

**KRIGING VE RASSAL ALAN ÖNCÜLÜ İLE TOPLAM
ELEKTRON İÇERİĞİ HARİTALAMASI**

**TOTAL ELECTRON CONTENT MAPPING USING
KRIGING AND RANDOM FIELD PRIORS**

İŞILTAN SAYIN

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2008

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof. Dr. Erhan Tercan

Üye (Danışman) :
Prof. Dr. Feza Arıkan

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Atila Yılmaz

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Ali Ziya Alkar

Üye :
Yrd. Doç. Dr. Cenk Toker

ONAY

Bu tez/....../2008 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

....../....../2008

Prof.Dr. Erdem Yazgan
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

KRIGING VE RASSAL ALAN ÖNCÜLÜ İLE TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİ HARİTALAMASI

İŞİLTAN SAYIN

ÖZ

Haberleşme sistemlerinin başarımlarının iyileştirilmesinde iyonosfer değişkenliğinin gözlenmesi ve tahmini önemlidir. Toplam Elektron İçeriği (TEİ) iyonosferdeki değişkenliği incelemek için kullanılabilir en önemli parametrelerden biridir. TEİ gözlemleri uzayda ve konumda sayıca sınırlıdır. İyonosferin ölçüm alınamayan yer ve zamanlarda da incelenebilmesi için gürbüz aradeğerleme yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, konumsal değişkenlerin kestiriminde kullanılan Kriging ve Rassal Alan Öncülü yöntemlerinin başarımları hem sentetik TEİ veriler üzerinde, hem de Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) alıcılarından elde edilen TEİ kestirimleri kullanılarak incelenmiştir. Sentetik TEİ verileri rassal fonksiyonların gerçeklemeleri ile elde edilmiştir. Aradeğerleme başarımları, örnek sayısı, örnekleme düzeni, yüzeyin değişintisi, konumsal bağımlılığı ve yönseme fonksiyonu parametreleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Aradeğerleme benzetimlerinin sonucunda, aradeğerlemelerin başarımlarını etkileyen önemli bir parametrenin yönseme fonksiyonu varsayımı olduğu sonucuna varılmıştır. Doğru yönsemeyi varsayan yöntem daha az hata vermektedir. Düzenli örneklemler ile yöntemler birbirine yakın sonuçlar vermekteyken rassal örneklemlerde yöntemlerin hata değerleri arasındaki fark artmakta ve doğru yönseme varsayan aradeğerleme yöntemi daha az hata vermektedir. Genel olarak yüzeyin değişkenliği arttıkça ve örnek sayısı azaldıkça aradeğerleme hataları artmaktadır. Az sayıda ve seyrek dağılmış örneklemlerde, sabit yönseme varsayan Kriging yönteminin daha değişken yönseme varsayan yöntemlere göre daha gürbüz olduğu sonucuna ulaşılmıştır. TEİ rassal fonksiyonunun yarideğişintisi yeni bir teknik ile kestirilmiştir. Yaklaşık olarak 3000 km'lik bir uzaklıktan sonra konumsal bağımlılığın azaldığı gözlenmiştir. 16 Ekim 2004 günü için Avrupa'daki 39 YKS istasyonundan elde edilen veriler kullanılarak günün belirli saatlerindeki TEİ dağılımının haritaları elde edilmiştir ve sentetik TEİ çalışmalarında elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İyonosfer, Toplam Elektron İçeriği, Kriging, Rassal Alan Öncülü, Yerküresel Konumlama Sistemi

Danışman: Prof. Dr. Feza Arıkan, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

TOTAL ELECTRON CONTENT MAPPING USING KRIGING AND RANDOM FIELD PRIORS ii

IŞILTAN SAYIN

ABSTRACT

The performance of communication systems can be improved by investigating and predicting the ionospheric variability. Total Electron Content (TEC) is an important parameter that can be used to investigate the ionospheric variability. Since TEC measurements are sparse both in space and time, it is necessary to have robust methods to interpolate the measurements on a dense grid to investigate the ionosphere. In this study, the performances of two spatial interpolation methods, namely, Kriging and Random Field Priors are investigated by using both the synthetic TEC data and the TEC estimations derived from the Global Positioning System (GPS) observables. The synthetic TEC data is obtained by generating the realizations of a random function. The interpolation performance of the algorithms are compared over the sample number, sampling patterns, and the variance, spatial correlation and trend of the TEC surface. It is observed that the trend assumption of the methods is the predominant source of error, especially for the random sampling patterns. The errors obtained with random sampling, when the surface does not contain the assumed trend, is larger than that of regular samplings. Also, for increasing variance and decreasing range values, usually the errors increase for all methods. With increasing number of samples, interpolation errors decrease. For sparse and clustered samples in synthetic surfaces, Kriging methods that assume higher order trends produce larger errors compared to the methods that assume constant trends. Semivariogram of the TEC values derived from the GPS observables are estimated with a new proxy technique. It is observed that after a distance lag of 3000 km the correlation of the TEC values decreases. For the day 16 October 2004, by using the data of 39 GPS stations in Europe, the TEC maps are obtained in accordance with previous synthetic TEC study results.

Keywords: Ionosphere, Total Electron Content, Kriging, Random Field Priors, Global Positioning System

Advisor: Prof. Dr. Feza Arıkan, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

TEŞEKKÜR

iii

Bu tezin oluŐmasında beni cesaretlendiren, değerli fikir ve yardımları ile büyük katkıları olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Feza Arıkan'a teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini paylaŐan değerli jüri üyelerine teşekkür ederim.

Değerli görüş ve önerileri için Sayın Prof. Dr. Orhan Arıkan'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve beni destekleyen anneme, babama ve ablama teşekkür ederim.

KurtuluŐ Erinç Akdoğan, Melike Gürün ve Nisa Türel'e göstermiş oldukları destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Sağladıkları gülyüzlü ortam, destek ve yardımları için tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1 GİRİŞ	1
2 RASSAL FONKSİYONLARIN TEİ KESTİRİMİNDE KULLANIMI	7
3 İYONOSFER MODELİ	12
3.1 İyonosfer İnceleme Teknikleri	15
3.2 YKS-TEİ Ölçüm Modeli	17
3.3 D-TEİ Yöntemi	22
3.4 Model, Ölçüm ve Kestirim Vektörleri	23
4 LİTERATÜRDEKİ TEİ HARİTALAMA YÖNTEMLERİ	24
4.1 Uzaklığın Karesinin Tersine ile Ağırlıklandırma	24
4.2 Taylor Serisi Açılımı (Fonksiyon Tabanlı Model)	24
4.3 Küresel Harmonikler	25
4.4 İnce Katmanlı Spline Aradeğerleme	25
4.5 Multikvadratik Fonksiyon Modeli	26
4.6 Kriging	26
4.7 Yapay Sinir Ağları	26
4.8 Dalgacık Analiz Yöntemi	27
4.9 Yöntemlerin Karşılaştırılması	27
5 KRIGING	30
5.1 Ortalamalı (Simple) Kriging	32
5.2 Ortalamasız (Ordinary) Kriging	34
5.3 Evrensel Kriging	36
6 RASSAL ALAN ÖNCÜLÜ İLE ARADEĞERLEME	39
7 SENTETİK TEİ HARİTALAMA BENZETİMİ	41
7.1 Sentetik TEİ Yüzeylerinde Aradeğerleme Uygulaması	41

8	KONUMSAL SEMIVARIOGRAM FONKSİYONU KESTİRİMİ.....	65
8.1	GIM ve GIMn Kullanılarak Yönsme ve Semivariogram Kestirimi.....	67
8.2	D-TEİ ve D-TEİn Kullanılarak Yönsme ve Semivariogram Kestirimi.....	68
9	D-TEİ VERİLERİ KULLANILARAK ELDE EDİLEN TEİ HARİTALARI ...	75
10	SONUÇ.....	85
	KAYNAKLAR	88
	EKLER	93
	EK A Delme Noktalarının Koordinatları	93
	EK B Cholesky Ayrıştırma Yöntemi ile Sentetik Veri Benzetimi.....	96
	EK C Aradeğerleme Ortalama Normalize Hata Grafikleri	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
1.1 Elektron yoğunluğunun yükseklikle tipik değişimi.....	1
3.1 Leksikografik indeks ile üç boyutlu uzaydaki değerlerin bir boyutta dizilmesi.	14
5.1 Izgara noktaları ve ölçüm noktalarının koordinatları.	32
7.1 Yönseme fonksiyonları, a) $\mu_1(\mathbf{x})$, b) $\mu_2(\mathbf{x})$, c) $\mu_3(\mathbf{x})$, d) $\mu_4(\mathbf{x})$, e) $\mu_5(\mathbf{x})$, f) $\mu_6(\mathbf{x})$	43
7.2 a) $n_g = 10$ ve b) $n_g = 100$ için $\mu_5(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, kümeli örnekleme ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri	45
7.3 Yönseme fonksiyonu ve ortalama normalize hata, $\sigma^2 = 1.44$, birbiçimli örnekleme, $N_a = 30$, a) $\mu_{1-4}(\mathbf{x})$, $a = 5$, b) $\mu_{1-4}(\mathbf{x})$, $a = 15$, c) $\mu_{5-6}(\mathbf{x})$, $a = 5$, d) $\mu_{5-6}(\mathbf{x})$, $a = 15$	52
7.4 Örnekleme düzeni ve ortalama normalize hata, $\mu_3(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, $N_a = 30$	52
7.5 Örnek sayısı ve ortalama normalize hata, $\mu_3(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, birbiçimli örnekleme.	53
7.6 a) $\mu_6(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$ için yüzey, b) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (a)'daki yüzeyin RAÖ yöntemi ile aradeğerlemesi, c) $\mu_2(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$ için yüzey, d) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (c)'deki yüzeyin RAÖ yöntemi ile aradeğerlemesi. '*' örnekleme noktalarıdır.....	55
7.7 a) $\mu_1(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$ için yüzey, b) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (a)'daki yüzeyin NK yöntemi ile aradeğerlemesi, c) $\mu_2(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$ için yüzey, d) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (c)'deki yüzeyin NK yöntemi ile aradeğerlemesi. '*' örnekleme noktalarıdır.	56
7.8 a) $\mu_1(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$ için yüzey, b) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (a)'daki yüzeyin EK1 yöntemi ile aradeğerlemesi, c) $\mu_5(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$ için yüzey, d) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (c)'deki yüzeyin EK1 yöntemi ile aradeğerlemesi. '*' örnekleme noktalarıdır.	57

7.9	a) $\mu_1(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$ için yüzey, b) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (a)'daki yüzeyin EK2 yöntemi ile aradeğerlemesi, c) $\mu_6(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$ için yüzey, d) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (c)'deki yüzeyin EK2 yöntemi ile aradeğerlemesi. '*' örnekleme noktalarıdır.	58
7.10	Kümeli örnekleme, $N_a = 10$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$ ve $\mu_3(\mathbf{x})$ için a) RAÖ, b) NK, c) EK1, d) EK2 yöntemleri ile elde edilen normalize hata değerleri	59
7.11	Kümeli örnekleme, $N_a = 20$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$ ve $\mu_3(\mathbf{x})$ için a) RAÖ, b) NK, c) EK1, d) EK2 yöntemleri ile elde edilen normalize hata değerleri	60
7.12	Kümeli örnekleme, $N_a = 30$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$ ve $\mu_3(\mathbf{x})$ için a) RAÖ, b) NK, c) EK1, d) EK2 yöntemleri ile elde edilen normalize hata değerleri	61
8.1	Ekim 2004 ayı için Ankara istasyonu üzerindeki günlük TEİ değerleri....	68
8.2	a) GIM, b) GIMn haritaları 16 Ekim 2004, 1200UT	69
8.3	16 Mayıs 2004 günü için GIM ve GIMn değerleri ile elde edilen deneysel semivariogram fonksiyonları, a) 0200UT, b) 0600UT, c)1200UT, d) 1800UT, e) 2200UT.....	70
8.4	16 Ekim 2004 günü için GIM ve GIMn değerleri ile elde edilen deneysel semivariogram fonksiyonları, a) 0200UT, b) 0600UT, c)1200UT, d) 1800UT, e) 2200UT.....	71
8.5	İncelenen IGS istasyonlarının dağılımı	73
8.6	D-TEİ ve D-TEİn kullanılarak bulunan deneysel semivariogramlar	74
9.1	16 Ekim 2004 günü için deneysel ve teorik semivariogramlar.....	77
9.2	16 Ekim 2004 0200UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değişimlerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değişimleri.	80
9.3	16 Ekim 2004 0600UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değişimlerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değişimleri.....	81

9.4	16 Ekim 2004 1200UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değişintilerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değişintileri.	82
9.5	16 Ekim 2004 1800UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değişintilerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değişintileri.	83
9.6	16 Ekim 2004 2200UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değişintilerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değişintileri.	84
A.1	Tek katmanlı iyonosfer modeli (SLIM) delme noktası, uydu ve alıcı koordinatları	95
C.1	Kare örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$	99
C.2	Kare örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$	100
C.3	Kare örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$	101
C.4	Kare örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$	102

- C.5 Kare örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$,
 $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$,
 $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$,
 $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$ 103
- C.6 Kare örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$,
 $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$,
 $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$,
 $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$ 104
- C.7 Üçgen örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$,
 $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$,
 $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$,
 $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$ 105
- C.8 Üçgen örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$,
 $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$,
 $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$,
 $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$ 106
- C.9 Üçgen örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$,
 $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$,
 $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$,
 $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$ 107
- C.10 Üçgen örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$,
 $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$,
 $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$,
 $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$ 108
- C.11 Üçgen örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$,
 $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$,
 $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$,
 $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$ 109
- C.12 Üçgen örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$,
 $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$,
 $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$,
 $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$ 110

