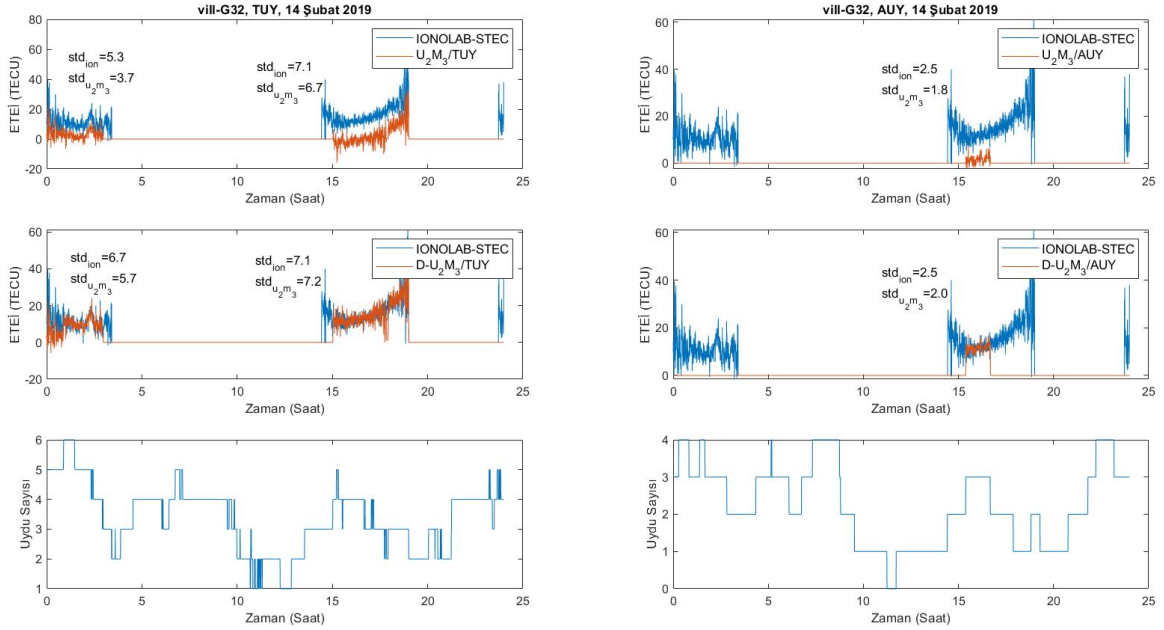
Şekil 4.1: Orta enlem bölgesi Cebreros istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü



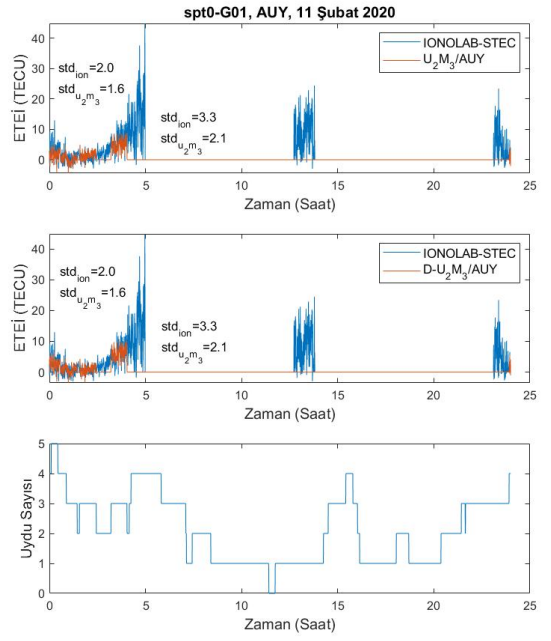
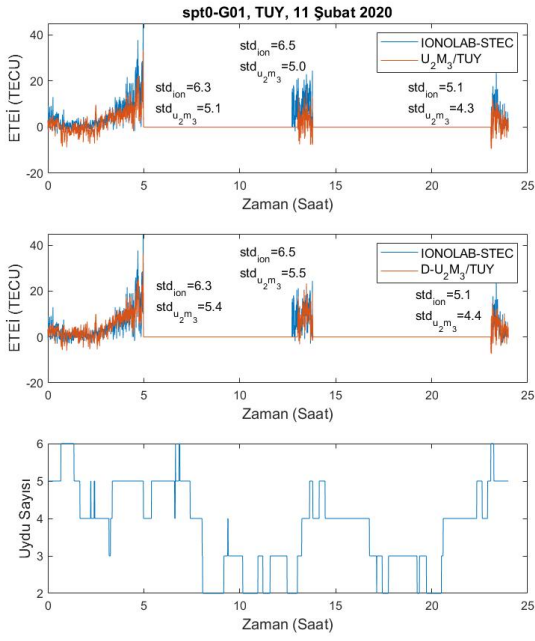
Şekil 4.2: Orta enlem bölgesi Brüksel istasyonu-G10 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü



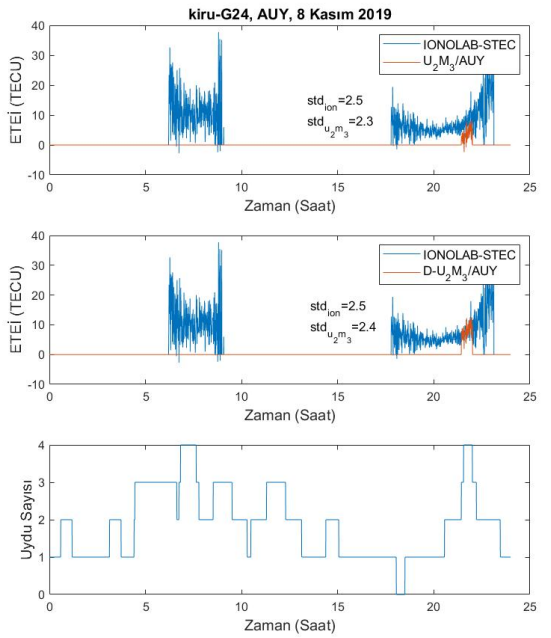
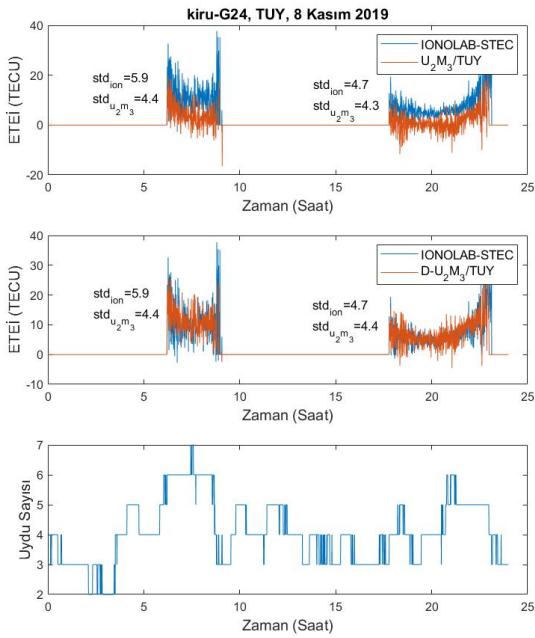
Şekil 4.3: Orta enlem bölgesi Redu istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü



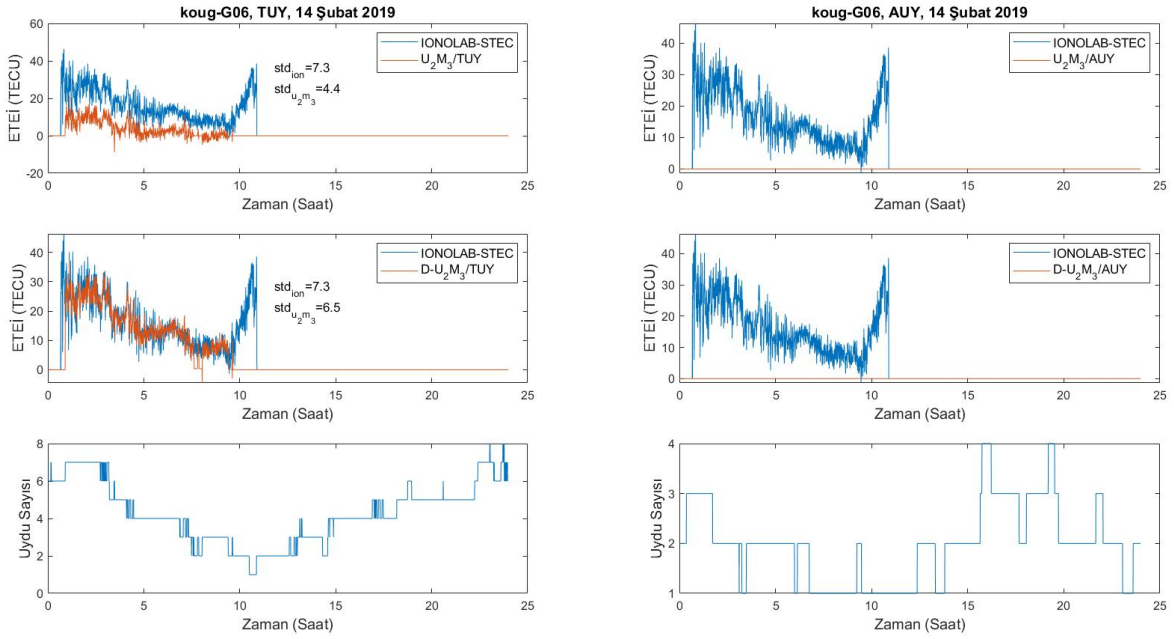
Şekil 4.4: Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G32 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü



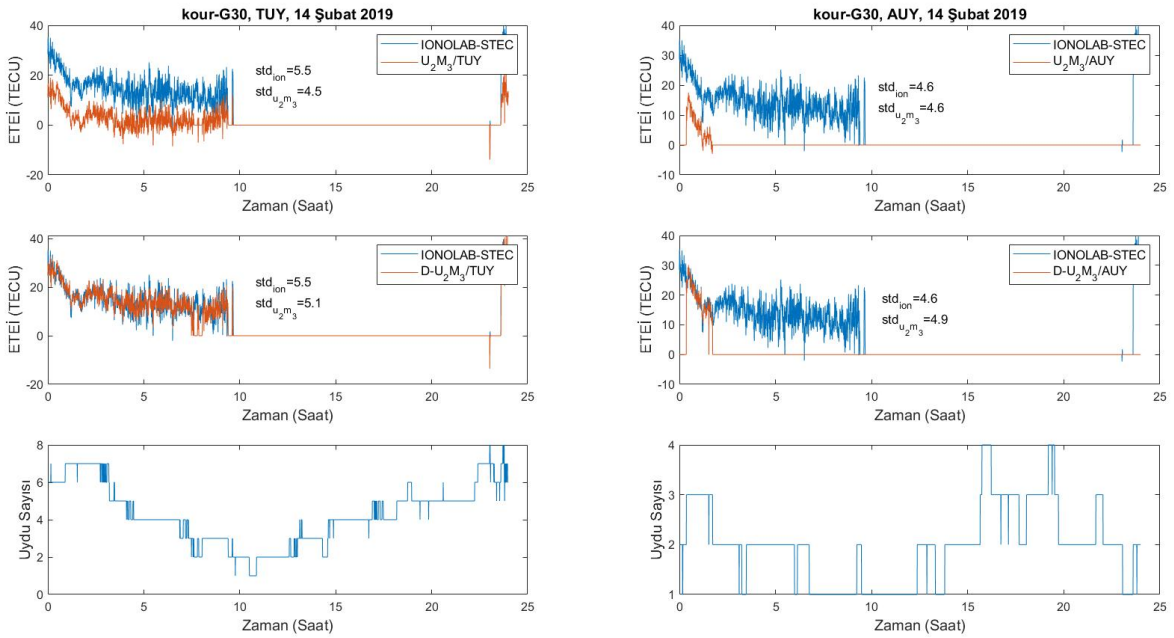
Şekil 4.5: Yüksek enlem bölgesi Boras istasyonu-G01 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü



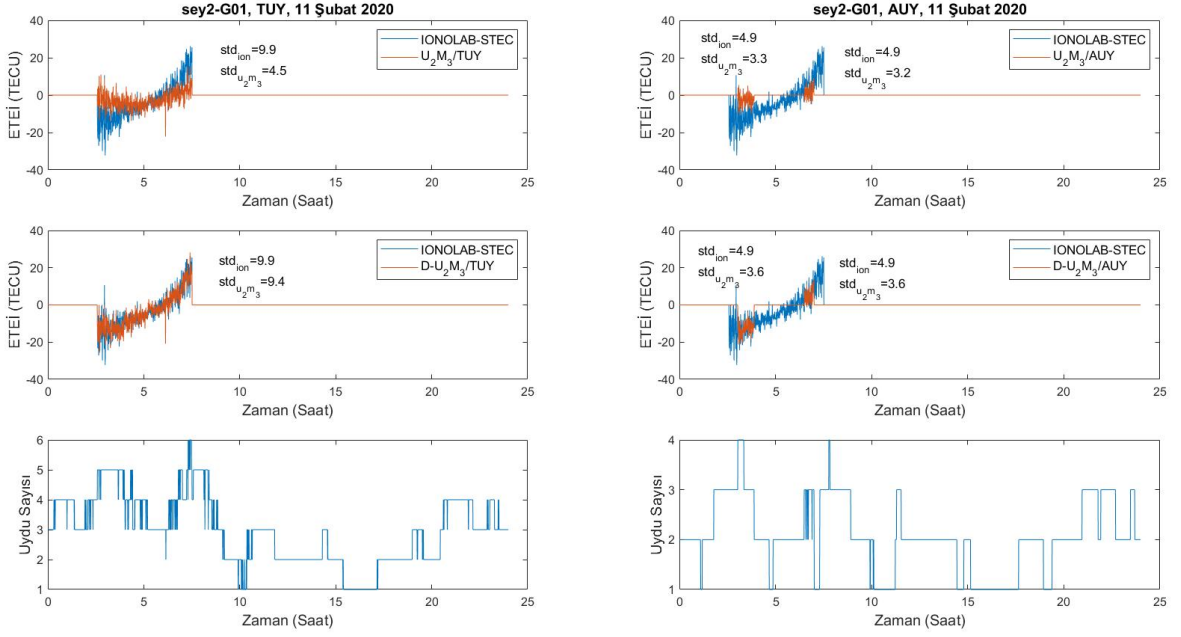
Şekil 4.6: Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kiru) istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü



Şekil 4.7: Ekvatorial bölge Kourou (koug) istasyonu-G06 uydusu ETEİ kestirimi, ionkürenin sakin günü



Şekil 4.8: Ekvatorial bölge Kourou (kour) istasyonu-G30 uydusu ETEİ kestirimi, ionkürenin sakin günü



Şekil 4.9: Ekvatorial bölge La Misere istasyonu-G01 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü

ETEİ kestirimlerinin IONOLAB-STEÇ sonuçları ile farklılık değerleri Eş. 4.3'teki gibi hesaplanmıştır. Eş. 4.3'te $\tilde{x}_{U_2M_3}$ 2 alıcı-3 uydu yöntemleri ile hesaplanan ETEİ vektörü ve \tilde{x}_{ion} IONOLAB-STEÇ ile hesaplanan ETEİ vektörü olarak tanımlanmıştır.

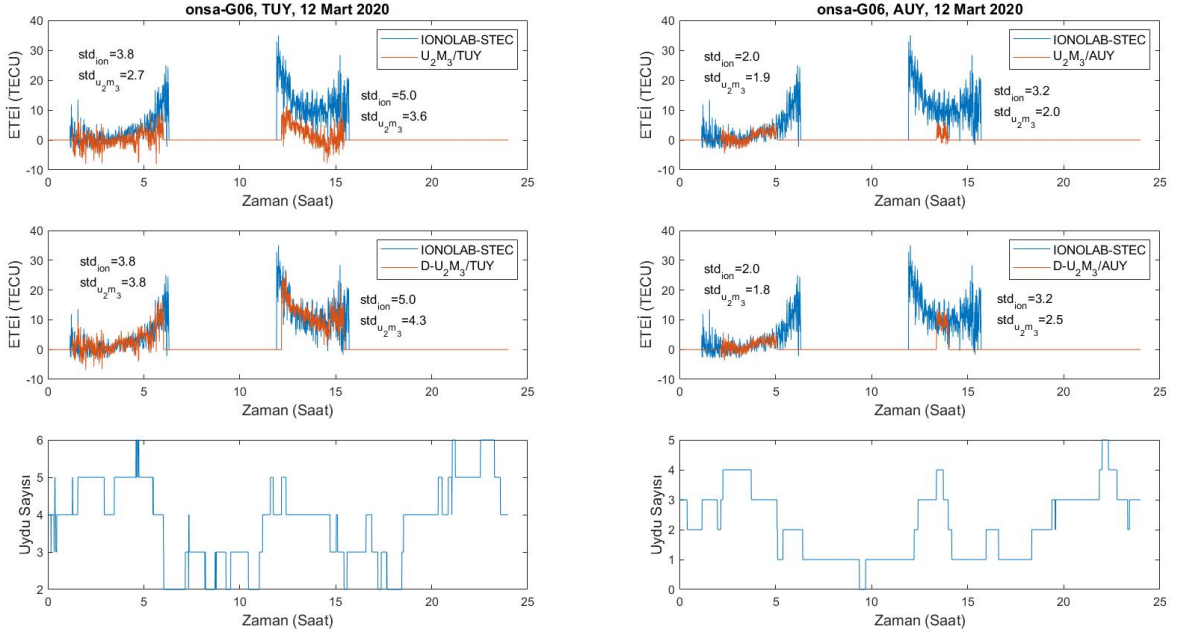
$$Err_{U_2M_3} = \frac{\sum_{n=1}^N |\tilde{x}_{U_2M_3}(n) - \tilde{x}_{ion}(n)|^2}{|\tilde{x}_{ion}(n)|_2} \quad (4.3)$$

Şekil 4.1-4.9'daki iyonkürenin sakin günleri için yapılan kestirimlerin IONOLAB-STEÇ ile farklılık değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

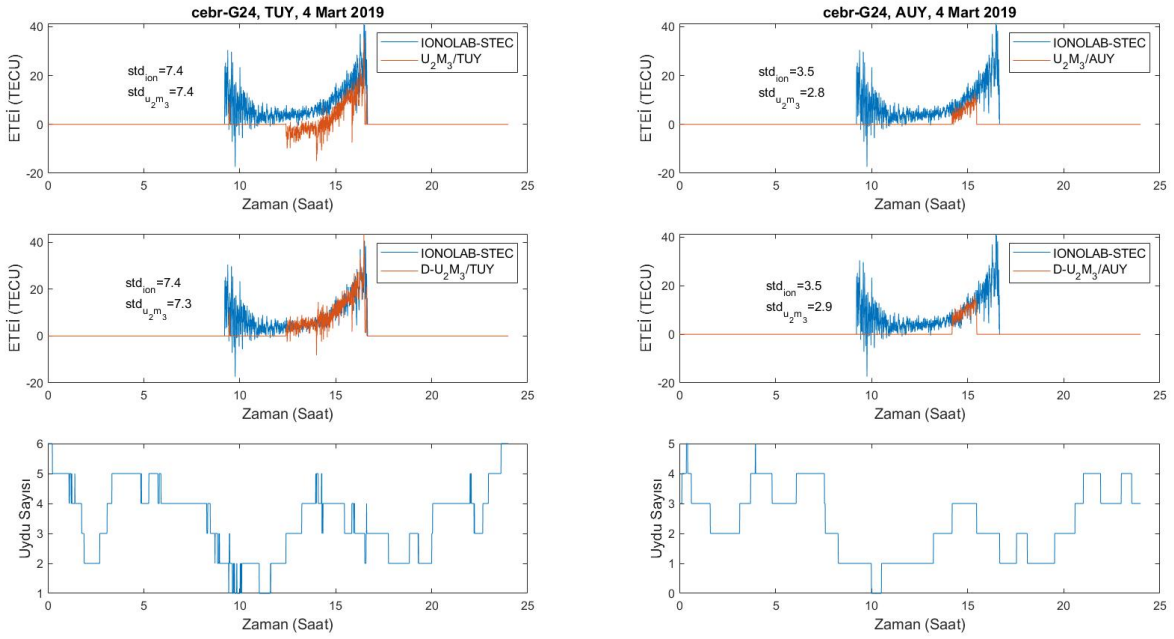
Çizelge 4.3: İyonkürenin sakin günleri için ETEİ kestirimlerinin IONOLAB-STEÇ ile farklılıkları

YKS İstasyonu	YKS Uydusu	Gün	$Err_{U_2M_3}$ TUY	$Err_{U_2M_3}$ D- U_2M_3 /TUY	$Err_{U_2M_3}$ AUÝ	$Err_{U_2M_3}$ D- U_2M_3 /AUÝ
cebr	G24	14.02.2019	0.34	0.09	0.09	0.03
brux	G10	14.02.2019	0.51	0.07	0.36	0.03
redu	G24	14.02.2019	0.14	0.12	0.22	0.09
vill	G32	14.02.2019	0.57	0.20	0.74	0.02
spt0	G01	11.02.2020	0.27	0.14	0.23	0.17
kiru	G24	08.11.2019	0.48	0.14	0.32	0.04
koug	G06	14.02.2019	0.51	0.04	-	-
kour	G30	14.02.2019	0.55	0.03	0.43	0.01
sey2	G01	11.02.2020	0.62	0.17	0.64	0.12

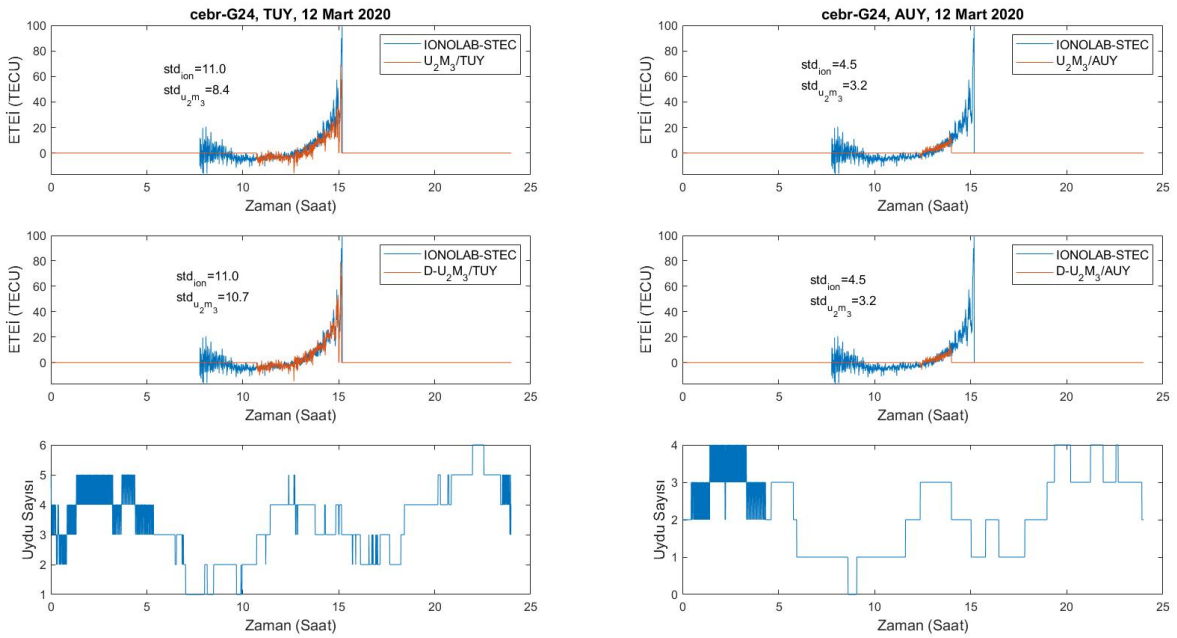
İyonkürenin pozitif bozulmalı günü 4 Mart 2019, [46] için U_2M_3 /TUY, D- U_2M_3 /TUY, U_2M_3 /AUÝ ve D- U_2M_3 /AUÝ ile hesaplanan 1 günlük ETEİ kestirimleri orta ve yüksek enlem bölgelerindeki ve ekvatorial bölgedeki istasyonlar için IONOLAB-STEÇ algoritmasının sonuçları ile Şekil 4.10-4.16'da karşılaştırılmıştır.