- C.13 Altıgen örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 111
- C.14 Altıgen örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 112
- C.15 Altıgen örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 113
- C.16 Altıgen örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 114
- C.17 Altıgen örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 115
- C.18 Altıgen örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 116
- C.19 Birbiçimli örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 117
- C.20 Birbiçimli örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 118

- C.21 Birbiçimli örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 119
- C.22 Birbiçimli örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 120
- C.23 Birbiçimli örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 121
- C.24 Birbiçimli örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 122
- C.25 Engelli örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 123
- C.26 Engelli örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 124
- C.27 Engelli örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 125
- C.28 Engelli örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64, a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64, a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64, a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44, a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44, a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44, a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56, a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56, a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56, a = 15$ 126

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.1 Kare, Altıgen, Birbiçimli ve Kümeli örnekleme ile ortalama bağıl hata, $N_a = 30, \sigma^2 = 1,44, a = 5$	53
7.2 Tüm σ^2 ve a değerleri için, örnek sayısı arttıkça EK2'nin NK'e göre en büyük bağıl hata değerleri	54
7.3 Poisson kümeli örnekleme düzeni, örnek sayısı $N_a = 10$ için bütün değişinti σ^2 , yapısal uzaklık a , gerçekleştirme n ve yönseme $\mu(\mathbf{x})$ fonksiyonları üzerinden yöntemlerin verdikleri en fazla ve en az normalize hata ϵ_n değerleri	54
7.4 Poisson kümeli örnekleme düzeni, örnek sayısı $N_a = 10$, dağılımı Avrupadaki YKS istasyonlarının dağılımına benzeyen 80. gerçekleştirme için, bütün değişinti σ^2 , yapısal uzaklık a , gerçekleştirme n ve yönseme $\mu(\mathbf{x})$ fonksiyonları üzerinden yöntemlerin verdikleri en fazla ve en az normalize hata ϵ_n değerleri.....	55
7.5 $\mu_3(\mathbf{x})$, en iyi $(\sigma^2, a) = (0.64, 5)$ ortalama $(\sigma^2, a) = (1.44, 15)$ ve $(\sigma^2, a) = (1.44, 5)$ ve en kötü $(\sigma^2, a) = (2.56, 5)$ durumlar, $N_a = 20$ ve 30 , altıgen, birbiçimli, kümeli örnekleme için ortalama normalize hata değerleri. ..	62
7.6 $\mu_3(\mathbf{x})$, en iyi $(\sigma^2, a) = (0.64, 5)$ ortalama $(\sigma^2, a) = (1.44, 15)$ ve $(\sigma^2, a) = (1.44, 5)$ ve en kötü $(\sigma^2, a) = (2.56, 5)$ durumlar, $N_a = 20$ ve 30 , altıgen, birbiçimli, kümeli örnekleme için en büyük hata değerleri.	63
7.7 $\mu_3(\mathbf{x})$, en iyi $(\sigma^2, a) = (0.64, 5)$ ortalama $(\sigma^2, a) = (1.44, 15)$ ve $(\sigma^2, a) = (1.44, 5)$ ve en kötü $(\sigma^2, a) = (2.56, 5)$ durumlar, $N_a = 20$ ve 30 , altıgen, birbiçimli, kümeli örnekleme için ortalama hata değerleri.....	64
8.1 YKS istasyonlarının listesi	72
9.1 16 Ekim 2004 günü incelenen saatlerdeki üssel semivariogram parametreleri.	76
9.2 16 Ekim 2004 günü çapraz doğrulama ile elde edilen bağıl hatalar, ϵ_{r_x} ...	78
9.3 16 Ekim 2004 günü çapraz doğrulama ile elde edilen kestirim hataları, ϵ_x (TECU).....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BLUE	: Best Linear Unbiased Estimator
CODE	: Center of Orbit Determination Europe
D-TEİ	: Düzgünleştirilmiş TEİ Kestirim Yöntemi
EK	: Evrensel Kriging
ESA	: European Space Agency
GIM	: Global Ionosphere Maps
IGS	: International GPS Service
IONEX	: Ionosphere Map EXchange Format
IRI	: International Reference Ionosphere
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
KD	: Kısa Dalga
NK	: Ortalamasız Kriging
RAÖ	: Rassal Alan Öncülü
RINEX	: Receiver Independent EXchange Format
SLIM	: Single Layer Ionosphere Model
STEC	: Slant Ray Total Electron Content
TEİ	: Toplam Elektron İçeriği
UPC	: Polytechnical University of Catalonia
VTEC	: Vertical Total Electron Content
YKS	: Yerküresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS)

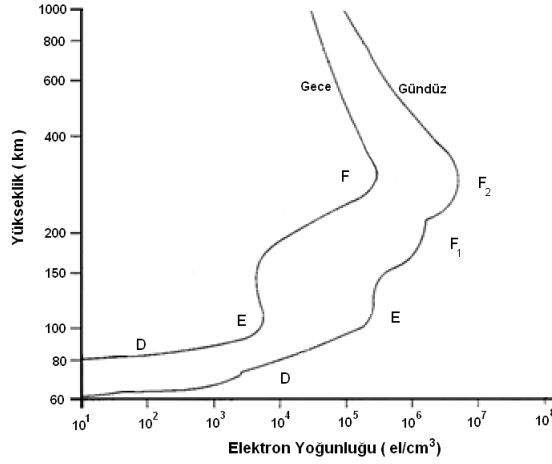
SÖZLÜK DİZİNİ

Aradeğerleme	: Interpolation
Bağıl	: Relative
Beklenti	: Expectation
Çapraz Doğrulama	: Crossvalidation
Dağıtıcı	: Dispersive
Delme Noktası	: Pierce Point
Değişinti	: Variance
Dikgen	: Orthogonal
Dönme	: Rotation
Durağanlık	: Stationarity
Düzensiz	: Sporadic
Eğiklik Faktörü	: Slant Factor
Enküçültme	: Minimization
Eşdeğişinti	: Covariance
Evrensel Kriging	: Universal Kriging
Gürbüz	: Robust
Özünlü	: Intrinsic
Kalıntı	: Residual
Kutuplanma	: Polarization
Külçe Etkisi	: Nugget Effect
Mutlak	: Absolute
Ortalamalı Kriging	: Simple Kriging
Ortalamasız Kriging	: Ordinary Kriging
Ortanca	: Median
Rassal	: Random
Saçılma	: Dispersion
Seyir	: Navigation
Sıradan	: Ordinary
Sıradışı	: Extraordinary
Sonda	: Sounder
Sözde Menzil	: Pseudorange

Toplam Elektron İçeriği	: Total Electron Content
Yanca	: Azimuth
Yanlılık	: Bias
Yapısal Uzaklık	: Range
Yerküresel Konumlama Sistemi	: Global Positioning System
Yön Bağımlı	: Anisotropic
Yön Bağımsız	: Isotropic
Yönseme	: Trend
Yükseklik Açısı	: Elevation Angle
Zenit	: Zenith

1. GİRİŞ

Güneşten gelen, yüksek enerjili morötesi ve X ışınları, atmosferde iyonlaşmaya neden olur. İyonlaşma sonucu açığa çıkan eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyonların oluşturduğu nötr plazma ortamı iyonosfer olarak adlandırılır. İçerdiği atom ve moleküllerin çeşitleri yükseklikle değiştiği ve bunların ışınları soğurma oranları farklı olduğu için iyonosfer D, E, F1 ve F2 katmanlarına ayrılmıştır. Elektron yoğunluğunun en yüksek değeri F2 katmanındadır [18]. Şekil 1'de elektron yoğunluğunun gece ve gündüz zamanları için yükseklikle değişimi verilmiştir. Geceleri elektron yoğunluğu azalmakta, D ve F1 katmanları kaybolmaktadır [40].



Şekil 1.1: Elektron yoğunluğunun yükseklikle tipik değişimi

İyonosfer elektromanyetik dalgaları frekanslarına göre kırmakta, yansıtmakta veya soğurmaktadır. Nötr parçacıkların fazla olduğu D katmanında, gelen dalga'nın etkisi ile salınım yapan elektronlar bu parçacıklarla çarpışarak dalga'nın enerjisini soğurmaktadırlar. Frekansı az olan dalgalar, frekansı fazla olanlara göre daha çok soğurulmaktadır. E ve F katmanlarında elektron yoğunluğu fazla ama nötr parçacık sayısı D katmanına göre daha azdır. Bu yüzden atmosferin yüksek katmanlarında sinyaller daha az soğurulmaktadır [40].

50 MHz'e kadar olan Kısa Dalga (KD) sinyaller iyonosferden yansırken, bu frekansın üzerindeki sinyaller frekanslarının fonksiyonu olan kırılma uğrayarak iyonosferden geçebilmektedirler. Kırılma indeksi elektron yoğunluğunun ve frekansın fonksiyonudur. Elektron yoğunluğu arttıkça ve frekans azaldıkça kırılma indeksi sifıra yaklaşır. Elektron yoğunluğunun en fazla olduğu yükseklik, 300 km ile 500 km arasındadır.

Düşük frekanslarda radyo sinyali iyonosferde yukarıya doğru ilerlerken, artan elektron yoğunluğundan dolayı kırılma indeksi azalır. Kırılma indeksinin sıfıra eşit olduğu durumda radyo sinyali iyonosferden yansır. Yüksek frekanslarda ise radyo sinyalinin kırılma indeksi elektron yoğunluğunun en fazla olduğu yüksekliğe kadar sıfır değerine ulaşmaz ise bu yükseklikten sonra elektron yoğunluğu azaldığı için kırılma indeksi artarak 1 değerine yaklaşır ve radyo sinyali iyonosferden geçerek uzaya ulaşabilir [40].

KD sinyallerin iyonosferden ve yerden yansması ile çok uzak mesafelerde yersel iletişimin yapılması sağlanır. Daha yüksek frekanslardaki sinyaller ise iyonosferden geçerken frekanslarının fonksiyonu olan gecikmelere uğrarlar [28]. İyonosferden kaynaklanan bu gecikme uydu seyrüsefer ve iletişim sistemlerindeki başlıca hata kaynaklarından biridir. Sonuç olarak, uydu iletişim sistemlerindeki gecikme hatası ve KD iletişimde kullanılacak frekanslar iyonosferdeki elektron miktarına ve uzay ve zamanda dağılımına bağlıdır.

İyonosfer dünyanın manyetik alanı ve güneş aktivitesinden etkilenmektedir. Güneş patlamalarından kaynaklanan güneşin manyetik alanındaki bozulmalar güneş rüzgarı ile dünyanın manyetik alanında ani değişimlere sebep olmaktadır. Manyetik fırtına olarak adlandırılan bu değişimler sırasında iyonosferin yapısında bozulmalar gözlenmektedir. Bu da KD ve uydu iletişim sistemlerinin başarımlarını olumsuz yönde etkilemektedir [40].

Güneş aktivitesi, uyduları ve uzay araçlarını da etkilemektedir. Yüksek parçacıkların yoğun olarak bulunduğu bir ortamla karşılaşan uzay aracının yüzeyinde bir elektrik yükü farkı oluşmaktadır. Bu elektrik yükünün boşalımı sırasında oluşan arklardan dolayı bu sistemlerin üzerinde bulunan elektriksel donanımlar zarar görebilmektedir [40].

İyonosfer yüksek enlemler, orta enlemler ve ekvatorial enlemlerde farklı özellikler gösterir. Orta enlemlerdeki iyonosfer özellikleri diğer bölgelere göre daha sakin ve daha az değişkendir ve bu bölgede iyonosfer değişkenliğini inceleyebilecek ölçüm aletleri çoğunluktadır [18].

Sonuç olarak güneş aktivitesinin takip edilip güneşten gelecek yüksek enerjili parçacıkların uzay araçları ve insan sağlığına zararlı etkileri için önlem alınmasında, uzak mesafelerde KD iletişimde hangi radyo frekanslarında ne zaman daha kaliteli iletişimin yapılabileceğinin belirlenmesinde, uydu iletişimi ve seyrüsefer sistemlerindeki

gecikme hatalarının enaza indirilebilmesi için iyonosferin yapısının bilinmesi veya doğru bir şekilde kestirimi önemli bir rol oynamaktadır.

Bir metre kare kesitli bir silindir içindeki toplam elektron sayısı olarak tanımlanan Toplam Elektron İçeriği (TEİ), iyonosferin incelenmesinde kullanılacak en önemli parametrelerden biridir. Birimi TECU ile ifade edilir ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$). TEİ, güneşteki hareketlilik, fiziksel olaylar, dünyanın manyetik alanı, güneş lekesi değişim periyodu, konum, mevsim, günün saati gibi pek çok faktörün karmaşık bir fonksiyonudur [37].

İyonosonda, evreuyumsuz geri saçılım radarı, TOPEX/Poseidon uydusu, çift frekanslı Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) alıcıları TEİ kestiriminde kullanılacak veriyi sağlayabilirler. İyonosondalar yüksek frekansta radyo dalgaları göndererek dalganın kırıcı iyonosfer tabakasından yansıdıktan sonra geri dönmesi arasında geçen zamana ölçerek çalışırlar. İyonosondalar sadece en fazla elektron yoğunluğunun bulunduğu noktanın aşağısını inceleyebilirler. Geri saçılım radarı ise iyonosferin üst katmanlarını da inceleyebilir ama iyonosondaya göre maliyeti fazladır. YYS ölçümlerinden elde edilen TEİ değerleri ile yapılan haritalar bu yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir [18]. İyonosfer değişkenliğinin YYS alıcıları ile incelenmesi, dünya üzerinde geniş alanlara yayılmış bulunan ve sürekli çalışan YYS alıcıları sayesinde, diğer ölçüm aletlerine göre daha ekonomik ve kolaydır.