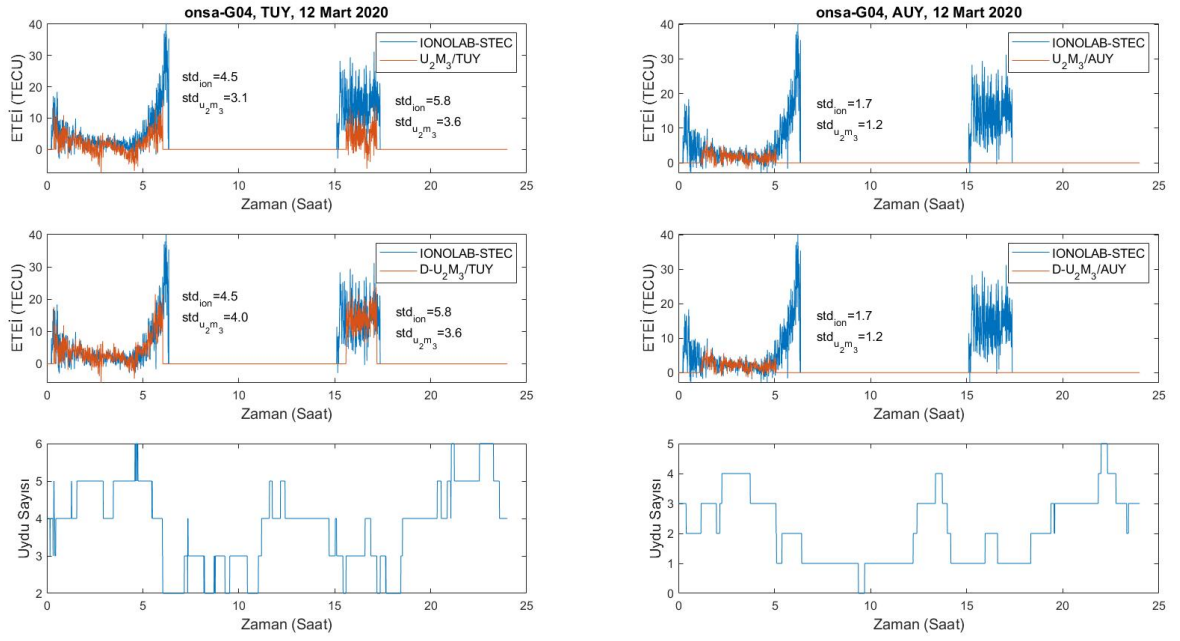
Şekil 4.10: Yüksek enlem bölgesi Onsala istasyonu-G06 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü



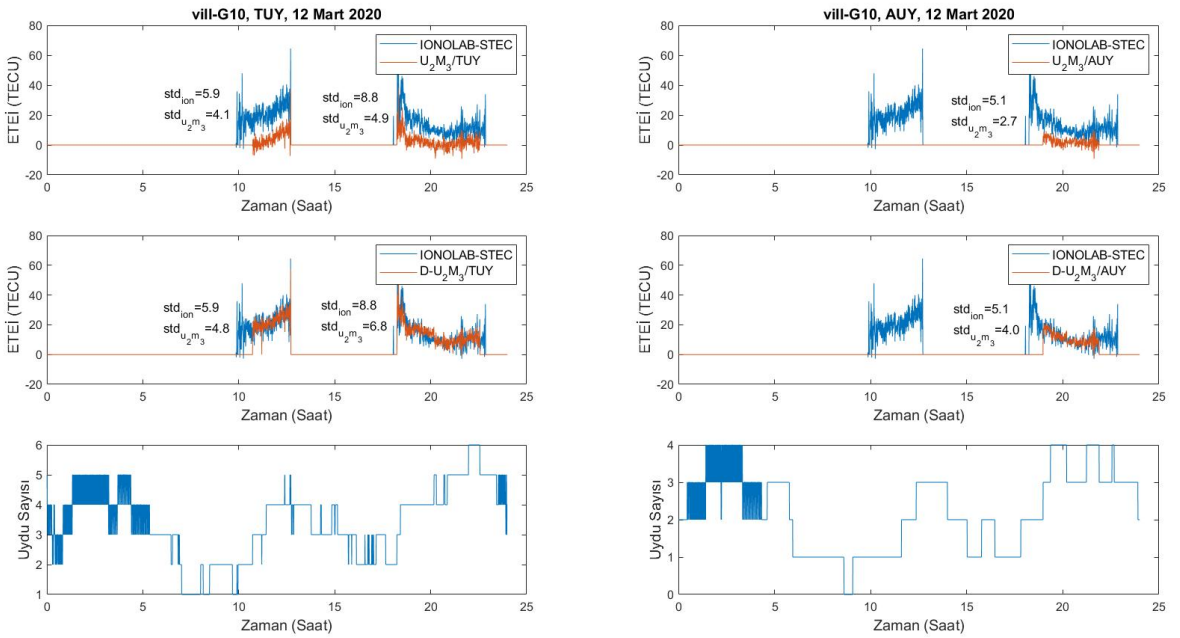
Şekil 4.11: Orta enlem bölgesi Cebreros istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü, 4 Mart 2019



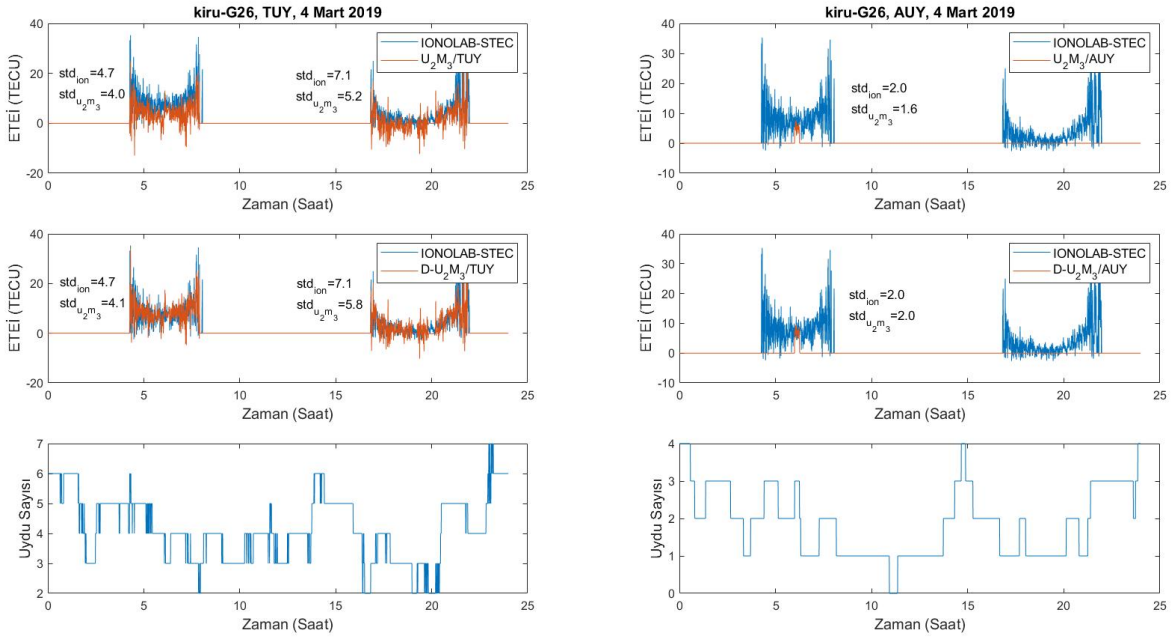
Şekil 4.12: Orta enlem bölgesi Cebreros istasyonu-G24 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü, 12 Mart 2020



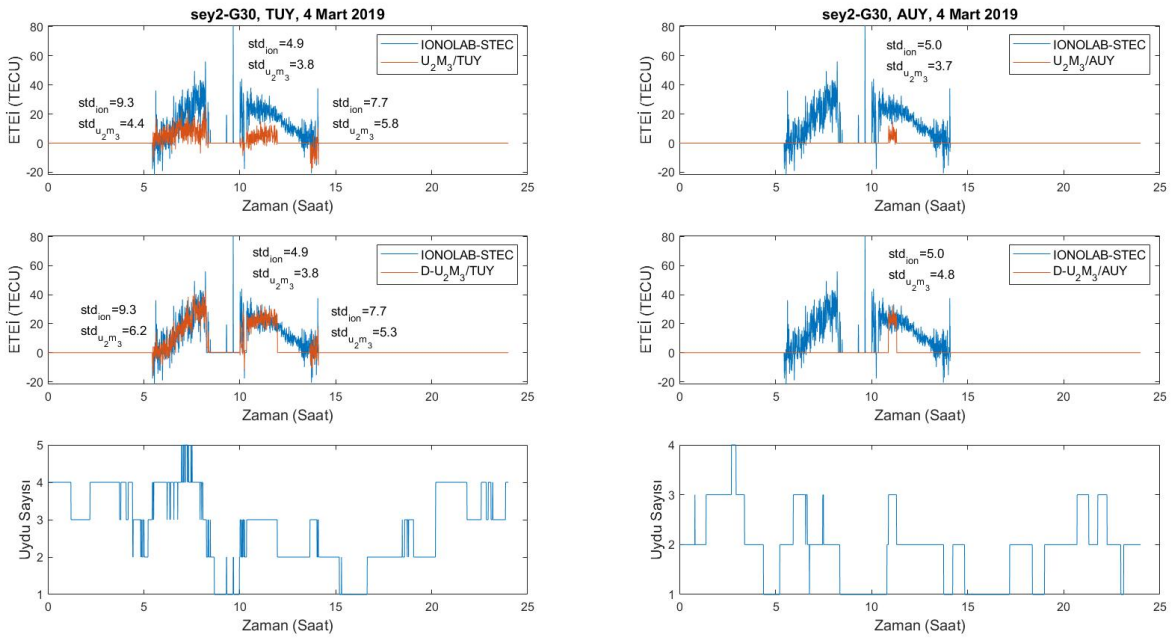
Şekil 4.13: Yüksek enlem bölgesi Onsala istasyonu-G04 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü



Şekil 4.14: Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G10 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü



Şekil 4.15: Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kiru) istasyonu-G26 uydusu ETEİ kes-
tirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü

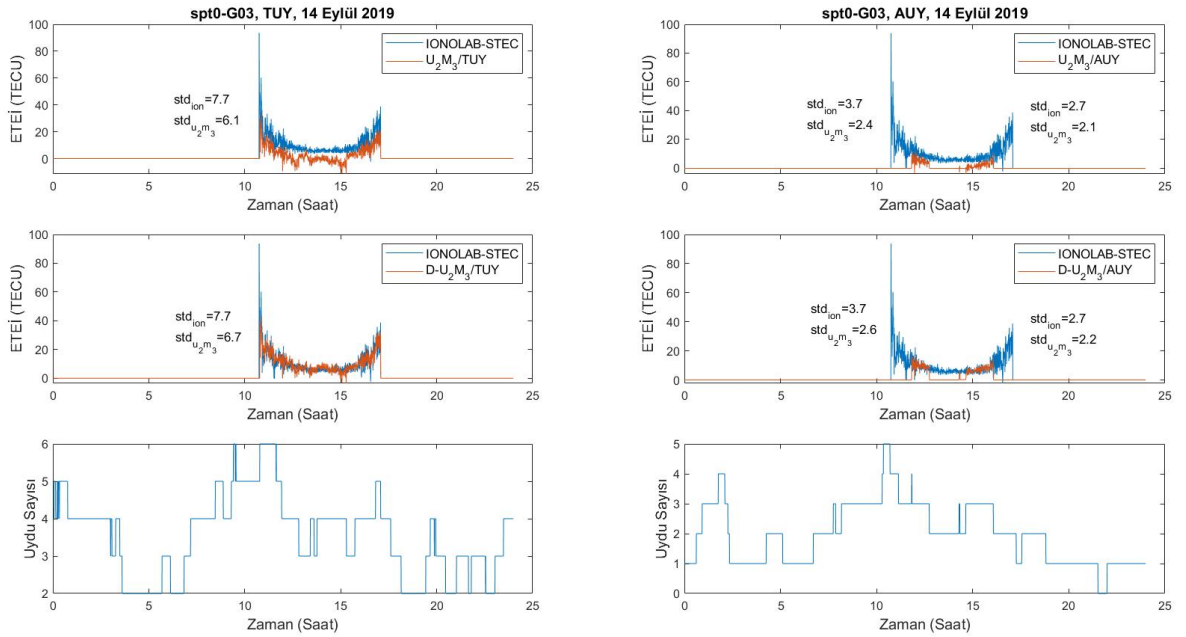


Şekil 4.16: Ekvatorial bölge La Misere istasyonu-G30 ETEİ kestirimi, iyonkürenin
pozitif bozulmalı günü

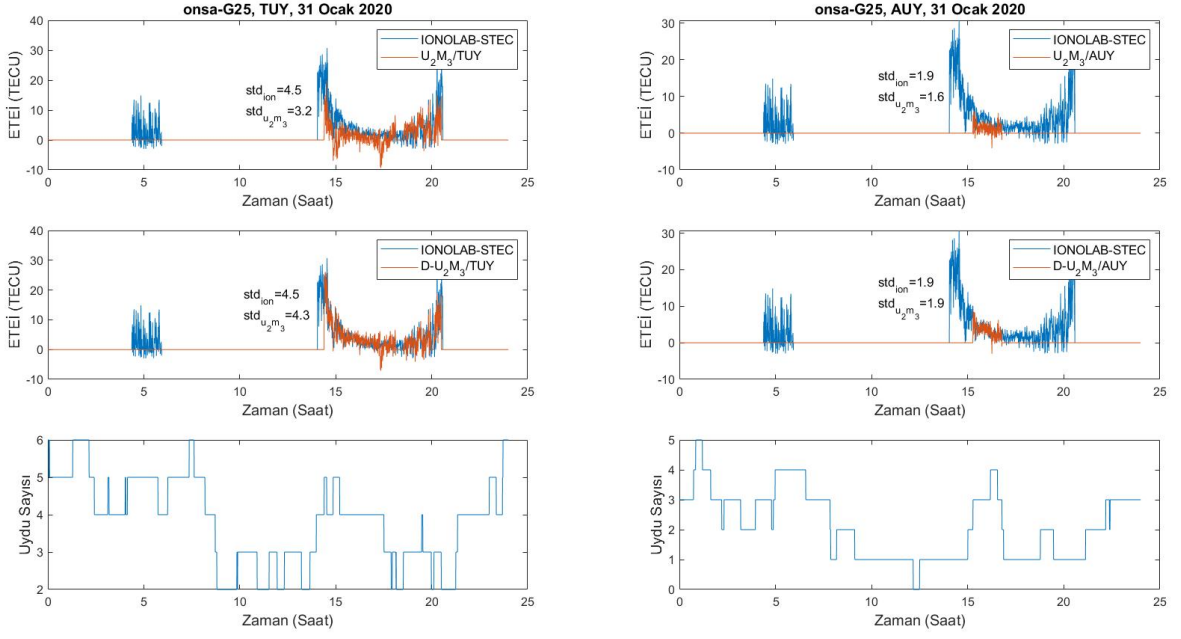
Çizelge 4.4: İyonkürenin pozitif bozulmalı günleri için ETEİ kestirimlerinin IONOLAB-STEÇ ile farklılıkları

YKS İstasyonu	YKS Uydusu	Gün	$Err_{U_2M_3}$ TUY	$Err_{U_2M_3}$ D- U_2M_3 /TUY	$Err_{U_2M_3}$ AUY	$Err_{U_2M_3}$ D- U_2M_3 /AUY
onsa	G06	12.03.2020	0.63	0.31	0.73	0.33
cebr	G24	04.03.2019	0.39	0.26	0.13	0.03
cebr	G24	12.03.2020	0.15	0.06	0.15	0.14
onsa	G04	12.03.2020	0.44	0.41	0.29	0.28
vill	G10	12.03.2020	0.59	0.04	0.61	0.05
kiru	G26	04.03.2019	0.35	0.19	0.12	0.07
sey2	G30	04.03.2019	0.58	0.11	0.60	0.04

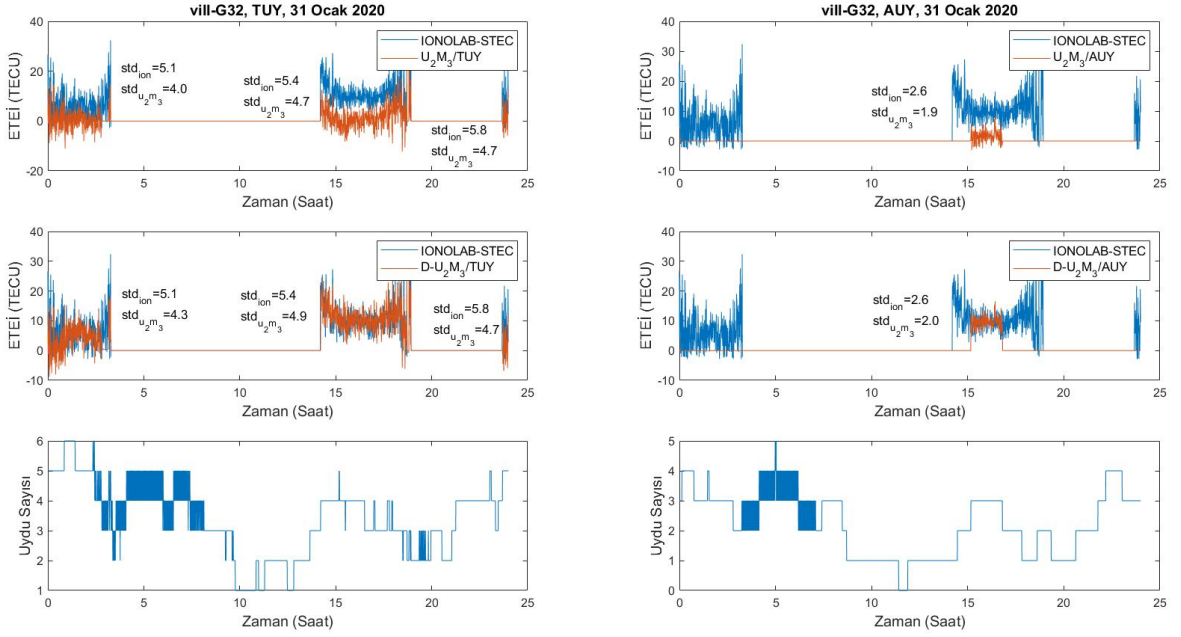
İyonkürenin negatif bozulmalı günü 14 Eylül 2019, [46] için U_2M_3 /TUY, D- U_2M_3 /TUY, U_2M_3 /AUY ve D- U_2M_3 /AUY ile hesaplanan 1 günlük ETEİ kestirimleri orta ve yüksek enlem bölgelerindeki ve ekvatorial bölgedeki istasyonlar için IONOLAB-STEÇ algoritmasının sonuçları ile Şekil 4.17-4.22'de karşılaştırılmıştır.



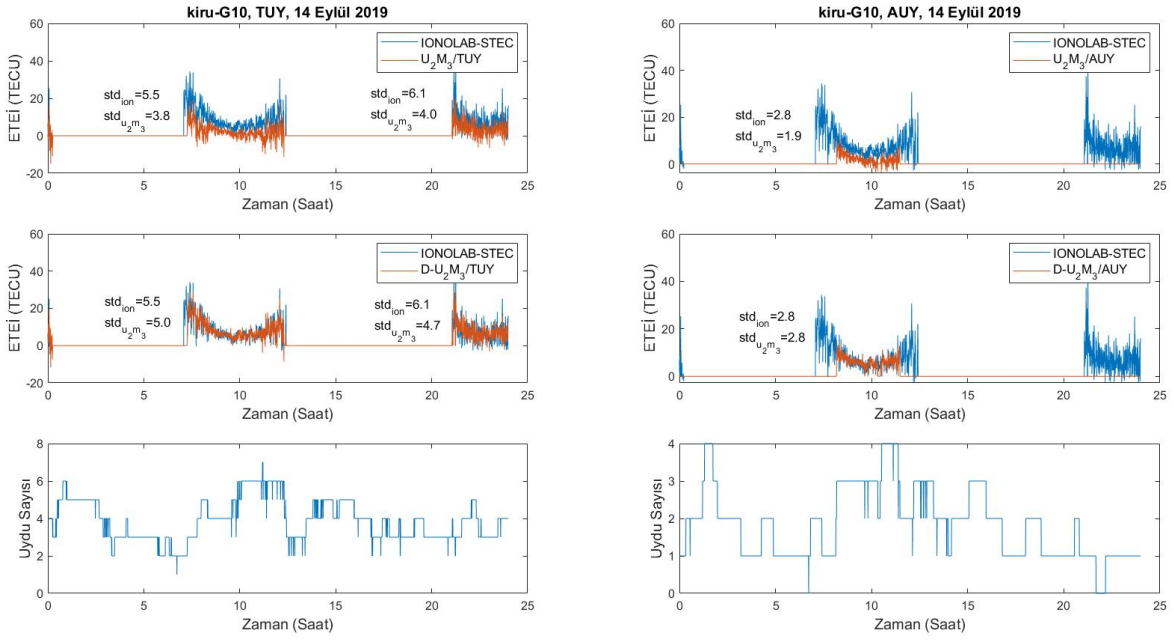
Şekil 4.17: Yüksek enlem bölgesi Boras istasyonu-G03 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı gün



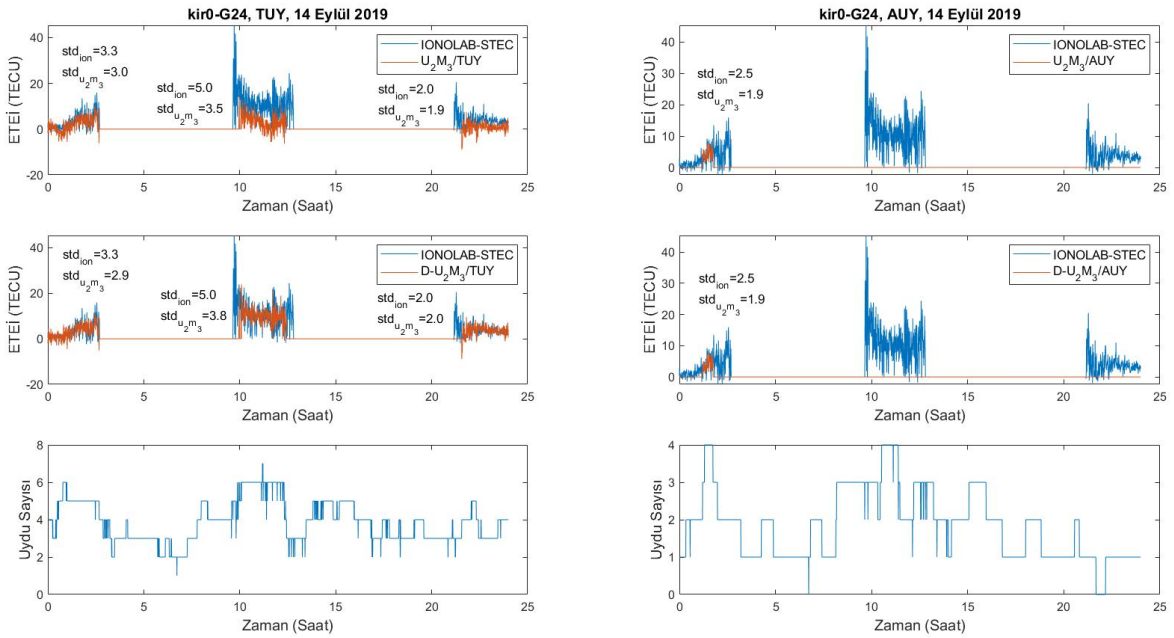
Şekil 4.18: Yüksek enlem bölgesi Onsala istasyonu-G25 uydusu ETEİ kestirimi, ionkürenin negatif bozulmalı günü



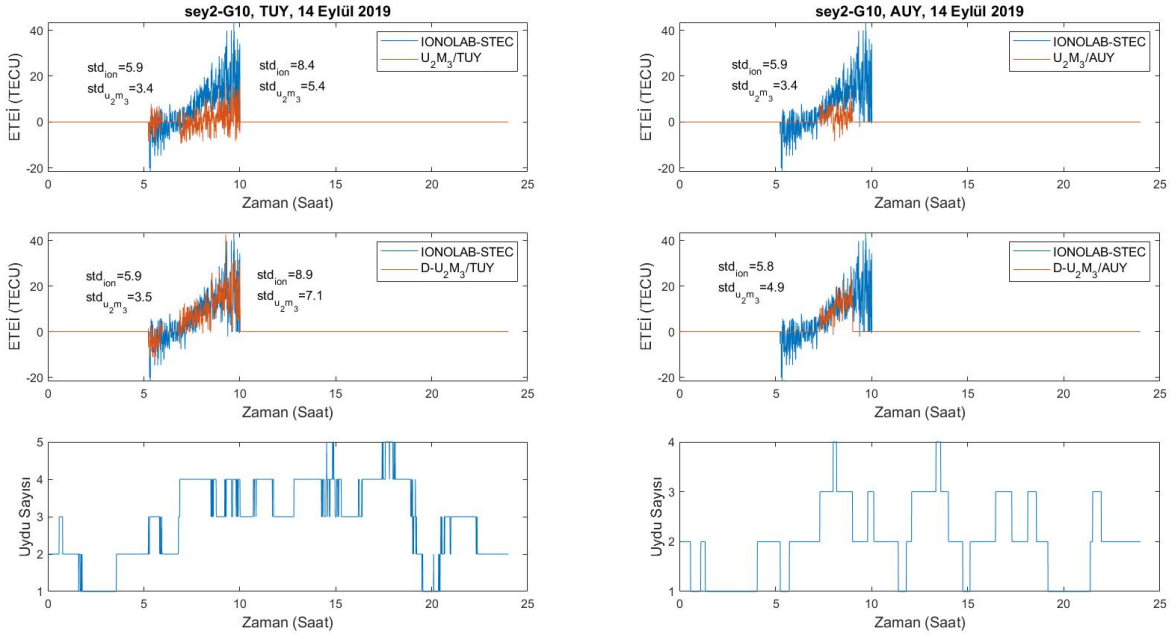
Şekil 4.19: Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G32 uydusu ETEİ kestirimi, ionkürenin negatif bozulmalı günü