YYS'de, yeryüzünden 20.200 km yükseklikteki 28 aktif uydudan sürekli olarak, iki farklı taşıyıcı frekansında ($f_1 = 1572,42 \text{ MHz}$ ve $f_2 = 1227,6 \text{ MHz}$) sinyaller gönderilir. Gönderilen sinyaller, frekanslarına bağlı olarak, iyonosferden geçerken gecikmeye uğrarlar. YYS alıcıları konumlama hassasiyetlerini artırmak için iyonosferden kaynaklanan bu gecikmeyi düzeltmelidir. Bu durum YYS alıcılarının konumlama hassasiyetini düşürürken iyonosferin içeriğini inceleme fırsatı sunar. İki farklı frekans bandında da çalışan YYS alıcılarından alınan sözde menzil veya faz verilerinden faydalanarak TEİ kestirilebilir [37; 29].

TEİ haritalaması, iyonosfer kesişim noktalarında ölçülen değerler kullanılarak, aradeğerleme ve dışdeğerleme yöntemleriyle, konumda ve zamanda ölçüm yapılamayan yerlerdeki TEİ değerlerinin düzenli ve sık noktalarda kestirimidir. TEİ aradeğerleme yöntemleri, genel olarak, ızgara tabanlı ve fonksiyon tabanlı yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Izgara tabanlı yöntemlerde ızgara noktaları üzerindeki TEİ

değerleri ölçüm noktalarındaki TEİ değerlerinden kestirilmektedir. Fonksiyon tabanlı yöntemlerde ise TEİ dağılımını ifade edebilecek bir fonksiyonun parametreleri TEİ ölçümlerinden kestirilmeye çalışılmaktadır. Literatürde TEİ aradeğerleme için Küresel Harmonik taban fonksiyonları ile açılım, Multikuadrik fonksiyon uyarlama, Spline, uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma, yapay sinir ağları kullanılmıştır. Jeostatistikte sıkça kullanılan Kriging, TEİ aradeğerlemede sınırlı bir sayıda uygulanmıştır. Wielgosz et al. [46] Kriging ve Multikuadrik yöntemlerini YKS'den elde edilen TEİ değerlerinin aradeğerlemede kullanmış ve yakın sonuçlar elde etmiştir. Moon [28], Küresel Harmonik ve Spline yöntemlerini farklı yoğunlukta iki ayrı YKS ağı üzerinde denemiştir.

Bu çalışmada iyonosferin sakin ve bozulmalı günleri için orta enlemlerdeki TEİ dağılımına benzer özelliklerde sentetik TEİ verileri elde edilmeye çalışılmıştır. Sentetik TEİ verileri iyonosferdeki büyük ölçekli değişiklikleri modelleyebilecek bir yönseme fonksiyonuna küçük ölçekli değişimleri modelleyebilecek konumsal olarak ilintili ve durağan bir rassal fonksiyonun eklenmesi ile elde edilmiştir. Yönseme fonksiyonları için sabit, doğrusal, ikinci dereceden polinom, ve Gauss fonksiyonları kullanılmış, küçük ölçekli değişimler için ise durağan bir rassal fonksiyonun, farklı değışinti değerlerinde ve konumsal bağımlılıkta, gerçeklemeleri kullanılmıştır. Sentetik TEİ verilerinin kare, üçgen, altıgen ızgara örnekleme ve birbiçimli, engelli ve kümeli rassal örnekleme çeşitleri ile değışik sayıda alınan örnekler ile Kriging ve Rassal Alan Öncülü (RAÖ) yöntemleri kullanılarak aradeğerlemeleri yapılmıştır. Bu sayede yöntemlerin yönseme fonksiyonu varsayımlarının doğruluğuna bağılı hatalar çeşitli örnekleme düzenleri ve sayıları, verilerdeki değışkenlik seviyeleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Yapılan aradeğerleme benzetimlerinde, genellikle, yüzeyin değışintisi artarken ve yapısal uzaklığı azalırken, yüzey değışkenliği arttığı için hata artmaktadır. Düzenli örneklemelemlerde hata değışkenliği rassal örneklemelemlere göre daha azdır ve yöntemler birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir. Rassal örnekleme ile yapılan aradeğerlemelerde ise yöntemlerin varsayımları yönseme fonksiyonuna göre yöntemlerin hata değışkenliği farklılık göstermektedir. Sabit yönseme fonksiyonu varsayan Kriging yöntemi doğrusal veya ikinci dereceden bir yönseme fonksiyonu içeren bir konumsal değışken için daha fazla hata vermektedir. Ancak değışkenlik arttıkça, bazı durumlarda, artan hata değışkenliği ile beraber diğeri yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verebilmektedir. İkinci dereceden yönseme fonksiyonu varsayan Kriging yöntemi ise, az sayıda örnek ile yapılan

aradeğerlemelerde daha fazla hata değerleri vermiş, artan örnek sayısı ile hata değerleri daha iyi sonuçlar veren yöntemlerin hata değerlerine yaklaşmıştır.

YKS gözlemlerinden elde edilen TEİ değerleri kullanılarak, rassal fonksiyon olarak düşünülen TEİ yüzeyinin yönseme ve semivariogram fonksiyonları kestirilmeye çalışılmıştır. Yönseme fonksiyonlarının kestiriminde IGS merkezlerinin ürettiği GIM haritalarından yararlanılmıştır. Semivariogram kestirimi ise, hem GIM değerleri kullanılarak hem de YKS gözlemlerinden elde edilen TEİ değerleri kullanılarak günün değişik saatleri için yapılmıştır. GIM'lerden ve YKS'den elde edilen TEİ değerlerinden kestirilen deneysel semivariogram fonksiyonlarında yaklaşık 3000 km uzaklıktan sonra TEİ değerleri arasındaki konumsal bağımlılığın azaldığı gözlenmiştir. TEİ değerlerine güneşin zenit açısının etkisinin giderildiği [11]'deki yöntem uygulanarak elde edilen değerlerden semivariogram hesaplandığında ise normalizasyondan dolayı semivariogram değerleri düşmüş ve yine 3000 km'lik bir uzaklıktan sonra konumsal bağımlılığın azaldığı görülmüştür.

YKS gözlemlerinden elde edilen TEİ değerleri kullanılarak Kriging ve RAÖ yöntemleri ile aradeğerlemeler yapılmıştır. Avrupayı kapsayan bir bölge üzerinde 39 YKS istasyonundan elde edilen TEİ verileri kullanılarak 16 Ekim 2004 günü için çeşitli saatlerde TEİ haritaları elde edilmiştir. Gerçek verilerle yapılan aradeğerlemelerde, sentetik verilerle elde edilen bilgilerle uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Çapraz doğrulama yöntemi ile aradeğerleme yöntemlerinin başarımları incelenmiştir. Gece saatlerinde iyonosferdeki TEİ değerlerinde baskın bir yönseme fonksiyonu görülmediği için sabit yönseme fonksiyonu varsayan Kriging yönteminin hata değerleri daha azdır. Diğer zamanlarda ise güneşin etkisinden dolayı TEİ değerlerinde bir yönseme fonksiyonu görüldüğü için, birinci veya ikinci dereceden polinom yönseme fonksiyonu varsayan aradeğerleme yöntemlerinin hataları daha az olmuştur.

Bölüm 2'de doğadaki uzay-zaman süreçlerinin modellenmesinde kullanılan rassal fonksiyon modeli, Bölüm 3'de TEİ değerlerinin nasıl modelleneceği ve TEİ ölçümlerinin YKS'den elde edilmesi, Bölüm 4'te literatürdeki TEİ aradeğerlemede kullanılan yöntemler anlatılmaktadır. Bölüm 5'te Kriging aradeğerleme yöntemi, Bölüm 6'da RAÖ ile aradeğerleme anlatılmaktadır. Kriging ve RAÖ yöntemlerinin sentetik TEİ verilerine uygulanması ve sonuçları ise Bölüm 7'de anlatılmıştır. Bölüm 8'de YKS istasyonlarının gözlemlerinden elde edilen TEİ verileri kullanılarak, rassal fonksiyon

olarak düşünölen TEİ değerlerinin yönseme ve semivariogram fonksiyonlarının kestirimi anlatılmaktadır. YKS gözlemlerinden kestirilen TEİ değerleri kullanılarak elde edilen TEİ haritaları Bölüm 9’da verilmiştir. Bölüm 10’da tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. RASSAL FONKSİYONLARIN TEİ KESTİRİMİNDE KULLANIMI

TEİ uzayda ve zamanda, güneş aktivitesi, mevsimler, enlem, boylam, yerel saat, dünyanın ve güneşin manyetik alanları gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu parametrelerin tümünün değişkenliğinin iyonofere etkisinin incelenerek deterministik bir modelin oluşturulması çok zordur. Bu yüzden istatistiksel bir modelin geliştirilmesi kolaylık sağlayacaktır. Doğada bulunan, konumda ve zamanda değişiklik gösteren birçok süreç, uzay-zamansal rassal fonksiyon olarak modellenmektedir. Rassal fonksiyon modeli, jeoloji maden, çevre, hidrojeoloji, ekonomik risk değerlendirme gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Bu bölümde rassal fonksiyonunun tanımı ve özellikleri anlatılmaktadır.

Olasılık teorisinde, deney, sonucu kesin olarak bilinmeyen olgular ile ilgili gözlem yapmak veya veri toplamak olarak tanımlanır. Rassal bir deneyde, gerçekleşebilecek tüm farklı sonuçların oluşturduğu kümeyle örnek uzay S adı verilir. Örnek uzayın herhangi bir alt kümesi olay $\{s, s \subset S\}$ olarak tanımlanır. Rassal değişken $Z(s)$, s olaylarını, gerçel sayı kümesine eşleyen bir fonksiyondur. Gösterim kolaylığı için, s rassal değişken ifadesinde gösterilmeyebilir. Genellikle rassal değişken büyük harfle Z , rassal değişkenin alabileceği herhangi bir değer ise z ile gösterilir.

$D, D \subseteq R^d$, d boyutlu uzayın sınırlı bir bölgesini, $T, T \subseteq R^1$ ise sınırlı bir zaman aralığını gösterebilir. Uzay-zamansal rassal değişken, $Z(\mathbf{x}, t)$, uzayın herhangi bir \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in D$, noktasında ve herhangi bir t , $t \in T$, anında belli bir olasılık dağılımına göre değerler alabilir. \mathbf{x} noktasında ve t anında $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal değişkeninin, z eşik değerinden küçük olma olasılığı birikimli dağılım fonksiyonu olarak adlandırılır.

$$F(\mathbf{x}, t; z) = P\{Z(\mathbf{x}, t) \leq z\}, \quad \forall z, (\mathbf{x}, t) \in D \times T \quad (2.1)$$

Eş. 2.1'de $F(\cdot)$ fonksiyonu birikimli dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Uzay-zamansal rassal fonksiyon $\{Z(\mathbf{x}, t), (\mathbf{x}, t) \in D \times T\}$, her bir $\mathbf{x} \in D$ noktası ve $t \in T$ anındaki, genellikle bağımlı, rassal değişkenlerin oluşturduğu bir küme olarak tanımlanır [21].

Rassal fonksiyon, rassal değişkenin s olaylarını gerçel sayı kümesine eşlemesi gibi, s olaylarını konum ve zamana bağlı fonksiyonlara eşler. Rassal fonksiyon, rassal değişkenin konum ve zamanda genişletilmiş hali olarak düşünülebilir. $Z(\mathbf{x}, t, s)$ rassal fonksiyonu, s olayının herhangi bir değeri için konum ve zamanın bir fonksiyonunu göstermektedir. Gösterim kolaylığı için s olayı rassal fonksiyon ifadesinde gösterilmeye-

bilir, $Z(\mathbf{x}, t, s) = Z(\mathbf{x}, t)$. $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonunun alabileceği herhangi bir değer $z(\mathbf{x}, t)$ ile gösterilir.

$D \times T$ uzayında tanımlı bir rassal fonksiyonun, uzayda N_u noktada ve zamanda N_t anda ayırık hale getirilmesi ile, $N_u N_t$ tane rassal değişken elde edilir. $D \times T$ uzayının ayrıklaştırılmış halinde, bir rassal fonksiyon, $N_u N_t$ rassal değişkenden oluşan bir vektör $\{Z(\mathbf{x}_1, t_1), \dots, Z(\mathbf{x}_{N_u}, t_{N_t})\}$ ile ifade edilir. Bu vektörün istatistiksel özelliği $N_u N_t$ değişkenli ortak birikimli dağılım fonksiyonu ile tanımlanır.

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}_1, t_1, \dots, \mathbf{x}_{N_u}, t_{N_t}; z_{1;1}, \dots, z_{N_u;N_t}) \\ = P\{Z(\mathbf{x}_1, t_1) \leq z_{1;1}, \dots, Z(\mathbf{x}_{N_u}, t_{N_t}) \leq z_{N_u;N_t}\} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Tüm N_u , N_t pozitif tamsayı seçenekleri ve tüm uzay-zaman nokta seçenekleri için oluşturulan birikimli dağılım fonksiyonları kümesi, $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonunun ayrıklaştırılmış halinin bütün istatistiksel özelliğini tanımlar. Bu istatistiksel özelliğin belirlenmesi her bir $(\mathbf{x}, t) \in D \times T$ noktasındaki rassal değişkenin birçok gerçekleşmesini gerektirir. Bu da pratikte hiç bir zaman mümkün değildir. Bu yüzden, genellikle, uzayda aralarında $\mathbf{h} = \mathbf{x} - \mathbf{x}'$, $\mathbf{h} \in D$, vektörü, zamanda $\tau = t - t'$, $\tau \in T$, süresi bulunan nokta çiftleri kümesinden rassal fonksiyonun istatistiksel özelliği ile ilgili bilgi edinmeye çalışılır.

Rassal fonksiyonun istatistiksel özelliklerinin konum ve zamandan bağımsız olması durağanlık olarak tanımlanır [21]. $D \times T$ 'de tanımlı $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonunun ortak birikimli dağılım fonksiyonunun $(\mathbf{h}, \tau) \in D \times T$ ile değişmemesi tam durağanlık olarak adlandırılır. $(\mathbf{h}, \tau) \in D \times T$ öteleme vektörünün herhangi bir değeri için,

$$\{Z(\mathbf{x}_1, t_1), \dots, Z(\mathbf{x}_{N_u}, t_{N_t})\}$$

ve

$$\{Z(\mathbf{x}_1 + \mathbf{h}, t_1 + \tau), \dots, Z(\mathbf{x}_{N_u} + \mathbf{h}, t_{N_t} + \tau)\}$$

rassal değişken vektörlerinin çokdeğişkenli ortak birikimli dağılım fonksiyonları aynı olmalıdır.

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}_1, t_1, \dots, \mathbf{x}_{N_u}, t_{N_t}; z_{1;1}, \dots, z_{N_u;N_t}) \\ = F(\mathbf{x}_1 + \mathbf{h}, t_1 + \tau, \dots, \mathbf{x}_{N_u} + \mathbf{h}, t_{N_t} + \tau; z_{1;1}, \dots, z_{N_u;N_t}) \\ \forall \mathbf{x}_1, t_1, \dots, \mathbf{x}_{N_u}, t_{N_t}, \text{ ve } (\mathbf{h}, \tau) \in D \times T \end{aligned} \quad (2.3)$$

Tam durağanlığın belirlenmesi için rassal değişkenin her noktada ve bütün zamanlar için ortak dağılımının bilinmesi gerekir. İkinci dereceden durağanlık ise rassal değişkenin sadece ilk iki momenti ile ilgilidir. İkinci dereceden durağanlık varsayımında, $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonunun beklentisinin sabit olduğu, eşdeğişinti fonksiyonunun ise sadece konum ve zamandaki ötelemeler ile değiştiği kabul edilir [26].

$$E\{Z(\mathbf{x}, t)\} = \mu \quad (2.4)$$

$$E\{[Z(\mathbf{x}, t) - \mu][Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}, t + \tau) - \mu]\} = cov(\mathbf{h}, \tau) \quad (2.5)$$

Eş. 2.4 ve Eş. 2.5'de $E\{\cdot\}$ beklenti işlevi, $cov(\cdot)$ eşdeğişinti işlevini göstermektedir, $Z(\mathbf{x}, t)$ 'nin beklentisi $\mu(\mathbf{x}, t) = \mu$ zaman ve konumdan bağımsızdır. Eşdeğişinti fonksiyonu $cov(\mathbf{h}, \tau)$ ise sadece zamanda ve konumdaki ötelemeye bağlıdır.

Gauss dağılımlı rassal fonksiyonlar için, ilk iki moment tüm dağılımı tanımladığı için, ikinci dereceden durağanlık tam durağanlığa karşılık gelir. Pratikte bu yaklaşım Gauss dağılımlı olmayan fakat histogramı bir tarafta kümelenmemiş veriler için de uygulanabilir.

Diğer bir durağanlık ise özünlülüdür. Özünlülük bir rassal fonksiyon aşağıdaki denklemleri sağlamalıdır.

$$E\{Z(\mathbf{x}, t) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}, t + \tau)\} = \mu(\mathbf{h}, \tau) \quad (2.6)$$

$$var[Z(\mathbf{x}, t) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}, t + \tau)] = 2\gamma(\mathbf{h}, \tau) \quad (2.7)$$

Eş. 2.7'de $var\{\cdot\}$ değişinti işlevi, $\gamma(\mathbf{h}, \tau)$ semivariogram fonksiyonudur. $\gamma(\mathbf{h}, \tau)$ noktalar arasındaki değişiminin uzaklık ve zaman arttıkça ne kadar arttığını gösterir. İkinci dereceden durağanlıktan farklı olarak özünlülük için rassal fonksiyonun (\mathbf{x}, t) noktasındaki beklentisinin değil, aralarında \mathbf{h} uzaklığı ve τ süresi bulunan noktalardaki rassal fonksiyonun farkının beklentisinin \mathbf{h} ve τ 'ya bağlı olması gerekir. Birbirine yakın noktaların değerleri benzer olacağı için genellikle bu değer sıfır olarak alınır [45]. Farkın değişintisinin ise sadece noktalar arasındaki bağıl uzaklığın ve bağıl zamanın fonksiyonu olması gerekir [8; 26].

İkinci dereceden durağan bir rassal fonksiyon, özünlülük özelliği de gösterir, fakat bu ifadenin tersi her zaman sağlanmayabilir. İkinci dereceden durağan bir rassal fonksiyon için Eş. 2.8 sağlanmalıdır.

$$\gamma(\mathbf{h}, t) = cov(\mathbf{0}, 0) - cov(\mathbf{h}, \tau) \quad (2.8)$$

Rassal fonksiyon ikinci dereceden durağan ise eşdeğişinti fonksiyonu bilindiğinde semi-variogram fonksiyonu da bulunabilir.

Geniş bir bölge veya zaman aralığında değişim gösteren birçok doğal süreç durağan olmayan uzay zamansal rassal fonksiyonlar ile modellenir. Durağan olmama durumu, genellikle rassal fonksiyonun beklentisinin konuma veya zamana veya her ikisine birden bağlı olma durumu ile sınırlanır.

Rassal fonksiyonun kaynaklandığı fiziksel olaya göre değişik uzay-zaman modelleri kullanılmaktadır. Rassal fonksiyon bir yönseme fonksiyonu $\mu(\mathbf{x}, t)$ ile durağan bir rassal fonksiyonun $Y(\mathbf{x}, t)$ toplamı olarak düşünülür.

$$Z(\mathbf{x}, t) = \mu(\mathbf{x}, t) + Y(\mathbf{x}, t) \quad (2.9)$$

Yönseme fonksiyonu deterministik $\mu(\mathbf{x}, t)$ veya rassal $R(\mathbf{x}, t)$ olabilir. Yönseme fonksiyonu rassal olduğunda beklentisi $E\{R(\mathbf{x}, t)\} = \mu(\mathbf{x}, t)$ deterministik yönseme fonksiyonuna eşit olur. Sadece konuma bağlı $\mu_x(\mathbf{x})$ ve sadece zamana bağlı $\mu_t(t)$ yönseme fonksiyonlarının toplamı

$$\mu(\mathbf{x}, t) = \mu_x(\mathbf{x}) + \mu_t(t) \quad (2.10)$$

veya çarpımının

$$\mu(\mathbf{x}, t) = \mu_x(\mathbf{x}) \cdot \mu_t(t) \quad (2.11)$$

deterministik yönseme fonksiyonunu oluşturduğu modeller de bulunmaktadır. Yönseme fonksiyonunun sadece zaman ve sadece konuma bağlı fonksiyonlarla ifade edilmesi, durağan rassal fonksiyon $Y(\mathbf{x}, t)$ içinde aşağıdaki denklemlerdeki gibi uygulanabilir.

$$Y(\mathbf{x}, t) = Y_x(\mathbf{x}) + Y_t(t) \quad (2.12)$$

$$Y(\mathbf{x}, t) = Y_x(\mathbf{x}) \cdot Y_t(t) \quad (2.13)$$

Yönseme fonksiyonundan veya durağan rassal fonksiyondan ayrı ayrı ölçümler alınmadığı için rassal fonksiyonun modellenmesinde fiziksel olaydan çıkarılabilecek yardımcı bilgiler kullanılmalıdır [21].

$Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonun tek bir $z(\mathbf{x}, t)$ gerçekleşmesinden, rassal fonksiyonun istatistiksel özelliklerinin belirlenebileceği varsayımı ergodiklik olarak adlandırılır. Pratikte rassal fonksiyonun tek bir fonksiyonunun kısmi değerleri ile çalışıldığından rassal fonksiyonun ergodik olduğu kabul edilir.

Jeostatistikte, konum ve zamanda yapılan ölçümlerden rassal fonksiyonun özelliği hakkında bilgi elde edebilmek için eşdeğişinti veya semivariogram fonksiyonları kullanılır. Ölçüm yapılamayan noktalardaki eşdeğişinti veya semivariogram bilgisi bu fonksiyonlara uyarlanacak fonksiyonlardan elde edilir.

$Z(\mathbf{x}, t)$ ikinci dereceden durağanlık özelliği gösterdiğinde deneysel uzay-zaman eşdeğişinti fonksiyonu,

$$\widehat{cov}(\mathbf{h}, \tau) = \frac{1}{N(\mathbf{h}, \tau)} \sum_{n_a=1}^{N(\mathbf{h}, \tau)} (z(\mathbf{x}_{n_a}, t_{n_a}) - \mu)(z(\mathbf{x}_{n_a} + \mathbf{h}, t_{n_a} + \tau) - \mu) \quad (2.14)$$

şeklinde, özünlülük durağanlık özelliği gösterdiğinde ise deneysel uzay-zaman semivariogram fonksiyonu,

$$2\hat{\gamma}(\mathbf{h}, \tau) = \frac{1}{N(\mathbf{h}, \tau)} \sum_{n_a=1}^{N(\mathbf{h}, \tau)} (z(\mathbf{x}_{n_a}, t_{n_a}) - z(\mathbf{x}_{n_a} + \mathbf{h}, t_{n_a} + \tau))^2 \quad (2.15)$$

şeklinde yazılabilir [25]. Yukarıdaki denklemlerde $z(\mathbf{x}_{n_a}, t_{n_a})$, \mathbf{x}_{n_a} konumundaki, t_{n_a} anındaki rassal alan ölçümünü, $N(\mathbf{h}, \tau)$, uzayda aralarındaki konum farkı \mathbf{h} vektörü, zamandaki farkları τ olan nokta çiftleri sayısını, μ , rassal alanın ortalamasını göstermektedir. $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal alanı ikinci dereceden durağanlık özelliği göstermediğinde veya Eş. 2.9'daki gibi bir $\mu(\mathbf{x}, t)$ yönseme fonksiyonu içerdiğinde Eş. 2.14 ve Eş. 2.15'teki eşdeğişinti ve semivariogram fonksiyonları yanlılık gösterecek ve bundan dolayı eşdeğişinti veya semivariogram yapısı doğru bir şekilde kestirilemeyecektir. Bu durumda, $\mu(\mathbf{x}, t)$ yönseme fonksiyonu, $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonundan çıkarılarak, eşdeğişinti veya semivariogram fonksiyonları, kalan rassal alan $Y(\mathbf{x}, t)$ üzerinden kestirilmelidir. Ölçüm değerleri ile kestirim yapılırken de ölçüm noktalarındaki $Y(\mathbf{x}, t)$ kalıntı rassal fonksiyonu kullanılarak $Z(\mathbf{x}, t)$ değerinin bulunacağı noktadaki $Y(\mathbf{x}, t)$ kestirilmeli ve yönseme fonksiyonu bu kestirim değerine eklenmelidir.

TEİ konumunda ekvatorial enlemlerde ve güneşi gören boylamlarda daha fazla değerler almaktadır. $\mu(\mathbf{x}, t)$ yönseme fonksiyonu zaman ve konumdaki bu değişimleri ifade edebilir. İyonosferde güneş aktivitesi ve jeomanyetik fırtınalardan dolayı zamanda ve konumda rassal bir değişim de gözlenmektedir. $\mu(\mathbf{x}, t)$ yönseme fonksiyonu üzerinde değişecek $Y(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonu ile iyonosferdeki TEİ, Eş. 2.9'daki gibi $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonu olarak düşünülebilir.

Bölüm 3'te TEİ'nin uzay ve zamanda nasıl ifade edileceği, iyonosfer inceleme teknikleri ve YKS sinyallerinden TEİ kestirimi anlatılmaktadır.

3. İYONOSFER MODELİ

Bu bölümde elektron yoğunluğu ve TEİ değerlerininin uzayda ve zamanda nasıl ifade edilebileceği ve aralarındaki ilişki, Bölüm 3.1'de elektron yoğunluğu veya TEİ ölçüm teknikleri anlatılmaktadır. Bölüm 3.2'de ise YKS uydu ve alıcıları ile TEİ ölçümü elde etme tekniği anlatılmaktadır.

Plazma frekansı veya kritik frekans, w_p , bir ortamın, elektron yoğunluğuna bağlı olarak, yansıtılabileceği sinyallerin en büyük frekans değeridir [40]:

$$w_p = \sqrt{\frac{N_e q^2}{\epsilon_0 m}} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde, N_e elektron yoğunluğu, q bir elektronun yükü, ϵ_0 serbest uzayın dielektrik sabiti, m bir elektronun kütlesini göstermektedir. Elektromanyetik dalganın kırılma indisi ortamın kritik frekansı ve dalganın frekansının bir fonksiyonudur. Plazma ortamının yönbağımsız olduğu düşünülebilen ve iyonosferde çarpışma etkisinin ihmal edildiği KD frekansından daha yüksek frekanslarda yapılan yayınlar için kırılma indisi aşağıdaki gibi yaklaşılabılır [40].

$$n = \sqrt{1 - \frac{w_p^2}{w^2}} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte, w , elektromanyetik dalganın açısal frekansıdır. Elektron yoğunluğu iyonosfer katmanlarında farklı değerler aldığı için sinyaller frekanslarına bağlı olarak farklı yüksekliklerden yansıyacak veya farklı miktarlarda kırılacaklardır. Elektromanyetik dalgalara etkisi frekansa bağlı olduğu için iyonosfer 'dağıtıcı bir ortam' olarak adlandırılır.