Şekil 4.20: Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kiru) istasyonu-G10 ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü



Şekil 4.21: Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kir0) istasyonu-G24 ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü



Şekil 4.22: Ekvatorial bölge La Misere istasyonu-G10 uydusu ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü

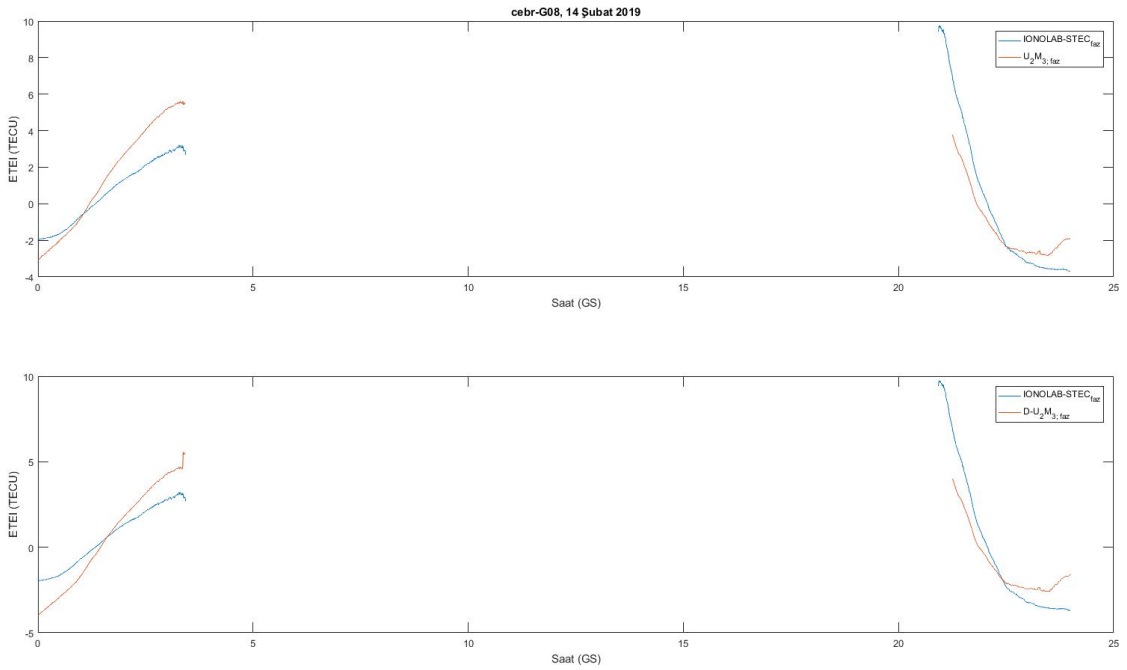
Çizelge 4.5: İyonkürenin negatif bozulmalı günleri için ETEİ kestirimlerinin IONOLAB-STECC ile farklılıkları

YKS İstasyonu	YKS Uydusu	Gün	Err _{U₂M₃} TUY	Err _{U₂M₃} D-U ₂ M ₃ /TUY	Err _{U₂M₃} AUY	Err _{U₂M₃} D-U ₂ M ₃ /AUY
spt0	G03	14.09.2019	0.41	0.06	0.36	0.30
onsa	G25	31.01.2020	0.45	0.14	0.44	0.15
vill	G32	31.01.2020	0.64	0.17	0.67	0.03
kiru	G10	14.09.2019	0.45	0.09	0.45	0.06
kir0	G24	14.09.2019	0.51	0.14	0.11	0.10
sey2	G10	14.09.2019	0.72	0.19	0.59	0.08

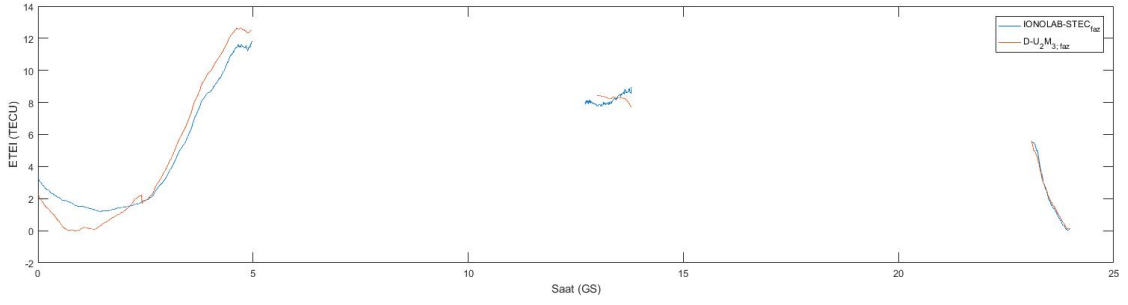
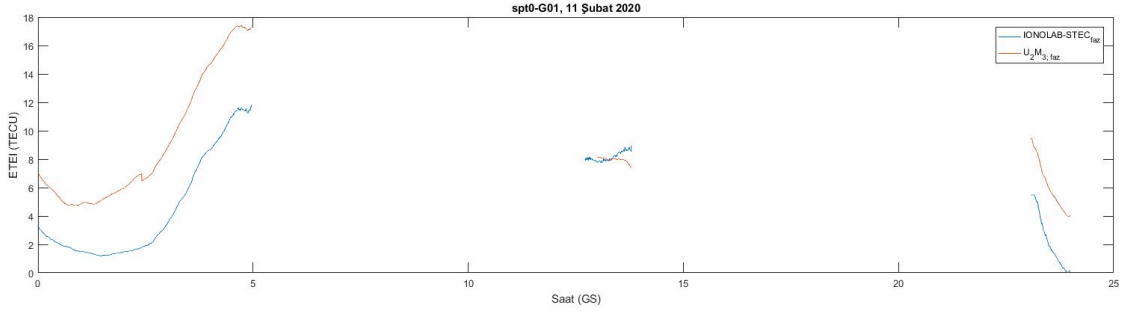
Şekil 4.1-4.22'deki grafikler üzerinde IONOLAB STECC ile hesaplanan ETEİ'nin standart sapması std_{ion} ve 2 alıcı-3 uydu yöntemiyle hesaplanan ETEİ'nin standart sapması $std_{u_2m_3}$ olarak belirtilmiştir. Bu tezde sözde menzil gözlemlerinin kullanıldığı yöntem ile hesaplanan, 1 alıcı ve 1 uydu arasındaki 1 günlük ETE değerlerinin literatürdeki hesaplamalardan daha düşük standart sapmaya sahiptir. Bu da sözde menzil gözlemlerinin kullanıldığı hesaplamalarda L5 frekansının sağladığı yeni bilgiler ile daha düşük gürültülü ETEİ sonuçlarına ulaşabileceğini göstermektedir.

Faz gözlemleri, sözde menzil gözlemlerinden çok daha düşük gürültülü ETEİ hesaplamalarına imkan sağlar. Ancak bu gözlemlerde mevcut olan ilk faz belirsizliği ve faz kopmaları ETEİ hesaplamalarını zorlaştırmaktadır. Bu tez kapsamında Bölüm 3.2’de anlatılan L5 frekansındaki faz gözlemlerinin (L1C, L2C, L2L, L2X, L5Q, L5X) dahil edildiği ETEİ hesaplama yöntemi Çizelge 4.1’deki orta enlem bölgesi, yüksek enlem bölgesi ve ekvatorial bölgedeki farklı alıcılar için iyonkürenin pozitif, negatif bozulmalı ve sakin günlerindeki YKS verileri ile incelenmiştir.

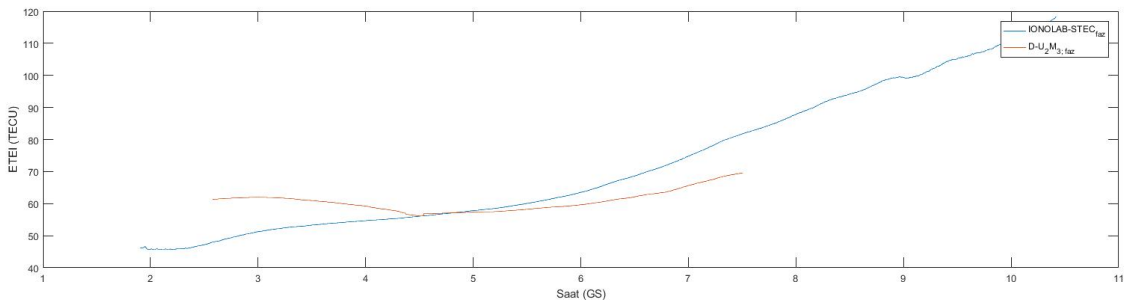
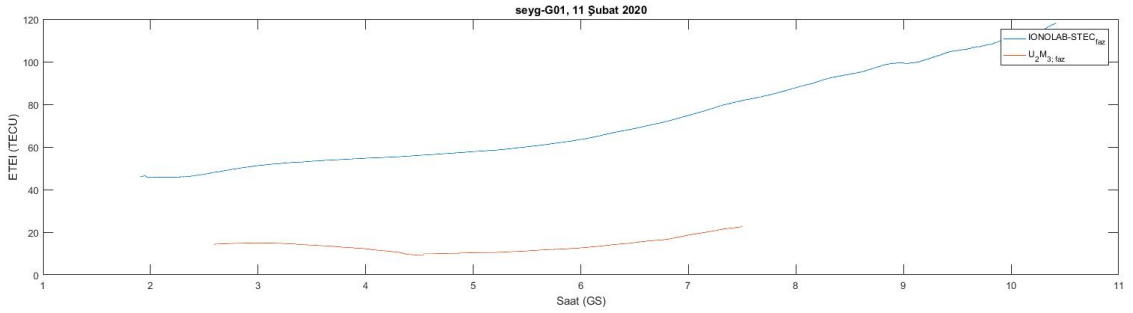
Faz gözlemlerinin kullanıldığı 2 alıcı-3 uydu yöntemi ile kestirilen ETEİ değerleri, faz gözlemlerinin kullanıldığı IONOLAB STEC algoritmasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.23: Orta enlem bölgesi Cebresos istasyonu-G08 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin sakin günü

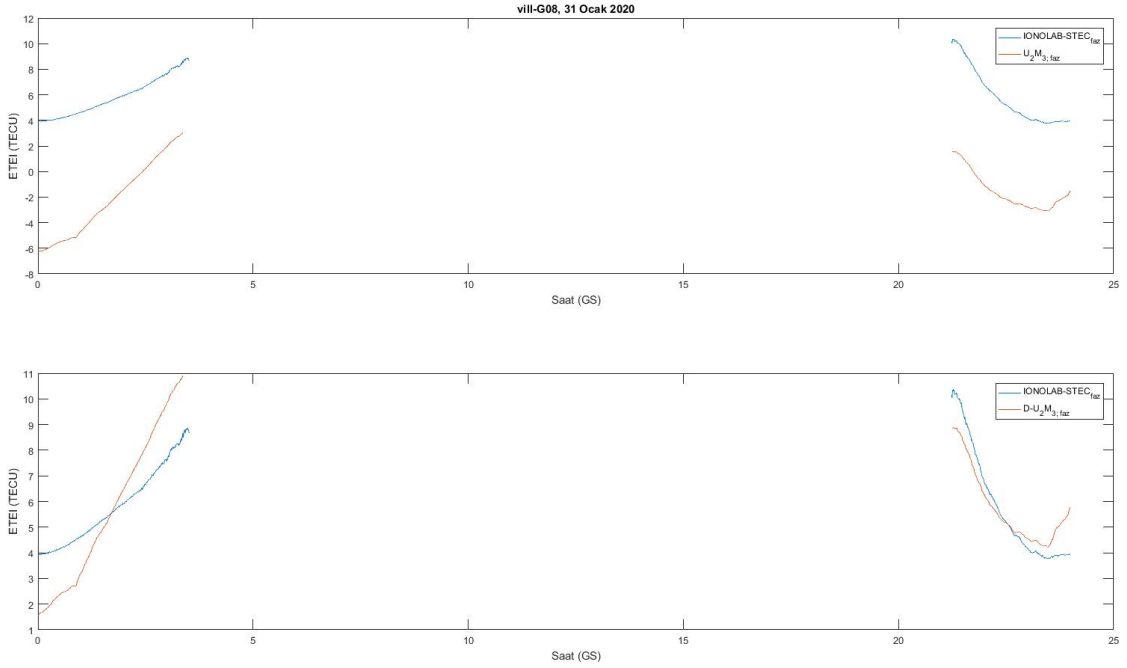


Şekil 4.24: Yüksek enlem bölgesi Boras istasyonu-G01 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, ionkürenin sakin günü