Herhangi bir θ enlemi, ϕ boylamı, r yüksekliği ve t anındaki elektron yoğunluğu $G(\theta, \phi, r, t)$ ile gösterilebilir. İyonosferin elektron yoğunluğu bulunmak istenen bölgesi θ yönünde N_θ , ϕ yönünde N_ϕ , r yönünde N_r sayıda nokta ve zamanda N_t an ile ifade edilebilir. Noktalar piksel köşeleri olarak düşünülürse, p_θ , p_ϕ , p_r , sırasıyla piksellerin θ , ϕ ve r yönlerindeki uzunluklarını, p_t ise zaman aralıklarını göstermektedir. Bu durumda herhangi bir noktanın koordinatları, n_θ , n_ϕ , n_r ve n_t indeksleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir [5].

$$\theta_{n_\theta} = \theta_i + p_\theta(n_\theta - 1), \quad 1 \leq n_\theta \leq N_\theta \quad (3.3)$$

$$\phi_{n_\phi} = \phi_i + p_\phi(n_\phi - 1), \quad 1 \leq n_\phi \leq N_\phi \quad (3.4)$$

$$r_{n_r} = r_i + p_r(n_r - 1), \quad 1 \leq n_r \leq N_r \quad (3.5)$$

$$t_{n_t} = t_i + p_t(n_t - 1), \quad 1 \leq n_t \leq N_t \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklemlerde, $\theta_i, \phi_i, r_i, t_i$ ilgili yönler ve zamandaki başlangıç değerlerini, $n_\theta, n_\phi, n_r, n_t$ sırasıyla, θ, ϕ, r yönleri ve zamandaki indeksleri göstermektedir. p_t ölçümler arasındaki zaman farkını göstermektedir. θ kuzey yarımkürede pozitif, güney yarımkürede negatif, ϕ ise Greenwich meridyeninin doğusunda pozitif, batısında negatif değerler alır. p_t zaman aralığı, iyonosferin zamanda geniş anlamda durağanlık özelliği gösterdiği sürenin küçük bir kesri olarak seçilirse, bu zaman aralığında iyonosfer istatistiksel olarak yavaş değiştiği için, yapılan ölçümler aynı t_{n_t} anında örneklenmiş gibi düşünülebilir. İyonosferin durağanlık süreleri zaman ve konumla değiştiği için p_t süresi zaman ve uzayda farklı değerler alabilir.

$G(\theta, \phi, r, t)$ elektron yoğunluğunun $(\theta_{n_\theta}, \phi_{n_\phi}, r_{n_r}, t_{n_t})$ noktasındaki değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$G_s(n_\theta, n_\phi, n_r, n_t) = G(\theta_{n_\theta}, \phi_{n_\phi}, r_{n_r}, t_{n_t}) \quad (3.7)$$

Çok boyutlu bir uzayda tanımlanan noktalar, leksikografik sıraya konularak tek bir boyutta ifade edilebilir. Eş. 3.8'de leksikografik l_e indeksi verilmektedir.

$$l_e = n_\theta + (n_\phi - 1)N_\theta + (n_r - 1)N_\theta N_\phi + (n_t - 1)N_\theta N_\phi N_r \quad (3.8)$$

l_e leksikografik indeksi kullanılarak, dört boyutta değer alan $G_s(n_\theta, n_\phi, n_r, n_t)$, matematiksel hesaplama kolaylığı için tek boyutta gösterilebilir.

$$G_s(l_e) = G_s(n_\theta, n_\phi, n_r, n_t) \quad (3.9)$$

$((.)_N)$ modülo N işlevini gösterirse, $n_\theta, n_\phi, n_r, n_t$ indeksleri l_e indeksinden aşağıdaki gibi bulunabilir.

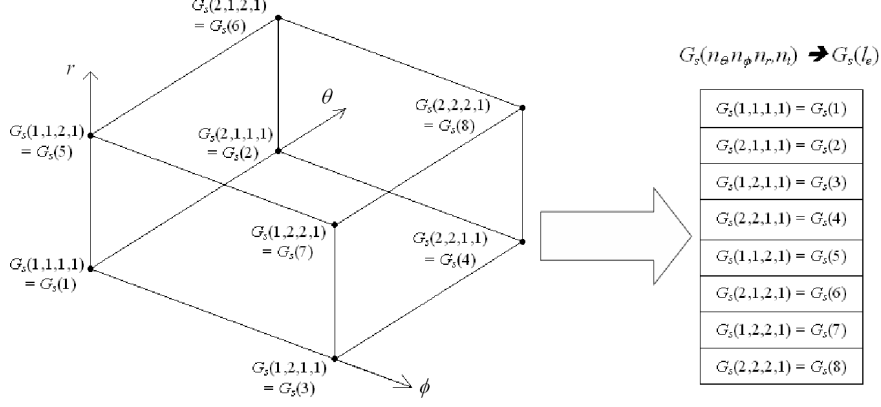
$$n_\theta = ((l_e))_{N_\theta} \quad (3.10)$$

$$n_\phi = \left(\left(\frac{l_e - n_\theta}{N_\theta} \right) \right)_{N_\phi} + 1 \quad (3.11)$$

$$n_r = \left(\left(\frac{l_e - n_\theta - (n_\phi - 1)N_\theta}{N_\theta N_\phi} \right) \right)_{N_r} + 1 \quad (3.12)$$

$$n_t = \left(\frac{l_e - n_\theta - (n_\phi - 1)N_\theta - (n_r - 1)N_\theta N_\phi}{N_\theta N_\phi N_r} \right) + 1 \quad (3.13)$$

Örnek olarak Şekil 3, $N_\theta = 2, N_\phi = 2, N_r = 2$ ve $N_t = 1$ için üç boyutta düzenli olarak yerleştirilmiş değerlerin leksikografik sıraya dizilmiş halini göstermektedir.



Şekil 3.1: Leksikografik indeks ile üç boyutlu uzaydaki değerlerin bir boyutta dizilmesi.

Toplam Elektron İçeriği (TEİ) bir metrekaire kesitli bir silindir içerisindeki toplam serbest elektron miktarıdır. TEİ, elektron yoğunluğunun S yolu boyunca çizgi integrali olarak tanımlanır:

$$\text{TEİ} = \int_S G(\theta, \phi, r, t_{n_t}) ds \quad (3.14)$$

TEİ, elektron yoğunluğunun en fazla olduğu yükseklikte enlem, boylam ve zaman fonksiyonu olarak düşünülebilir. İyonosferde, iyonlaşmanın en fazla olduğu yükseklik, F2 katmanında, 300 km ile 500 km arasındadır. İyonosfer, 60 km yükseklikten başlar ve etkisi 1000 km den sonra azalır. Bu yüzden iyonosfer, serbest elektronların en fazla olduğu yükseklikte bulunan ince bir küresel kabuk olarak modellenebilir [28; 37]. Bu model tek katmanlı iyonosfer modeli (SLIM) olarak adlandırılır. Şekil A.1'de SLIM modeli gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan notasyonda, Eş. 3.5'te $N_r = 1$ değerini alır ve $r_i = r_{eb}$ iyonlaşmanın en fazla olduğu yüksekliği gösterir.

TEİ dağılımı, SLIM modelinin kullanıldığı durumlar için, uzayda ve zamanda $g(\theta, \phi, t)$ ile gösterilebilir. Izgara noktaları üzerinde örneklenmiş TEİ değerleri n_θ , n_ϕ , n_t indeksleri ile

$$g_s(n_\theta, n_\phi, n_t) = g(\theta_{n_\theta}, \phi_{n_\phi}, t_{n_t}) \quad (3.15)$$

olarak verilebilir. l leksikografik indeksi aşağıda verilmektedir.

$$l = n_\theta + (n_\phi - 1)N_\theta + (n_t - 1)N_\theta N_\phi \quad (3.16)$$

l indeksi kullanılarak ızgara noktaları üzerindeki örneklenmiş TEİ değerleri Eş. 3.17'deki gibi yazılabilir.

$$g_s(l) = g_s(n_\theta, n_\phi, n_t) \quad (3.17)$$

Böylece ızgara noktaları üzerindeki TEİ değerleri tek bir boyutta, Eş. 3.18'deki gibi vektör halinde yazılabilir.

$$\mathbf{g}_s = [g_s(1) \ \dots \ g_s(l) \ \dots \ g_s(N_\theta N_\phi N_t)]_{1 \times N_\theta N_\phi N_t}^T \quad (3.18)$$

3.1 İyonosfer İnceleme Teknikleri

İyonosferi incelemek için kullanılan teknikler genel olarak yer merkezli ve uydu teknikleri olarak ikiye ayrılırlar. Yer merkezli tekniklerde yeryüzündeki bir vericiden radyo sinyalleri gönderilerek geri dönen sinyalin gecikme süresi veya gücündeki değişimler, uydu tekniklerinde ise uydudaki bir alıcıdan gönderilen radyo sinyallerinin frekanslarının fonksiyonu olan kırılmalarından kaynaklanan gecikmedeki değişimler kullanılarak iyonosfer yapısı incelenmektedir.

Yer merkezli tekniklerden olan iyonosondalar gönderdikleri radyo sinyalinin geri dönme süresinden, yansıtıcı iyonosfer tabakasının yüksekliğini hesaplarlar. Bu yükseklik kırınımından dolayı gerçek yükseklikten daha fazla olacaktır. Frekans arttıkça radyo sinyalleri daha yüksekteki tabakalardan yansır. Plazma frekansına yaklaştıkça ölçülen yükseklik sonsuza yaklaşır. İyonosondalardan, gönderilen radyo sinyalinin frekansına karşılık sinyalin yansıtıldığı iyonosfer tabakasının yüksekliğini gösteren iyonogram grafikleri elde edilir. İyonogramlardan plazma frekansları elde edilebilir ve plazma frekansı da TEİ ile ilişkilidir. İyonosondalar ile en fazla iyonlaşmanın olduğu iyonosfer tabakasının üzerindeki yüksekliklerde meydana gelen değişimler izlenemez [18].

Evreyuysuz gerisaçılım radarı, iyonosferin üst katmanlarını incelemek için güçlü bir tekniktir, fakat maliyetleri iyonosondalara göre fazladır. Evreyuysuz gerisaçılım radarında, radarın hedefi iyonosferi oluşturan elektronlardır. Her bir elektrondan saçılan enerji miktarı bilindiği için, geri dönen enerji miktarı elektron yoğunluğu ile ilgili bilgi içerecektir [18].

TOPEX/Poseidon uydularının üzerinde bulunan çift frekanslı altimetreler sayesinde TEİ ölçümleri yapılabilmektedir. Faraday dönmesi da iyonosfer incelemelerinde kullanılabilir. Doğrusal kutuplu radyo dalgaları iyonosferde dünyanın manyetik alanı ile etkileşime girdiğinde iki farklı dalganın kutuplanma düzlemi döner. Dalgalardan biri sıradan, diğeri sıradışı olarak isimlendirilir. Faraday döner TEİ ve manyetik alan ile doğru, frekansın karesi ile ters orantılıdır. Faraday dönmesi ile sürekli

olarak gözlem yapılamadığı için iyonosferin uzay ve zamanda aradığı için uygun bir yöntem değildir [20].

Yerküresel Konumlama Sisteminde (YKS), yeryüzünden 20.200 km yükseklikteki 28 aktif uydudan sürekli olarak, farklı taşıyıcı frekanslarında ($f_1 = 1572,42\text{MHz}$ ve $f_2 = 1227,6\text{ MHz}$) iki sinyal gönderilir. Gönderilen sinyaller, frekanslarına bağlı olarak, iyonosferden geçerken gecikmeye uğrarlar. GPS alıcıları konumlama hassasiyetlerini artırmak için bu iyonosfer gecikmesini düzeltmelidirler. Bu durum GPS alıcılarının konumlama hassasiyetini düşürürken iyonosferin içeriğini inceleme fırsatı sunar. İki farklı frekans bandında da çalışan GPS alıcılarından alınan sözde menzil veya faz verilerinden faydalanarak TEİ tahmin edilebilir [28; 29]. YKS alıcıları ile iyonosfer değişkenliğinin incelenmesi, diğer ölçüm aletlerine göre, dünya üzerinde geniş alanlara yayılmış bulunan ve sürekli çalışan YKS alıcıları sayesinde daha kolay ve ekonomiktir. YKS alıcılarından TEİ'nin nasıl elde edildiği Bölüm 3.2'de daha ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

YKS alıcılarından TEİ çeşitli yollardan hesaplanabilir [37; 28; 18]. Bir YKS alıcısı sürekli olarak dört ile oniki arasında uydu görmektedir. Alıcıdan uydulara doğru uzanan çizgilerin, yukarıda anlatılan SLIM modelini kestiği delme noktalarında TEİ değerleri sözde menzil veya faz verilerinden Bölüm 3.2'de anlatıldığı gibi hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada delme noktalarındaki TEİ değerleri \mathbf{v}_c vektörü olarak gösterilecektir.

IGS analiz merkezlerinin yeryüzünde geniş bir bölgeyi kaplayan YKS istasyonları kullanılarak elde edilen GIM haritalarına IONEX formatında ulaşılabilir [37]. \mathbf{v}_{GIM} vektörü UPC, ESA, JPL, CODE, IGS analiz merkezlerinden zamanda iki saat, enlemde 2.5° , boylamda 5° çözünürlüklü haritalardan elde edilebilecek TEİ değerlerini gösterecektir.

IRI ampirik iyonosfer modelinden [6] elde edilecek olan TEİ değerleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. IRI dünya çapında yaygın iyonosonda ağından elde ettiği verileri kullanarak TEİ değerlerini kestirmektedir. Raporun bundan sonraki bölümünde \mathbf{v}_{IRI} vektörü IRI'dan elde edilen TEİ değerlerini gösterecektir.

3.2 YKS-TEİ Ölçüm Modeli

Bu bölümde sözde-menzil ve faz YKS gözlemlerinden TEİ hesaplama yöntemleri anlatılmaktadır. Bilgiler [29] kaynağından derlenmiştir. Daha ayrıntılı bilgi ve kaynaklara burdan ulaşılabilir.

İyonizasyon sonucu ortaya çıkan serbest elektronlar, yaklaşık 50 MHz'in üzerindeki işaretler için yüksek iletkenliğe sahip yön bağımsız bir tabaka oluşturur ve işaretin frekansa bağlı kırılmasına neden olurlar. Kırılma etkisiyle işaretler, grup hızlarının yavaşlamasından dolayı YKS alıcılarına gecikme ile ulaşır. Bu durum YKS sistemindeki konumlama hatasının temel kaynaklarından biridir. Öte yandan f_1 ve f_2 frekanslarındaki işaretlerin gecikmeleri arasındaki fark gözlenerek iyonosferin yapısı incelenebilir.

Sözde menzil, işaretin uydudan gönderilme zamanı ile alıcıya ulaşma zamanı arasında geçen süreye bağlı olarak hesaplanan menzil değeridir. Hesaplanan bu menzil değeri iyonosfer, troposfer, alıcı ve uydu yansılıkları nedeniyle birtakım gecikmeleri de içerdiği için uydu ile alıcı arasındaki gerçek menzil değerinden farklıdır. YKS alıcıları işaret alabildikleri uydulardan sözde menzil değeri hesaplamaktadırlar. f_1 ve f_2 frekanslarındaki işaretler için sözde menzil modeli Eş. 3.19 ve Eş. 3.20'deki gibi kurulabilir:

$$P_{1,u}^m = p_u^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) + \alpha \quad (3.19)$$

$$P_{2,u}^m = p_u^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) + \alpha \quad (3.20)$$

Eş. 3.19 ve 3.20'de, m uydu numarası, u alıcı numarası, c ışık hızı, $d_{ion1,u}^m$ ve $d_{ion2,u}^m$ sırasıyla f_1 ve f_2 frekanslarındaki iyonosferden kaynaklanan grup gecikmesi, $d_{trop,u}^m$ troposferden kaynaklanan grup gecikmesi, Δt^m ve Δt_u uydu ve alıcıların saat hataları, $P_{1,u}^m$ ve $P_{2,u}^m$ f_1 ve f_2 frekanslarına göre sözde menzil, p_u^m uydu ile alıcı arasındaki mesafe, ε_1^m ve ε_2^m , f_1 ve f_2 frekanslarına göre uydu yansılığ, $\varepsilon_{1,u}$ ve $\varepsilon_{2,u}$, f_1 ve f_2 frekanslarına göre alıcı yansılığ, α ölçümlerden gelen artık hatalardır. Eş. 3.19 ve 3.20'de verilen sözde menzil modeline benzer bir model faz verileri için de kurulabilir.

YKS incelemelerinde faz değeri işaretin kaç dalgaboyu yol aldığı ifade etmektedir. Bir başka deyişle faz değeri işaretin tur sayısıdır. YKS alıcıları uydulardan alınan işaretlerin o andaki faz kesrini kaydeder. Uydudan gönderilen işaret alıcıya

ulaşana kadar faz değerinin kaç tur değiştiği ise bilinmemektedir. YKS uydusundan alıcıya ulaşana kadarki fazın değişimini modellemek için alıcının kaydettiği faz değerine bir N^m tamsayı değeri eklenir. Faz sayısının (Φ), dalga boyu (λ) ile çarpımı alınan yolu vereceğinden, faz sayısı için sözde menzil modeline benzer bir model kurulabilir.

$$\lambda_1 \Phi_{1,u}^m = p_u^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m + \lambda_1 \Phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) + \lambda_1 N_1^m + \alpha \quad (3.21)$$

$$\lambda_2 \Phi_{2,u}^m = p_u^m + c(\Delta t_u - \Delta t^m) + \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m + \lambda_2 \Phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) + \lambda_2 N_2^m + \alpha \quad (3.22)$$

Eş. 3.21 ve 3.22’de m uydu numarası, u alıcı numarası, $\Phi_{ion1,u}^m$ ve $\Phi_{ion2,u}^m$ sırasıyla f_1 ve f_2 frekanslarına göre iyonosferden kaynaklanan faz gecikmesi, $\Phi_{1,u}^m$ ve $\Phi_{2,u}^m$, f_1 ve f_2 frekanslarına göre alıcının kaydettiği faz değeri, N_1^m ve N_2^m , f_1 ve f_2 frekanslarına göre m uydusundan alınan işaretteki ilk faz belirsizliği, $\Phi_{trop,u}^m$ troposferden kaynaklanan faz gecikmesidir.

Sözde menzil ve faz gözlem parametreleri alıcılar tarafından Receiver Independent Exchange Format (RINEX) dosyasına kaydedilmektedir. RINEX biçimindeki ölçüm dosyalarına internetten erişilebilmektedir.

Eş. 3.19 ve 3.20 birbirinden çıkarılarak iki farklı frekansta gönderilen işaretin sözde menzil değerleri arasındaki fark Eş. 3.23’teki gibi bulunabilir.

$$P_{4,u}^m = P_{2,u}^m - P_{1,u}^m = d_{ion2,u}^m - d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_2^m - \varepsilon_1^m) + c(\varepsilon_{2,u} - \varepsilon_{1,u}) \quad (3.23)$$

Eş. 3.21 ve 3.22 birbirinden çıkarılırsa, taşıyıcı işaretlerin yol farkı faz değerleri cinsinden Eş. 3.24’teki gibi elde edilir.

$$L_{4,u}^m = \lambda_1 \Phi_{1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{2,u}^m = \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_2^m - \varepsilon_1^m) + c(\varepsilon_{2,u} - \varepsilon_{1,u}) + \Delta N^m \quad (3.24)$$

$$\Delta N^m = \lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m \quad (3.25)$$

Eş. 3.19 ve 3.20’daki p_u^m , $d_{trop,u}^m$, Δt_u ve Δt^m terimleri frekanstan bağımsız; $d_{ion1,u}^m$, $d_{ion2,u}^m$, ε_1^m , ε_2^m , $\varepsilon_{1,u}$ ve $\varepsilon_{2,u}$ terimleri frekansa bağımlıdır. Eş. 3.21 ve 3.22’deki p_u^m , $\Phi_{trop,u}^m$, Δt_u ve Δt^m terimleri frekanstan bağımsız; $\Phi_{ion1,u}^m$, $\Phi_{ion2,u}^m$, ε_1^m , ε_2^m , $\varepsilon_{1,u}$ ve $\varepsilon_{2,u}$ terimleri frekansa bağımlıdır. Eş. 3.23 ve 3.24’te frekansa bağlı olmayan terimler iki frekans için de aynı değeri verdiği için elenmiştir. Eş. 3.23 ve 3.24’te gerçek menzil değeri p_u^m olmadığından P_4 ve L_4 doğrusal kombinasyonlarına geometriden bağımsız doğrusal kombinasyonlar denilmektedir.

Eş. 3.23 ve 3.24'te ayrıca frekansa bağlı olan alıcı ve uydu yanlılıklarının farkları da görülmektedir. Bu farklar diferansiyel yanlılıklar olarak bilinmektedir. Diferansiyel yanlılıklar Eş. 3.26 ve 3.27'deki gibi yazılabilir.

$$DCB_m = \varepsilon_1^m - \varepsilon_2^m \quad (3.26)$$

$$DCB_u = \varepsilon_{1,u} - \varepsilon_{2,u} \quad (3.27)$$

Eş. 3.23 ve 3.24'te görülen yanlılık ifadeleri diferansiyel yanlılıklar biçiminde yazılırsa Eş. 3.28 ve 3.29 elde edilir.

$$P_{4,u}^m = d_{ion2,u}^m - d_{ion1,u}^m - c(DCB_m + DCB_u) \quad (3.28)$$

$$L_{4,u}^m = \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m - c(DCB_m + DCB_u) + \Delta N^m \quad (3.29)$$

TEİ değeri sözde menzil, faz, ve ikisinin birleşiminden oluşan karma yöntemler olmak üzere üç farklı şekilde hesaplanabilir. Sözde menzil ile TEİ hesaplamak basit ve uygun bir yöntemdir. Bu yöntemin dezavantajı ise sözde menzil ölçümlerinin gürültülü olması ve çok-yol etkisinin oluşabilmesidir. Faz ölçümleri ise daha az gürültülüdür ve çok-yol etkisi daha azdır fakat ilk faz belirsizliği ve faz kopmaları nedeniyle TEİ hesaplamak zor olmaktadır. Diğer bir yöntem ise hem sözde menzil hem de faz ölçümlerinin kullanıldığı yöntemdir. Bu yöntemde ise faz belirsizlikleri giderilebilir ve daha hassas TEİ değerleri hesaplanabilir, fakat faz kopmaları sorunu devam etmektedir.

Eş. 3.14'teki $TEİ$ değerinin u alıcısı ve m uydusu arasındaki değeri $STEC_u^m$ olarak gösterilirse, m uydusu ve u alıcısı için iyonosferdeki grup ve faz gecikmeleri ile $STEC_u^m$ arasında Eş. 3.30'daki gibi bir bağıntı yazılabilir:

$$d_{ion,u}^m = -\Phi_{ion,u}^m \frac{c}{f} \approx A \frac{STEC_u^m}{f^2} \quad (3.30)$$

Yukarıdaki eşitlikte A değeri sabit olup değeri $40,28 \text{ m}^3/\text{s}^2$ dir. Eş. 3.28 ve 3.29'daki $d_{ion,u}^m$ ve $\lambda_1 \Phi_{ion,u}^m$ ifadeleri, Eş. 3.30'da görülen $STEC$ cinsinden yazılırsa:

$$P_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB_m + DCB_u) \quad (3.31)$$

$$L_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB_m + DCB_u) + \Delta N^m \quad (3.32)$$

elde edilir. Eş. 3.31 ve 3.32 kullanılarak *STEC* değeri Eş. 3.33 ve 3.34'teki gibi yazılabilir.

$$STEC_u^m = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4,u}^m + c(DCB_m + DCB_u)] \quad (3.33)$$

$$STEC_u^m = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [L_{4,u}^m + c(DCB_m + DCB_u) - \Delta N^m] \quad (3.34)$$

Seçilen bir alıcı istasyon için m 'inci uydudan, n 'inci ölçüm zamanında sözde menzil kullanılarak hesaplanan *STEC* değeri Eş. 3.35'te verilmiştir.

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4,u}^m(n) + c(DCB_m + DCB_u)], \quad (3.35)$$

$1 \leq m \leq M$ ve $1 \leq n \leq N$

Eş. 3.35'te, M toplam uydu sayısı, N ise toplam ölçüm sayısıdır, DCB_m ve DCB_u 'nin birimleri saniyedir. Eş. 3.35'teki f_1 , f_2 ve A 'nın sayısal değerleri yerine yazılırsa;

$$\frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) = 2,854 \times 10^{25} \quad (3.36)$$

elde edilir. Dolayısıyla DCB_m veya DCB_u 'deki 1 ns'lik değişim *STEC* değerinde 2,854 TECU seviyesinde değişime neden olacaktır. Buna göre 1 ns=2,854 TECU kabul edilerek Eş. 3.35'te DCB ile gösterilen yanlışlıkların birimleri saniye yerine TECU olarak alınırsa:

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) P_{4,u}^m(n) + b^m + b_u \quad (3.37)$$

bulunur. b^m ve b_u TECU cinsinden alıcı ve uydu diferansiyel yanlışlıklarıdır.

Sözde menzil ölçümleri kullanarak TEİ hesaplamak daha kolay bir yöntemdir. Sözde menzil ölçümlerinin dezavantajı ölçümlerin gürültülü olmasıdır. Faz ölçümleri ise daha az gürültülüdür ve hassas TEİ hesaplamaları için uygundur, fakat faz ölçümlerinde ilk faz belirsizliğine rastlanabilmektedir. Faz ölçümlerinden TEİ hesaplamak için önce ilk faz belirsizliğinin giderilmesi gerekmektedir. İlk faz belirsizliği nedeniyle fazdan hesaplanan L_4 doğrusal kombinasyonlarının seviyeleri hatalıdır. Bu ilk faz belirsizliği nedeniyle sadece faz ölçümlerinden TEİ hesaplamak kolay olmamaktadır.

Literatürdeki pek çok yöntemde faz verilerinin kullanımı için sözde menzil ile seviyelendirme tekniği kullanılmaktadır. Faz değerlerinde herhangi bir kopma olmadığı sürece P_4 ve L_4 doğrusal kombinasyonları arasındaki fark neredeyse sabit kalmaktadır. Eğer faz kopmalarının olmadığı bir zaman dilimi boyunca sözde menzil ve faz ölçümleri

arasındaki farkın ortalaması faz ölçümlerine eklenirse faz ölçümleri için uygun bir seviyelendirme yapılabilir ve Eş. 3.34'te görülen ΔN^m belirsizliği giderilmiş olur.

Faz ile sözde menzil ölçümleri arasındaki farkın, faz kopmalarının olmadığı bir zaman dilimindeki ortalaması dayanak değerleri olarak isimlendirilir. Bu dayanak değeri bağıntısı Eş. 3.38'de verilmiştir.

$$B = \frac{1}{N_{me}} \sum_{n_{me}=1}^{N_{me}} (P_{4,u}^m(n_{me}) - L_{4,u}^m(n_{me})) \cong -\Delta N^m \quad (3.38)$$

B dayanak değerini, N_{me} faz datalarının sürekli olduğu zaman dilimindeki örnek sayısını göstermektedir. Faz verileri bir gün boyunca sürekli değildir. Bu yüzden bir gün için birden fazla dayanak değeri hesaplanır. Hesaplanan bu dayanak değeri ile faz ölçümleri sözde menzil seviyelerine getirilir ve $STEC$ değeri Eş. 3.39'daki gibi hesaplanır. Bu yöntemle faz belirsizliği giderilmiş olur.