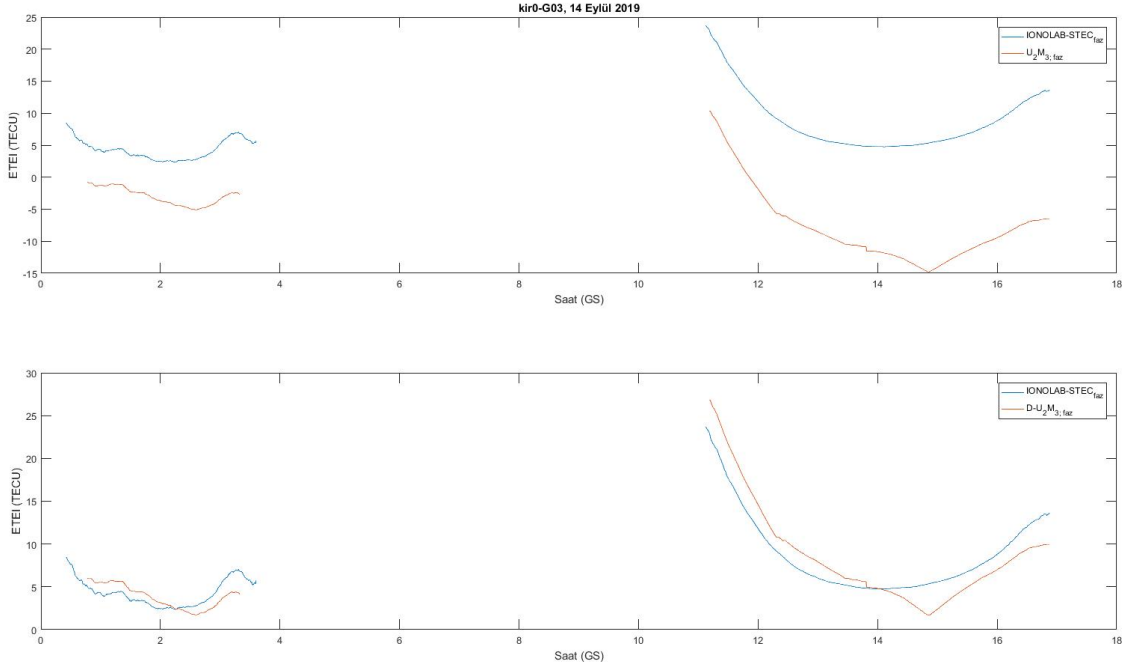


Şekil 4.25: Ekvatorial bölge Pointe Laure istasyonu-G01 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, ionkürenin sakin günü

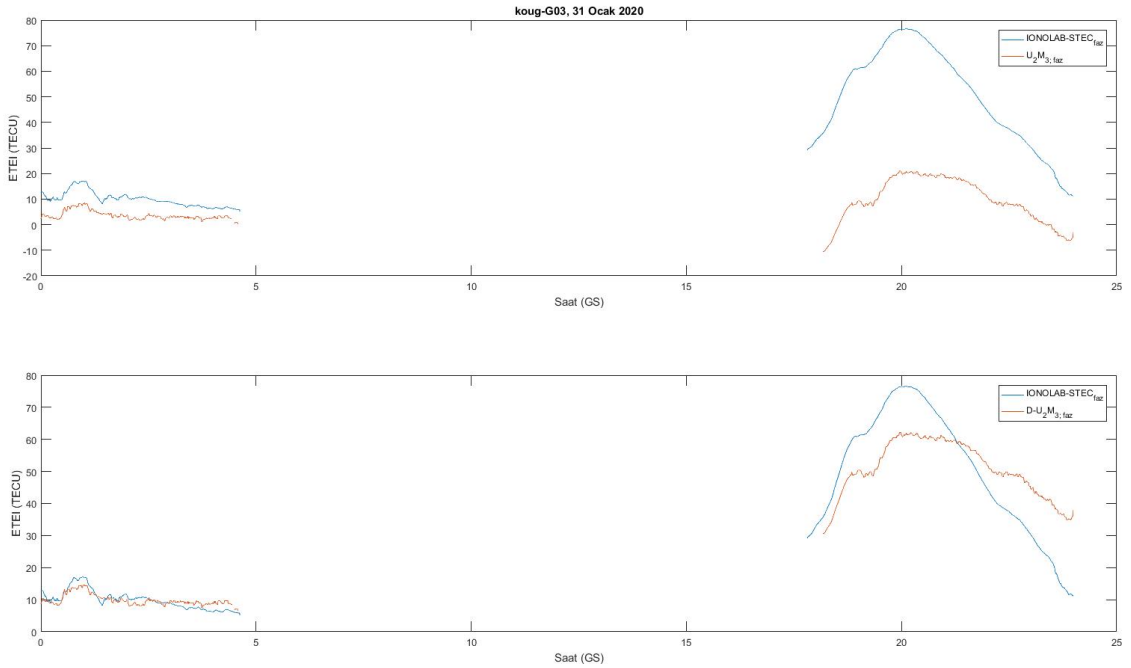
İyonkürenin sakin günleri için faz gözlemleri kullanılarak hesaplanan ETEİ sonuçları, Şekil 4.23-4.25'te IONOLAB-STEÇ sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde $U_2M_{3,faz}$ faz gözlemleri kullanılan 2 alıcı 3 uydu yöntemini, IONOLAB-STEÇ f_{az} faz gözlemleri kullanılan IONOLAB-STE yöntemini, $D-U_2M_{3,faz}$ de faz gözlemleri kullanılan 2 alıcı 3 uydu yöntemi ile kestirilen ETEİ'lerin IONOLAB-STEÇ sonuçları ile denkleştirilme yöntemini temsil etmektedir.



Şekil 4.26: Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G08 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü

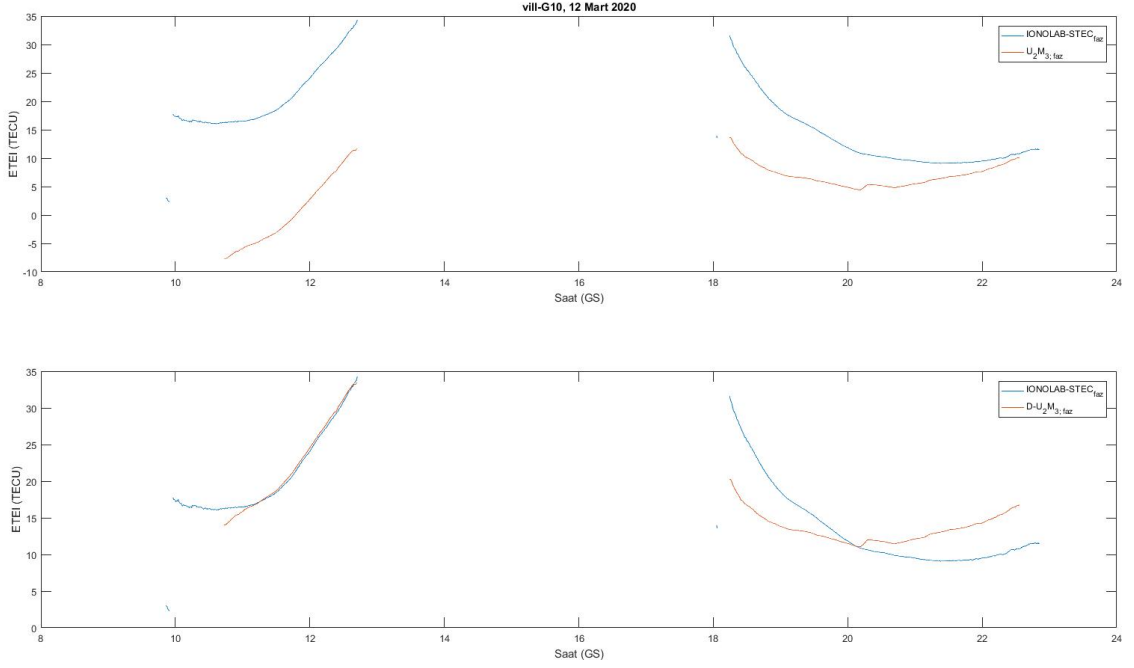


Şekil 4.27: Yüksek enlem bölgesi Kiruna (kir0) istasyonu-G03 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü

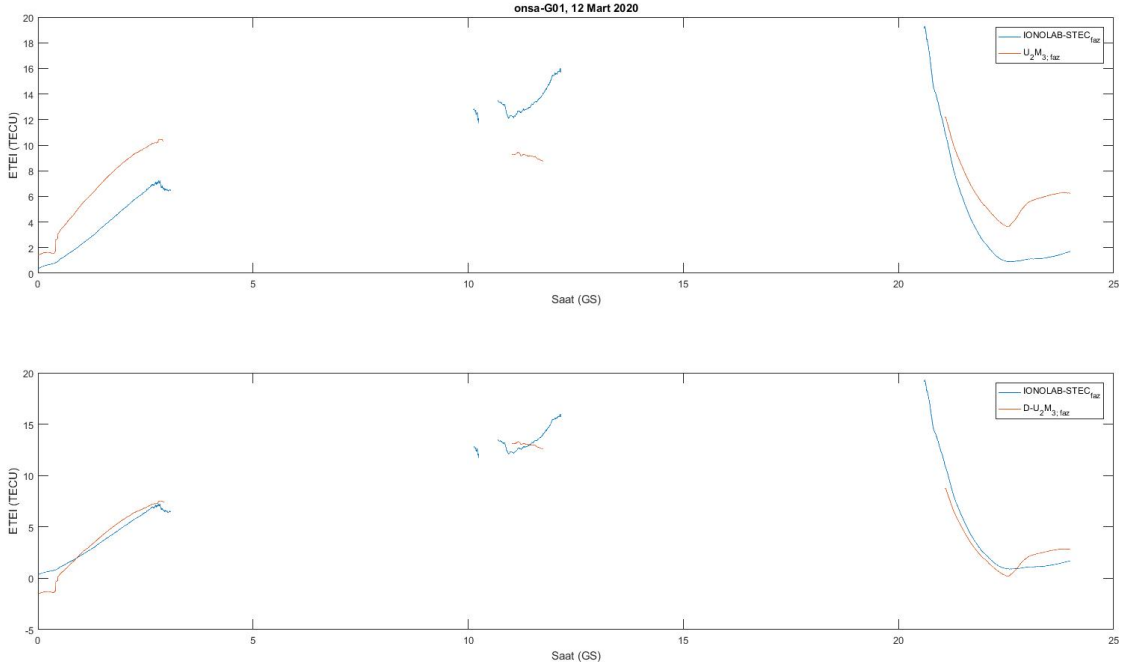


Şekil 4.28: Yüksek enlem bölgesi Kourou (koug) istasyonu-G03 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin negatif bozulmalı günü

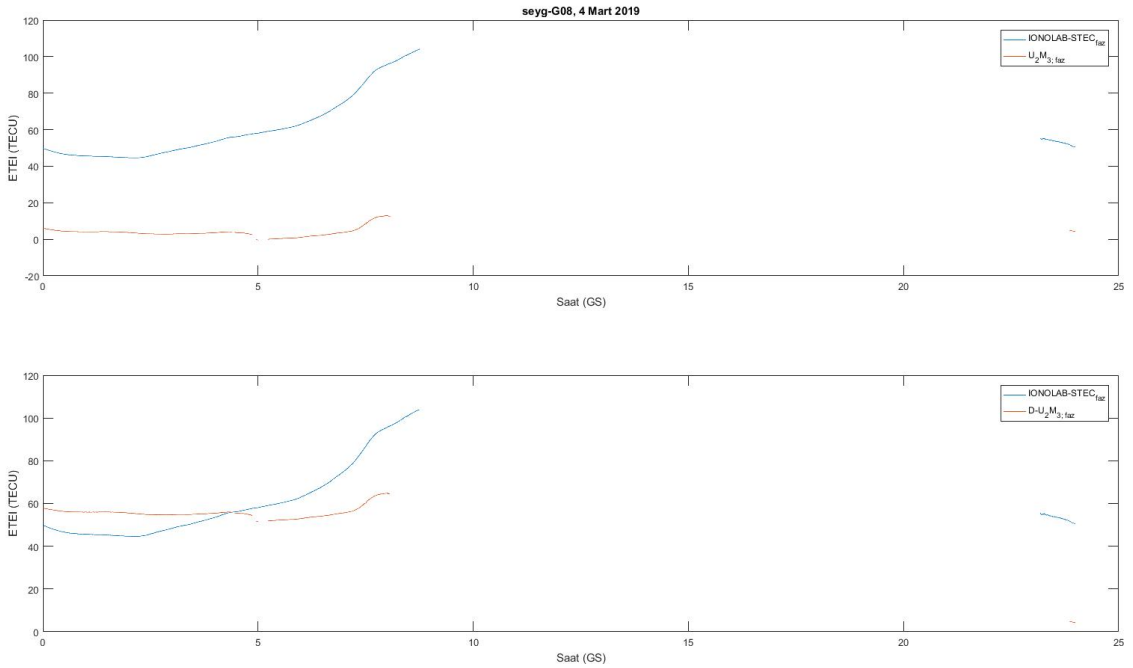
İyonkürenin negatif bozulmalı günleri için faz gözlemleri kullanılarak hesaplanan ETEİ sonuçları Şekil 4.26-4.28'de; iyonkürenin pozitif bozulmalı günleri için faz gözlemleri kullanılarak hesaplanan ETEİ sonuçları ise Şekil 4.29-4.31'de İONOLAB-STEÇ sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.29: Orta enlem bölgesi Villafranca istasyonu-G10 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü



Şekil 4.30: Yüksek enlem bölgesi Onsala istasyonu-G01 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü



Şekil 4.31: Ekvatorial bölge Pointe Laure istasyonu-G08 uydusu faz gözlemleri ile ETEİ kestirimi, iyonkürenin pozitif bozulmalı günü

5. SONUÇLAR

Bilim insanlarının uzun yıllardır süregelen iyonkürenin davranışlarını anlamlandırma çalışmaları, iyonküre Toplam Elektron İçeriği parametresi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu tezde yürütülen çalışmalarda bugüne kadar yapılan iyonküre çalışmalarına ek olarak yeni YKS gözlemlerinin kullanıldığı doğruluğu yüksek, anlık, düşük maliyetli Eğik TEİ kestirimleri yapmak amaçlanmıştır.

Bu tez kapsamında farklı YKS alıcı ve uydu kombinasyonları için yeni nesil YKS sinyallerinde yayınlanan sözde menzil gözlemlerinin farklarının doğrusal denklem setleri oluşturulmuştur. 2 alıcı-3 uydu sistemi için bu denklem setleri çözülerek alıcı-uydu arasındaki ETEİ değerleri kestirilmiştir. Bölüm 3'te detaylı olarak anlatılan bu yöntemde L1, L2 ve L5 frekansındaki RINEX 3.03 formatında yayınlanan alıcı gözlemleri kullanılmıştır.

2 alıcı-3 uydu yöntemi, 2 YKS alıcısının 3 YKS uydusundan aynı anda aldığı L1, L2 ve L5 frekansındaki sözde menzil gözlemlerini kullanarak gürültüsü azaltılmış anlık ETEİ kestirimleri yapan bir yöntemdir. Bölüm 4'te farklı enlem bölgelerindeki YKS alıcılarının gözlemleri kullanılarak, yılın farklı zamanlarında ETEİ kestirimleri yapılmıştır. YKS alıcıları seçilirken aynı zaman aralıklarında aynı uyduları görebilen alıcılar olması bu yöntem için gereklidir. Alıcılar birbirlerine ne kadar yakın yerleştirilmişse kestirimlerdeki hata payı o kadar az olmaktadır. Bu tezde geliştirilen yöntem ile kestirilen ETEİ değerleri, RINEX 2 alıcı gözlemlerini, yayınlanan uydu yanlılıklarını ve IONOLAB-BIAS ile kestirilen alıcı yanlılıklarını kullanarak ETEİ kestirimi yapan IONOLAB-STEÇ yöntemi ile elde edilen ETEİ değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Sözde menzil gözlemlerinin kullanıldığı kestirimlerde de faz gözlemlerinin kullanıldığı kestirimlerde de IONOLAB-STEÇ ile hesaplanan ETEİ değerlerinin 2 alıcı-3 uydu yöntemi ile hesaplanan ETEİ değerlerinden sabit bir miktarda farklı olduğu görülmektedir. Değerler arasındaki farklılıkların; 2 alıcı-3 uydu yöntemi alıcı ve uydu yanlılıklarını kendi içinde hesaplarken, IONOLAB STEÇ algoritmasının CODE'nin diferansiyel uydu yanlılık verilerini ve JPL analiz merkezinin IONEX

formatındaki GIM haritalarının verilerini kullanarak hesapladığı diferansiyel alıcı yanlılıklarını kullanmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir [19, 24].

2 alıcı-3 uydu yöntemi ile hesaplanan 1 günlük ETEİ sonuçlarında bazı örnekler için TEİ profiline uygun olmayan anlık değişimler olduğu görülmektedir. Sapmaların en önemli sebeplerinden biri alıcıların aynı anda gördüğü uydu setlerinin değişmesidir. Değişen uydu setleri için farklı uydu yanlılıkları sisteme dahil olduğundan, uydu setlerinin değiştiği noktalarda genel ETEİ profilini bozan değerler hesaplanmaktadır. Bu etkiyi en aza indirmek için yalnızca 2 alıcının aynı anda gördüğü ve yükselme açısı iki alıcıya göre de 40 dereceden fazla olan uyduların kullanıldığı ETEİ kestirim yöntemi ile hesaplanan günlük ETEİ sonuçları, uydu setinin değiştiği noktalara göre kısımlara ayrılmıştır. IONOLAB-STEC sonuçları kullanılarak uydu setlerine özgü denkleştirme değerleri hesaplanarak bu kısımlara eklenmiştir. Farklı enlem bölgelerindeki alıcılar için farklı iyonküre bozulmalı günlerindeki sonuçlar, Bölüm 4'teki grafiklerde incelenmiştir. 2 alıcı-3 uydu yöntemi ile elde edilen ETEİ kestirimlerinin günlük ETEİ profiline uygun olduğu ve daha düşük gürültülü sonuçlar oluşturduğu bu karşılaştırmalarda gösterilmiştir.

Bu tezde geliştirilen yöntem ile ETEİ kestirimlerinin yanı sıra, iyonküre karakteristiğini çözümlemek için kritik önem taşıyan cihaz yanlılıkları da kestirilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda L1 ve L2 YKS frekansındaki diferansiyel alıcı yanlılıklarının hesaplamaları araştırılmıştır. Ancak uydu yanlılıklarını hesaplamak konusunda bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu tezde bir yenilik olarak L5 frekansındaki uydu yanlılıkları ve L1-L5, L2-L5 frekans ikilileri için diferansiyel alıcı yanlılıkları kestirilmiştir. Analiz merkezlerinin yayınladıkları veriler RINEX 2 sinyalleri için aylık, RINEX 3 sinyalleri için günlük olarak yayınlanmaktadır. Bu tezde ise $\epsilon_{C1W;u} - \epsilon_{C2L;u}$, $\epsilon_{C1W;u} - \epsilon_{C5Q;u}$ ve $\epsilon_{C2W;u} - \epsilon_{C5Q;u}$ olarak tanımlanan diferansiyel alıcı yanlılıkları ve C2L ve C5Q veya C2X ve C5X frekansları için uydu yanlılıkları 1 gün için 30 saniye aralıklarla hesaplanabilmektedir.

Bu yöntemin dezavantajlarının başında denklem sisteminin tek bir çözümünün olmaması gelir. Sistem aynı YKS gözlemlerini yayınlayan ve aynı 3 uyduyu belirli

bir yükselme açısının üstünde gören 2 alıcı içerdiği için ve L5 frekansında yayın yapan uyduların kullanılması gerektiği için literatürdeki 1 alıcı ve 1 uydu verilerini kullanan yöntemlere göre daha çok koşulun sağlanması gerekmektedir.

Ancak sözde menzil gözlemlerinin kullanıldığı hesaplamalar için mevcut çalışmalardan daha düşük gürültülü ETEİ değerleri kestirilmektedir ve ETEİ kestirimleri için pek çok çalışmanın konusu olan alıcı yanlılıklarına ihtiyaç duyulmaz. ETEİ değerleri, yanlılıkların kestirimi sırasında karşılaşılan hesaplama hatalarından ayrıştırılır.

6. YORUM ve GELECEK ÇALIŞMALAR

2 alıcı-3 uydu gözlemleri kullanılarak oluşturulan doğrusal denklem setinin çözülmesi ile kestirilen ETEİ değerleri profil olarak, gürbüzlüğü pek çok çalışma tarafından ispatlanmış olan IONOLAB-STEÇ sonuçlarına benzerlik göstermektedir. Bu iki veri arasındaki farklılıklar IONOLAB-STEÇ ile hesaplanan ETEİ değerleri kullanılarak hesaplanan denkleştirme sabitinin eklenmesi ile denkleştirilmiş ETEİ değerleri elde edilmiştir. Önerilen yöntemin IONOLAB-STEÇ sonuçlarından saptığı durumlar incelenmiş ve bu sapmaların aşağıdaki sebeplerle oluştuğu değerlendirilmiştir:

- Farklı alıcı ve uyduların farklı sinyallerdeki sözde menzil gözlemlerinin farkları kullanılarak oluşturulan denklem setleri, tamamen bağımsız denklemler içermediği için, sistem katsayı matrisinin sözde tersi alınarak çözülmüştür. Bu da sistemin karmaşıklığını arttırmakta ve beklenmeyen hatalara sebep olabilmektedir.
- IONOLAB-STEÇ yönteminde analiz merkezleri tarafından yayınlanan diferansiyel uydu yanlılıkları kullanılırken, bu tez kapsamında CODE analiz merkezinin SİNEX formatında C1W ve C2W sinyallerinde yayınladığı uydu yanlılıkları kullanılmıştır. Diğer sinyallerdeki alıcı ve uydu yanlılıkları bilinmeyen olarak sisteme dahil edilmiştir. Bunun da bazı hesaplamalarda sapmalara neden olabileceği değerlendirilmiştir. Ancak bu sayede uydu yanlılıkları ve diferansiyel alıcı yanlılıkları da hesaplanabilmektedir.
- Gözlem verilerine ulaşılabilen YKS alıcı ağlarındaki bazı alıcıların birbirlerine uzak noktalarda yerleştirilmiş olmaları sebebi ile aynı uydunun aynı anda bir alıcı için yükselme açısı diğerinden daha düşük olmaktadır. Bu da YKS sinyallerinin çok yol etkisine maruz kalarak bozulmaya uğramasına sebep olur. 2 alıcı kullanmanın dezavantajı olarak görülebilen bu durum sistemin IONOLAB-STEÇ sonuçlarından farklılaşmasına sebep olur. Bu sebeple hesaplamalarda sadece iki alıcı için de yükselme açısı 40 derece üstünde olan aynı 3 uydunun kullanıldığı ETEİ sonuçlarının IONOLAB-STEÇ sonuçlarına daha yakın olduğu gösterilmiştir.

- Önerilen ETEİ kestirim sisteminin 2 alıcı içermesi sebebi ile, tek alıcı yerine iki alıcının gözlem hataları hesaba katılmaktadır. Bu da sistemin IONOLAB-STEÇ sonuçlarından sapmasına yol açan etmenler arasındadır.

Bu tezde 2 alıcı-3 uydu yöntemi ile L5 frekansındaki sinyaller için 30 saniye çözünürlüklü hesaplanan uydu yanlılıklarının literatürdeki ETEİ, DTEİ hesaplamalarına dahil edilmesi ile yöntemin doğruluğu analiz edilebilir.

Geliştirilen yöntemde 2 alıcının aynı anda 3 uyduyu görmediği durumlar için ETEİ değerleri hesaplanamamaktadır. [5]'teki çalışmada geliştirilen uzay-zaman rassal alan kestirim algoritması bu tezdeki ETEİ sonuçlarına uygulanarak, yeterli veri olmayan anlar için veri üretilebilir.

Farklı uydu sistemleri için bu tezde geliştirilen yöntem ile sözde menzil ve faz gözlemleri kullanılarak hem TEİ hem de alıcı ve uydu yanlılık kestirimleri yapılarak YKS sonuçları ile karşılaştırılabilir.