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (B + L_{4,u}^m(n) + c(DCB_u + DCB^m)) \quad (3.39)$$

Eş. 3.40'daki $VTEC$ değeri m 'inci uydu ile u 'nuncu alıcı arasındaki çizginin tek katmanlı iyonosfer modeli SLIM'i kestiği delme noktasında zenit doğrultusundaki TEİ değerini göstermektedir. $STEC$ değerinden yola çıkarak $VTEC$ değeri bir izdüşüm fonksiyonu ile aşağıdaki gibi hesaplanır. Bu dönüşüm için iyonosferin, yukarıda SLIM modelinde anlatıldığı gibi sonsuz incelikte bir tabakadan oluştuğu varsayımı yapılmaktadır [29].

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n)/M(\epsilon_m(n)) \quad (3.40)$$

$$M(\epsilon_m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \epsilon_m(n)}{R + r_{eb}} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (3.41)$$

Eş. 3.40 ve Eş. 3.41'de ϵ yerel yükseklik açısını, n ölçüm anını, R dünyanın yarıçapını ifade etmektedir. R dünyanın ekvatorial yarıçapı olup 6.378,137 m'dir. İyonosfer yüksekliği, en yüksek iyonlaşmanın olduğu yükseklik olup r_{eb} ile gösterilmektedir. Bir $t = t_0$ anında alıcının gördüğü her uydu için delme noktalarında $VTEC$ değerleri elde edilebilir. Delme noktalarının koordinatlarının hesaplanması Ek A'da verilmektedir.

3.3 D-TEİ Yöntemi

F. Arıkan, C. B. Erol ve O. Arıkan tarafından geliştirilen, Hacettepe Üniversitesi İyonosfer Araştırma Laboratuvarı IONOLAB Düzgünleştirilmiş TEİ Kestirim Yöntemi (D-TEİ) ile, 30 saniye zaman çözünürlüğünde, alıcının yerel zeniti doğrultusunda gürbüz ve yüksek çözünürlüklü TEİ kestirimi yapılabilmektedir [2; 3; 29; 41]. Bu yöntemde alıcının üzerindeki TEİ kestirimi, yükseklik açısı 10° 'den fazla olan uydulardan hesaplanan *VTEC* değerlerinin yüksek geçiren ceza filtresi kullanılan en az kareler yöntemi ile birleştirilmesine dayanır. Kayan ortanca filtre ile kestilen değerlerdeki düzensizlikler giderilmektedir. Yöntem *VTEC* değerlerini uyduların yükseklik açılarına göre ağırlıklandırarak çokluyol etkisinden kaynaklanan hataları azaltmaktadır [3]. D-TEİ yöntemi ile istenilen bir gün boyunca TEİ kestirimi yapılabildiği gibi, bir günün sınırlı bir zaman aralığında da TEİ kestirimi yapılabilmektedir [2; 3].

Arıkan vd. [2; 3], D-TEİ yönteminin parametrelerinin en uygun değerlerini güneş aktivitesinin fazla olduğu 23-28 Nisan 2001 tarihleri için belirlemiştir. Arıkan vd. [4] ise D-TEİ yönteminin parametrelerinin en uygun değerlerini 2003 yılının Ekim ayı için belirlemiş ve parametre değerlerinin [2] ve [3] çalışmalarında belirlenen değerlerle aynı olduğu sonucuna ulaşmıştır. D-TEİ yönteminin farklı güneş aktivite seviyeleri ve tarihlerde parametrelerinin en uygun değerlerinin aynı olması D-TEİ'nin gürbüz ve güvenilir bir yöntem olduğunu göstermiştir. Nayir vd. [30], iyonosfer yüksekliği, *STEC*'ten *VTEC*'e dönüşümü sağlayan izdüşüm fonksiyonu, uyduları yükseklik açılarına göre ağırlıklandıran fonksiyon, uydu ve alıcı yanlılıklarının kestirime eklenmesinin D-TEİ yöntemine etkisini incelemiştir. D-TEİ kestirimlerinin iyonosfer yüksekliğindeki değişimlerden etkilenmediği gözlenmiş, diğer parametrelerin en uygun değerleri seçilerek D-TEİ yöntemi bütün enlemler ve güneş aktivitesinin bütün durumları için kullanılabilir hale getirilmiştir [30].

Uğurlu [41] tarafından geliştirilen bir uygulama ile IONOLAB D-TEİ yöntemi web üzerinden kullanıcılara sunulmaktadır. IONOLAB D-TEİ yöntemine, web üzerinden erişilerek istenilen bir gün ve istasyon için TEİ kestirimlerine ulaşılabilmektedir. Bunun yanında istasyonlar arası veya aynı istasyon için günler arası TEİ kestirim karşılaştırılması da sağlanmaktadır. Kestirimler, uygulama üzerinden IGS merkezlerinin kestirimleri ile de karşılaştırılabilmektedir [41; 42].

3.4 Model, Ölçüm ve Kestirim Vektörleri

Bu çalışmada iyonosferin TEİ değerleri için model, ölçüm ve kestirim ayrımı yapılmaktadır. Bu bölümün başında tanımlanan zaman ve noktalardaki gerçek TEİ değerleri \mathbf{g}_s vektörü ile gösterilmektedir. Ölçüm değerleri, \mathbf{d} vektörünün içerisinde Bölüm 3.1’de anlatılan ölçüm tekniklerine göre uygun bir şekilde sıralanacaktır. \mathbf{g}_s ve \mathbf{d} vektörleri için, Bölüm 3.1’de anlatıldığı gibi,

- \mathbf{v}_c , sözde menzil veya faz verilerinden hesaplanan *VTEC* değerleri vektörü,
- $\tilde{\mathbf{v}}$, IonoLab Düzgünleştirilmiş TEİ Kestirim Yöntemi ile hesaplanan D-TEİ vektörü,
- \mathbf{v}_{GIM} , GIM’lerden elde edilen TEİ değerleri vektörü,
- \mathbf{v}_{IRI} , IRI modelinden elde edilen TEİ değerleri vektörü kullanılabilir.

Bölüm 2’de anlatılan istatistiksel modelde TEİ, $D \times T$ ’de tanımlı $Z(\mathbf{x}, \mathbf{t})$ rassal fonksiyonu ile gösterilebilir. \mathbf{d} ölçüm vektöründen, ızgara noktaları üzerindeki TEİ değerlerini içeren \mathbf{g}_s vektörünün kestirimi Eş. 3.42’deki gibi yazılabilir.

$$\hat{\mathbf{z}}_s = \left[\hat{Z}_s(1) \dots \hat{Z}_s(l) \dots \hat{Z}_s(N_\theta N_\phi N_t) \right]_{1 \times N_\theta N_\phi N_t}^T \quad (3.42)$$

$\hat{\mathbf{z}}_s$, ızgara noktaları üzerindeki TEİ kestirimlerini içeren vektördür.

Bölüm 4’te literatürde kullanılmış TEİ aradeğerleme tekniklerinin özeti ve birbirleri ile karşılaştırılması verilmektedir.

4. LİTERATÜRDEKİ TEİ HARİTALAMA YÖNTEMLERİ

TEİ aradeğerleme yöntemleri, genel olarak, ızgara tabanlı ve fonksiyon tabanlı yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Izgara tabanlı yöntemlerde ızgara noktaları üzerindeki TEİ değerleri ölçüm noktalarındaki TEİ değerlerinden kestirilmektedir. Fonksiyon tabanlı yöntemlerde ise TEİ dağılımını ifade edebilecek bir fonksiyonun parametreleri TEİ ölçümlerinden kestirilmeye çalışılmaktadır. Bu bölümde iyonosferden alınan ölçümlere uygulanmış aradeğerleme yöntemleri genel olarak anlatılmıştır. Uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma, İnce Katmanlı Spline Aradeğerleme, Multikuadrik Fonksiyon uyarlama, Kriging gibi yöntemler iyonosferin anlık uzaysal aradeğerlemesinde kullanılmış, Küresel Harmonikler ile zamanda da aradeğerleme yapılmıştır. Yöntemlerde $\mathbf{x} = [\theta \ \phi]^T$, θ enlem, ϕ boylam olmak üzere konum vektörünü, $Z(\mathbf{x}) = Z(\theta, \phi)$, \mathbf{x} noktasındaki gerçek TEİ değerini, $\hat{Z}(\mathbf{x}_0)$, \mathbf{x}_0 kestirim noktasındaki kestirim değerini göstermektedir. $Z(\mathbf{x}_{n_a})$, \mathbf{x}_{n_a} ölçüm noktasındaki TEİ değeridir.

4.1 Uzaklığın Karesinin Tersisi ile Ağırlıklandırma

Kestirim değeri ölçülen değerlerin ağırlıklı ortalamasıdır. Ağırlık değerleri kestirim noktası ile ölçüm noktalarının arasındaki uzaklığın karesinin tersi ile orantılıdır. Kestirim değerleri aşağıdaki denklemden bulunabilir [17]:

$$\hat{Z}(\mathbf{x}_0) = \frac{\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{n_a} Z(\mathbf{x}_{n_a})}{\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{n_a}} \quad (4.1)$$

Bu denklemde, N_a ölçüm noktası için, $d_{n_a} = \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_{n_a}\|$, $w_{n_a} = 1/d_{n_a}^2$, $n_a = 1, \dots, N_a$ ağırlık değerlerini ifade etmektedir.

Diğer yöntemlere göre hesaplama karmaşıklığı daha azdır. Kestirim yaparken konumsal bağımlılık hesaba katılmamakta, sadece uzaklık bilgisi kullanılmaktadır.

4.2 Taylor Serisi Açılımı (Fonksiyon Tabanlı Model)

Fonksiyon tabanlı modeller iyonosferi iki boyutlu Taylor serisi açılımı ile ifade ederler [24; 17]. Konum vektörü $\mathbf{x} = [\theta \ \phi]^T$, enlem θ ve boylam ϕ ile ifade edildiğinde TEİ değerleri Taylor serisi açılımı biçiminde yazılabilir.

$$Z(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} E_{nm} (\theta - \theta_0)^n (\phi - \phi_0)^m \quad (4.2)$$

n_{max}, m_{max} , iki boyutlu Taylor serisi açılımının enlem ve boylamda en büyük katlarını; E_{nm} , Taylor serisi açılımının bilinmeyen katsayılarını; (θ_0, ϕ_0) , Taylor açılımının merkez koordinatlarını göstermektedir.

4.3 Küresel Harmonikler

Küresel Harmonikler genellikle jeofizikte kullanılır. Yerküresel haritalamalar için uygun bir yöntemdir. TEİ değerlerinin Laplace denkleminin çözümü olan dikgen fonksiyonlarla açılımına dayanır [22]. Enlemden Legendre fonksiyonları, boylamda da sinüsoidal fonksiyonlar taban fonksiyonlarıdır.

$$Z(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M P_{nm}(\sin\theta) [C_{nm}\cos(m\phi) + S_{nm}\sin(m\phi)] \quad (4.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte; θ , iyonosfer kesişim noktasının enlemini, ϕ , iyonosfer kesişim noktasının boylamını, n ve m , sırasıyla Legendre fonksiyonunun tamsayı derecesini ve katını, C_{nm}, S_{nm} , bilinmeyen Küresel Harmonik katsayılarını, P_{nm} , normalize edilmiş Legendre fonksiyonunu göstermektedir.

Kalman süzgeci veya En Küçük Kareler yöntemi ile bilinmeyen katsayılar kestirilebilir ve kestirilen katsayılar yerlerine konarak TEİ değerleri hesaplanabilir [37].

Yerel haritalamada ise Legendre fonksiyonları dikgen değildir. Haines tarafından 1985 yılında önerilen Spherical Cap Harmonics Analysis modelinde ise Legendre fonksiyonları dikgen oldukları için yerel haritalama bu model kullanılarak yapılabilir [28].

4.4 İnce Katmanlı Spline Aradeğerleme

Bu aradeğerleme yöntemi bütün ölçüm noktalarından geçen en az kavisli ve en az değişen yüzeyi bulmaya çalışır. Yerel bir bölgeye uyarlanan kübik polinomların sınırlarda birinci ve ikinci dereceden türevlerinin sürekliliği sağlanır. TEİ $Z(\mathbf{x})$, bir yüzey olarak düşünülürse, bu yüzeyin eğrilik derecesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$J(Z) = \int_{R^2} [(\frac{\partial^2 Z}{\partial x_1^2})^2 + 2(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \frac{\partial Z}{\partial x_2})^2 + (\frac{\partial^2 Z}{\partial x_2^2})^2] d\mathbf{x} \quad (4.4)$$

Eğrilik derecesinin en aza indirilmesi,

$$Z(\mathbf{x}_{n_a}) = a_1 + a_2\theta + a_3\phi + \sum_{l=1}^n E(\|\mathbf{x}_{n_a} - \mathbf{x}_{n_b}\|)b_l \quad (4.5)$$

fonksiyonu ile sağlanır. Bu denklemde ϕ polinom fonksiyonu, E ise radyal taban fonksiyonudur [28]. Ölçüm değerleri Eş. 4.5'te yerine konarak elde edilen doğrusal denklem sistemi çözülerek katsayılar bulunur. TEİ değerleri Eş.4.5'ten bulunabilir.

4.5 Multikuadrik Fonksiyon Modeli

Multikuadrik Fonksiyon yöntemi ilk olarak Hardy [14] tarafından yer kabuğunun şeklindeki bozulmaları modellemek için kullanılmıştır. Multikuadrik Fonksiyon yönteminde iyonosfer kesişim noktalarındaki TEİ değerleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$Z(\mathbf{x}) = \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{n_a} Q(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{n_a}) \quad (4.6)$$

Bu denklemde,

$$Q(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{n_a}) = -\left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{n_a}\|}{c^2} + \varepsilon^2\right)^\beta \quad (4.7)$$

hiperboloit fonksiyonudur, ε^2 ve $\beta \geq 1$ düzgünleştirme faktörleridir [17]. Eş. 4.6'da ölçüm değerleri yerine konularak elde edilen doğrusal denklem sistemi çözülerek bilinmeyen katsayılar bulunur. Yerlerine konarak istenen noktalardaki TEİ değerleri hesaplanabilir.