2018'de ilk fırlatmanın yapıldığı GPS III/IIIF programı ile L1 frekansında 4. sivil L1C sinyali sisteme dahil edilmiştir. 2020 yılının sonlarına doğru 24 uyduda L1C sinyali kullanıma uygun olacaktır [40]. Bu sinyal ile YKS'nin uluslararası seyrüsefer uydu sistemleri ile birlikte çalışabilirliğinin sağlanması amaçlanmıştır [40]. İlk aşamada Avrupa'nın uydu sistemi Galileo ile ABD sistemi YKS arasında ortak sivil sinyal olarak tasarlanmıştır [40]. İlerleyen süreçte Japonya'nın Quasi-Zenith uydu sistemi ve Çin'in BeiDou sistemi de L1C benzeri sinyallere adapte edilmeye başlanmıştır [40]. Bu yeni L1C sinyalinin de ETEİ hesaplama algoritmasına dahil edildiği daha gerçeğe yakın kestirimler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/ionosphere> (Erişim tarihi: **16 Ağustos 2020**).
- [2] Yenen, S. D., YKS Ağı Tabanlı Toplam Elektron İçeriğı ve Alıcı Yanlılığı Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2017**.
- [3] Yeşil, A., Karatay, S., Sağır, S., Kurt, K., The Seasonal Behavior of the Refractive Index of the Ionosphere over the Equatorial Region, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 8, 81-89, **2013**.
- [4] <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/space-weather-impacts-climate> (Erişim tarihi: **12 Ağustos 2020**).
- [5] Deviren, M. N., Türkiye Üzerinde Toplam Elektron İçeriğı (TEİ) İçin Uzay-Zaman Rassal Alan Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2013**.
- [6] <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/hf-radio-communications> (Erişim tarihi: **15 Ağustos 2020**).
- [7] <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/electric-power-transmission> (Erişim tarihi: **15 Ağustos 2020**).
- [8] <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/space-weather-and-gps-systems> Erişim tarihi: **15 Ağustos 2020**).
- [9] <https://gpstrackingplans.com/2018/05/18/gps-history/> (Erişim tarihi: **16 Ağustos 2020**).
- [10] <https://www.gps.gov/systems/gps/> (Erişim tarihi: **16 Ağustos 2020**).
- [11] <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/> (Erişim tarihi: **16 Ağustos 2020**).
- [12] <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1867> (Erişim tarihi: **16 Ağustos 2020**).
- [13] Kwan, P., Lemus, J., NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces, IS-GPS-200, **2019**.
- [14] Kwan, P., Flores, A., NAVSTAR GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces, IS-GPS-705, **2019**.
- [15] Komjathy, A., Langley R. B., An Assessment of Predicted and Measured Ionospheric Total Electron Content Using a Regional GPS Network, ION National Technical Meeting, **1996**.

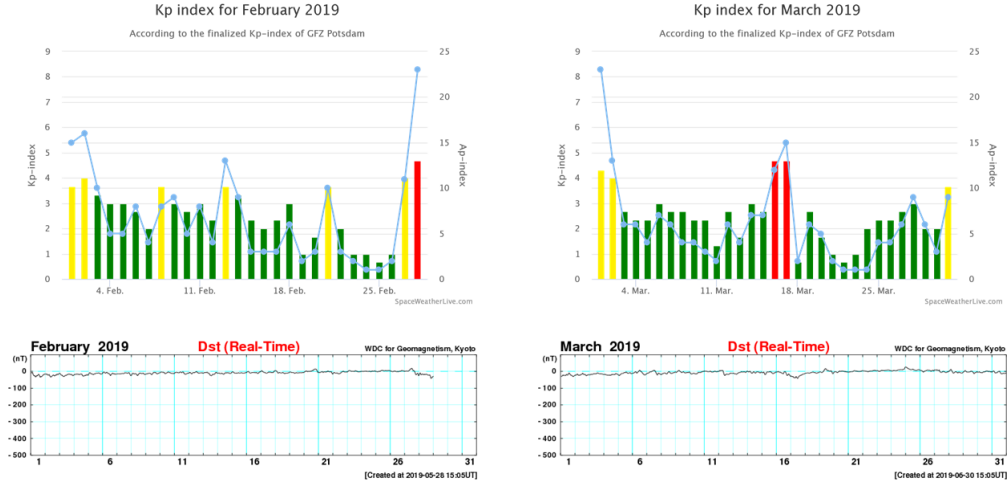
- [16] Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C.B., Regularized Estimation of Vertical Total Electron Content from Global Positioning System Data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. A12, 1469, **2003**.
- [17] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., Regularized Estimation of Vertical Total Electron Content from GPS Data for A Desired Time Period, *Radio Science*, Vol. 39, RS6012, **2004**.
- [18] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C.B., Total Electron Content estimation with Reg-Est, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, A11313, **2007**.
- [19] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C.B., GPS/TEC Estimation with IONOLAB Method, *IEEE*, **2007**.
- [20] Uğurlu, O., Sezen, U., Alkar, A. Z., Web Based Automated Total Electron Content Computation, *IEEE*, **2007**.
- [21] Sezen, U., Arıkan, F., Arıkan, O. Uğurlu, O., Sadeghimorad, A., Online, Automatic, Near-Real Time Estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC, *Space Weather*, Vol. 11, 297-305, **2013**.
- [22] Jusoh, M., Aziz, N. H., Haron, M., Zaini, M. A., Sulaiman, A., Determination of Ionospheric Total Electron Content (TEC): Phase Measurement Based on Leveling Technique, *Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, **2009**.
- [23] Asgari, J., Simkoei, A. R., Analysis and Prediction of GNSS Estimated Total Electron Contents, *Journal of the Earth & Space Physics*. Vol. 37, 11-24, **2011**.
- [24] Arıkan, F., Nayir, H., Sezen, U., Arıkan, O., Estimation of Single Station Interfrequency Receiver Bias Using GPS-TEC. *Radio Science*, **2008**.
- [25] Yenen, S., Arıkan, F., Tamara, G., Comparison of IRI-Plas STEC and IONOLAB-STECH Over a Midlatitude GPS Network, *Conference Paper*, **2019**.
- [26] Wang, J., Huang, G., Zhou, P., Yang, Y., Zhang, Q., Gao, Y., Advantages of Uncombined Precise Point Positioning with Fixed Ambiguity Resolution for Slant Total Electron Content (STEC) and Differential Code Bias (DCB) Estimation, *Remote Sensing*, 12, 304, **2020**.
- [27] Ciruolo, L., Azpilicueta, F., Brunini, C., Meza, A., Radicella, S. M., Calibration Errors on Experimental Slant Total Electron Content Determined with GPS, *Journal of Geodesy*, **2007**.
- [28] Dyrud, L., Jovancevic, A., Brown, A., Wilson, D., Ganguly, S., Ionospheric measurement with GPS: Receiver techniques and methods, *Radio Science*, VOL. 43, **2008**.

- [29] Codrescu, M. V., Beierle K. L., Fuller-Rowell T. J., More Total Electron Content Climatology from TOPEX/Poseidon Measurements, *Radio Sci.*, 36(2), 325-333, **2001**.
- [30] Araujo-Pradere, E. A., GPS-derived total electron content response for the Bastille Day magnetic storm of 2000 at a low mid-latitude station, *Geofisica Internacional*, Vol. 44, Num. 2, 211-218, **2004**.
- [31] Shehu, M. U., Said, R.S., Okoro, E.C., The Trend of Ionospheric Total Electron Content Near the Equator, *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 258-264, **2017**.
- [32] Tsarev, S. P., Denisenko, V. V., Valikhanov, M. M., Multidimensional Free Interpolation Framework for High-precision Modeling of Slant Total Electron Contents in Mid-latitude and Equatorial Regions, *Journal of Siberian Federal University, Mathematics & Physics*, 781–791, **2018**.
- [33] Sun, Y.-Y., Liu, J.-Y., Wu, T.-Y., Chen, C.-H., Global Distribution of Persistence of Total Electron Content Anomaly, *Atmosphere*, 10, 297, **2019**.
- [34] Erdem, E., Arıkan, F., IONOLAB-RAY: A Wave Propagation Algorithm for Anisotropic and Inhomogeneous Ionosphere, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **2017**.
- [35] Erdem, E., İyonkürede Elektromanyetik Dalga Yayılım Modeli ve Benzetimi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2017**.
- [36] Deviren, M. N., Arıkan, F., IONOLAB-MAP: An Automatic Spatial Interpolation Algorithm for Total Electron Content, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **2018**.
- [37] Schaer, S., SINEX BIAS—Solution (Software/technique) Independent Exchange Format for GNSS Biases Version 1.00, IGS Workshop on GNSS Biases, **2015**.
- [38] <https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere> (Erişim tarihi: **19 Temmuz 2020**).
- [39] <https://scied.ucar.edu/ionosphere> (Erişim tarihi: **20 Temmuz 2020**).
- [40] Appleton, E. V., *The Ionosphere*, Nobel Lecture, **1947**.
- [41] Nayir, H., Yerküresel Konumlama Sistemi İşaretleri Kullanarak İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2007**.
- [42] Gurtner, W., RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10, IGS RINEX Working Group, **2007**.
- [43] Gurtner, W., Estey, L., RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11, IGS RINEX Working Group, **2012**.

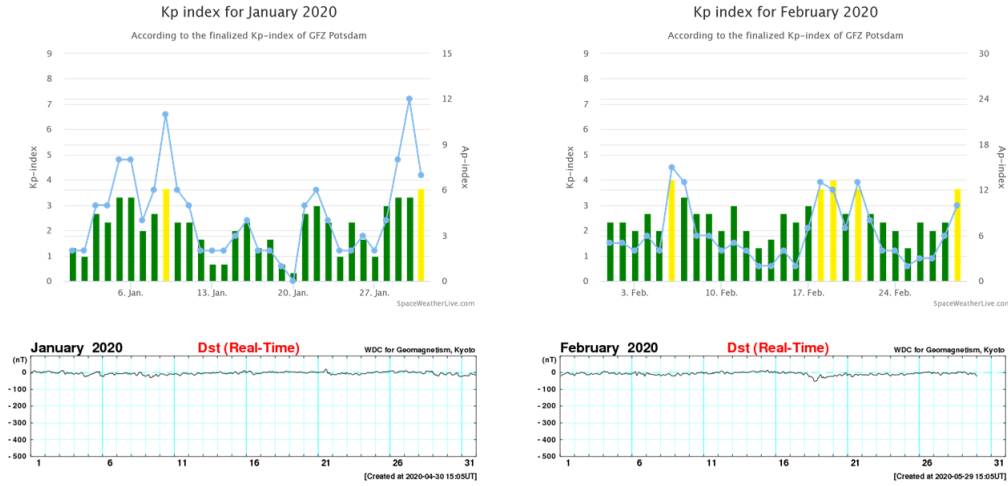
- [44] Gurtner, W., Estey, L., RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.03, International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104, **2015**.
- [45] <https://www.britannica.com/science/ionosphere> (Erişim tarihi: **25 Ağustos 2020**).
- [46] https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/Q_D_days.txt (Erişim tarihi: **23 Aralık 2020**).
- [47] www.ionolab.org (Erişim tarihi: **22 Ağustos 2020**).
- [48] http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html (Erişim tarihi: **30 Ocak 2021**).
- [49] <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive> (Erişim tarihi: **30 Ocak 2021**).

EKLER

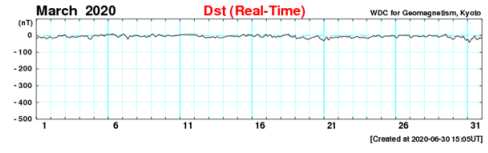
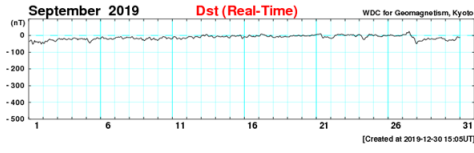
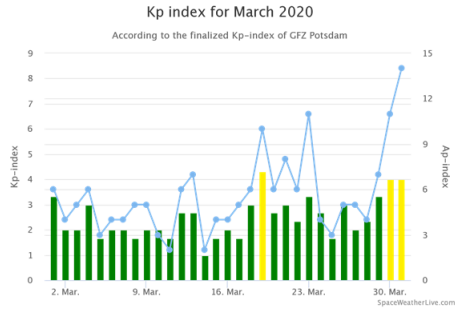
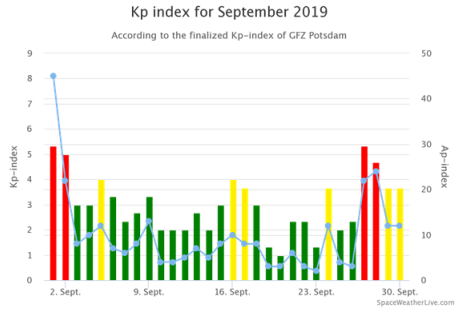
Jeomanyetik hareketlilik indeksleri iyonküre model parametrelerini oluşturmaktadır. k_p indisi 0-9 aralığında değerler alabilen ve üç saatlik aralıklarla iyonküre aktivitelerini gösterir, Dst indisi ise jeomanyetik fırtına seviyesini göstermektedir [41]. Bu tezde incelenen günler için iyonküre k_p ve Dst indeksleri Şekil 8.1-8.3'te verilmiştir.



Şekil Ek 1: 2019 yılı Şubat ve Mart ayları için k_p ve Dst indeksi, [48, 49]



Şekil Ek 2: 2020 yılı Ocak ve Şubat ayları için k_p ve Dst indeksi, [48, 49]



Şekil Ek 3: 2019 yılı Eylül ayı ve 2020 yılı Mart ayı için k_p ve Dst indeksi, [48, 49]

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ayşegül OTRAKÇIER

Doğum yeri : -

Doğum tarihi : -

Medeni hali : -

Yazışma adresi : -

Telefon : -

Yabancı dili : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği (2012-2017)

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği (2017-2021)