4.6 Kriging

TEİ değerlerinin konumdaki bağımlılığını da hesaba katması ile diğer yöntemlerden ayrılır. Diğer yöntemler uzaklığa göre ölçüm değerlerini ağırlıklandırmaktadır. Kriging ise ölçüm değerlerinden uzaklıkla ilintilerinin değişimini veren bir semivariogram fonksiyonunu kullanılır. Hata değişintisini en aza indirerek ağırlıkları bulur. Kriging ile ilgili daha ayrıntılı bilgi Bölüm 5'de verilecektir.

4.7 Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA) deneysel bilgiyi saklama ve kullanma yeteneği olan güçlü, paralel işlemcilerdir. Bilgiyi işlemede kullanılan deneyim YSA içerisinde öğrenme işlemi sonucu kazanılır. Sınırlar arası bağlantıların ağırlıkları öğrenme sürecinde değişir, ve giriş-çıkış ilintisi bu bağlantıların ağırlıkları ile tanımlanır. YSA modelleme, öngörme, doğrusal olmayan süzme, sınıflandırma gibi değişik amaçlar için kullanılabilir

[15]. YSA'nın temel yapı taşı 'işlem birimi' adı verilen düğümlerdir. Matematiksel modelin aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$y_k = \psi \left(\sum_{i=1}^m (w_{ki}x_i) + b_k \right) \quad (4.8)$$

Yukarıdaki denklemde y_k toplayıcının çıktısı, ψ etki fonksiyonu, m giriş parametre sayısı, x_i giriş parametreleri, w_{ki} ağırlık değerleri, b_k yanlılık olarak tanımlanmaktadır.

İşlem birimleri biraraya gelerek sinir ağlarını oluşturur. Çok katmanlı yapı doğrusal olmayan yapısı ile veri uzayında doğrusal olarak ayrılmayan verilerin modellenmesi ve teşhisi için kullanılabilir. Geri Yayılım Öğrenme Algoritması kullanılarak, giriş değerlerinden elde edilen çıkışlar bilinen hedeflerle karşılaştırılır, bağlantı ağırlıkları bu karşılaştırma sonucunda hesaplanan hataların geriye iletilmesi ile güncellenir. Öğrenme işlemi sırasında yeterince öğrenim çevrimi yapılmaması durumunda istenilen sonuçlar elde edilemeyebilir. Fazla öğrenim çevrimi yapılması durumunda ise genelleme yeteneği kaybedilebilir [15].

4.8 Dalgacık Analiz Yöntemi

İmge sıkıştırma, gürültü ayıklama gibi alanlarda kullanılan bir yöntemdir. Konumsal değişim için de uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Dalgacıklar sonlu süreli oldukları için yerel sinyallerin analizini mümkün kılarlar. Dalgacık dönüşümü tüm zaman-frekans özelliklerini korur ve durağan olmayan sinyallerin analizinde kolaylık sağlar [27].

Değişik konumsal frekans bantlarındaki yapılar değişik çözünürlüklerde belirlenebilir. Gözardı edilebilir değerlerdeki dalgacık katsayıları elenerek, ölçüm gürültüsünün azaltılmasıyla birlikte, hesaplama karmaşıklığı da azaltılabilir. Düzensiz yapıli dalgacıklar sınırlı bir bölgede köşe etkileri olmaksızın modellemeye olanak sağlar [27].

4.9 Yöntemlerin Karşılaştırılması

Literatürde Küresel Harmonikler ve İnce Katmanlı Spline Aradeğerleme yöntemleri Kanada üzerinde iki farklı YKS alıcı ağı (CACS, WCDA) üzerinde denenmiş, iyonosferik bozulmanın yüksek olduğu 29 Mayıs 2003 günü daha geniş bir alanı

kaplayan ve göreceli olarak daha seyrek örnekleme yapılan CACS ağı üzerinde İnce Katmanlı Spline metodu Küresel Harmoniklere göre üstünlük sağlamıştır. İyonosferin daha sakin olduğu 31 Mayıs 2003'te, daha küçük bir alanı kaplayan WCDA ağı üzerinde de yine İnce Katmanlı Spline metodu Küresel Harmoniklere göre üstünlük sağlamıştır [28].

29 Nisan 2003 tarihinde beş Ohio CORS istasyonundan alınan verilerle Kriging ve Multikuadrik yöntemleriyle TEİ haritaları çıkarılmış ve IGS merkezlerinin Global İyonosfer haritalarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre Multikuadrik ve Kriging birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. IGS haritaları global tabanlı oldukları için 5 TECU daha fazla TEİ değerleri vermişlerdir. Her iki yöntem de çok değişkenli durumlar için uygun ve örneklemin seyrek olduğu durumlarda da başarılıdır. Multikuadrik yönteminin formülasyonu daha basit olduğu için Kriging'e göre nümerik olarak daha hızlı ve gerçek zamanlı uygulamalar için daha uygundur [46].

IGS analiz merkezlerinden biri olan UPC'de TEİ değerleri Spline fonksiyonlar ile her bir ızgara noktasında ($5^\circ \times 2.5^\circ$) aradeğerlendirilmektedir. Elde edilen haritalar Gaussian radyal taban fonksiyonlarıyla düzgünleştirilir. Bu yöntem Kriging metodu ile geliştirilmiş ve sonuçlar TOPEX/Poseidon verileri ile karşılaştırıldığında hatanın standart sapmasında düşüşler gözlenmiştir [32].

Jin et al. [17], Multikuadrik, VTEC modeli ve uzaklığın karesinin tersi ile ağırlıklandırma metotlarını gerçekleştirmiş, ve üç metot da birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Aradeğerleme için 0.3 m, dışdeğerleme için ise 30 dakikalık zaman süresinde 0.4 m hassasiyete ulaşılmıştır.

Yapay Sinir Ağları ile İyonosferin haritalamasında girişi enlem ve boylam çıkışı TEİ değerleri olan bir sinir ağı modeli oluşturulmuştur [23]. Geri Yayılım öğrenme algoritması kullanılarak oluşturulan bu modelde %97.5 oranında TEİ kestirimi yapılmış, Brezilya'yı kapsayan RBMC YKS ağındaki 11 farklı istasyon kullanılarak toplanan verilerle model denendiğinde ortalama 3.7 TECU hata gözlenmiştir [23]. Diğer bir uygulamada ise İyonosferin kritik frekansının (foF2) saatlik değişimi için doğrusal olmayan kara-kutu yaklaşımı ile çok katmanlı İleri Beslemeli Sinirsel Ağlara dayalı modelleme yapılmıştır. Geçmiş foF2 ve K_p dizini ölçümlerini kullanarak bir saat sonraki foF2 değeri kestirilmektedir. Sinirsel Ağ oluşumu %6.3 yada 0.4 MHz genel yanılığa sahiptir [1]. Bu çalışma geliştirilerek bir saklı katman ve beş sinir hücresi ile %6.19 ya da 0.47 MHz değerine ulaşılmıştır [19].

YSA'nın kullanılabilir sonuçlar verebilmesi için YSA modelinin amaca uygun olarak tasarlanması, işlem birimleri arasındaki bağlantıların doğru yapılması ve bağlantıların uygun ağırlıklara sahip olması gerekmektedir. Gürün vd. [12], Çok Katmanlı Perseptron (ÇKP) ve Radyal Tabanlı Ağlar (RTA) YSA yöntemlerini sentetik yüzeyler ve IRI değerlerini kullanarak karşılaştırmıştır. ÇKP modelinin en uygun saklı katman sayısı ve katmanlardaki işlem birimi sayıları, iyonosferin TEİ yüzeyini temsil edebilecek sentetik yüzeyler üzerinde yapılan aradeğerlemeler ile bulunmaya çalışılmıştır. Sentetik yüzeylerde RTA, ÇKP'ye göre daha az hata vermiştir. Ancak veri sayısı arttırıldığında RTA'nın ÇKP'ye göre çıkış verme hızı yavaşlamaktadır. Az sayıda örnek kullanıldığında iki yöntem yakın sonuçlar vermiştir. TEİ'nin zamandaki değişiminin incelenebilmesi için dinamik ağlara ihtiyaç duyulmaktadır. Gürün [13], Gerçek Zamanlı Yinelemeli Öğrenim (GZYÖ) algoritması kullanarak TEİ'nin zamansal değişimini incelemiş ve tek istasyon için zamansal öngürüler elde etmiştir. YSA'nın hafıza içeren yapısı sayesinde tek bir istasyon için ortalama 0.003 hata oranında bir saatlik öngöründe bulunulabilmektedir [13]. Sayın [35], Kriging ve ÇKP YSA yöntemlerini sentetik yüzeyler üzerinde karşılaştırmıştır. Sentetik yüzey, ortalaması sıfır bir rassal fonksiyonun gerçekleşmesi iken ÇKP yöntemi Kriging'den daha az hata vermiş, sentetik yüzey koordinatların deterministik fonksiyonu olan bir ortalama içerdiğinde Kriging ÇKP'ye göre daha az hata vermiştir.

Sayın [36], anlık Kriging algoritması ile Kriging ve Kalman süzgecini aynı anda kullanan uzay-zaman Kriging süzgecini YKS verilerinden elde edilen TEİ değerlerini kullanarak karşılaştırmıştır. Her iki yöntemle de birbirine yakın çapraz doğrulama hatası elde edilmiştir.

Bölüm 5 ve Bölüm 6'da TEİ aradeğerlemede kullanılacak Kriging ve Rassal Alan Öncülü yöntemleri anlatılmaktadır. Bu yöntemlerle Bölüm 3.4'te anlatılan \mathbf{g}_s i-yonosfer modeli vektörünün kestirimi olan $\hat{\mathbf{z}}_s$ vektörü hesaplanabilecektir.

5. KRIGING

Kriging yönteminin, Ortalamalı (Simple) Kriging, Ortalamasız (Ordinary) Kriging, Evrensel (Universal) Kriging, KoKriging, gibi birçok türü, maden, jeoloji, meteoroloji, çevre ve ekonomik risk değerlendirme gibi birçok alanda kullanılmaktadır [16]. Kriging kestirimi, ölçüm noktalarından doğrusal olarak ve kestirim hatasının değişimsizliğini yansıtlığı sağlayacak şekilde en aza indirerek bulunduğu için en iyi doğrusal yansız kestirici (BLUE) olarak bilinir. Bu bölümde konumsal bağımlılığın ölçütü olan semivariogram fonksiyonu ve Ortalamalı, Ortalamasız, Evrensel Kriging yöntemleri anlatılmıştır. Bu bölümde anlatılan Kriging yöntemleri [9; 45; 8] kaynaklarından derlenmiştir.

Rassal fonksiyonun konumsal bağımlılığının belirlenmesi Kriging yönteminin temelini oluşturur. En uygun kestirimin yapılmasında, ölçüm noktaları arasındaki konumsal bağımlılığın bilinmesi gerekir. Bölüm 2’de anlatıldığı gibi bir eşdeğişinti veya semivariogram fonksiyonu kullanılarak konumsal bağımlılık tanımlanabilir. Semivariogram fonksiyonu sabit mesafe bölümlerine ayrılmış bütün olası noktalar arasındaki farkların varyansının yarısıdır [16]. Aradeğerleme bölgesindeki ölçümlerden yararlanarak deneysel semivariogram bulunur. Uzay zamansal rassal fonksiyonun semivariogram fonksiyonunun kestiriminde kullanılan Eş. 2.15, zamanda bir değişimin olmadığı veya konumda anlık aradeğerlemenin yapıldığı durumlarda Eş. 5.1’deki gibi verilmektedir.

$$\gamma^*(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{n_a \neq n_b}^{N(\mathbf{h})} (Z(\mathbf{x}_{n_a}) - Z(\mathbf{x}_{n_b}))^2 \quad (5.1)$$

Eş. 5.1’de, \mathbf{h} , ölçüm noktaları olan \mathbf{x}_{n_a} ve \mathbf{x}_{n_b} arasındaki uzaklığı, $Z(\mathbf{x}_{n_a})$, $Z(\mathbf{x}_{n_b})$, \mathbf{x}_{n_a} ve \mathbf{x}_{n_b} noktalarındaki ölçüm değerlerini, $N(\mathbf{h})$, birbirine \mathbf{h} uzaklıkta bulunan ölçüm çiftleri sayısını göstermektedir. \mathbf{h} kesin bir uzunluk değil belli bir aralık ($\mathbf{h} - \Delta\mathbf{h} < \mathbf{h} < \mathbf{h} + \Delta\mathbf{h}$) içerisinde olan uzunluklar kümesinin ortalaması olarak düşünülür. $Z(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun semivariogram fonksiyonu yünden bağımsız olarak hesaplanabiliyorsa, rassal fonksiyon yön bağımsız olarak adlandırılır [31].

Deneysel semivariogram fonksiyonunda, değerler belirli uzunluklar için hesaplanır. Bunların dışındaki uzunluklar için semivariogram değerleri bilinmemektedir. Örneklememiş noktalardaki değerlerin kestiriminde ve rassal fonksiyonun özelliklerinin belirlenmesinde semivariogram fonksiyonunun değerleri bütün uzunluklar için

bilinmelidir. Deneysel semivariogram değerlerine bir fonksiyon uyarlayarak teorik semivariogram fonksiyonu bulunur. Buradan ölçüm yapılamayan uzunluklar için gereken değerler elde edilir. Yaygın olarak kullanılan teorik semivariogram fonksiyonu modelleri Eş. 5.2, Eş. 5.3 ve Eş. 5.4'te verilen, sırasıyla, üssel, Gauss ve küresel fonksiyonlardır.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c(1 - \exp(\frac{-h}{a})), & h > 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c(1 - \exp(\frac{-h^2}{a^2})), & h > 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}), & 0 < h \leq a \\ c_0 + c, & h > a \end{cases} \quad (5.4)$$

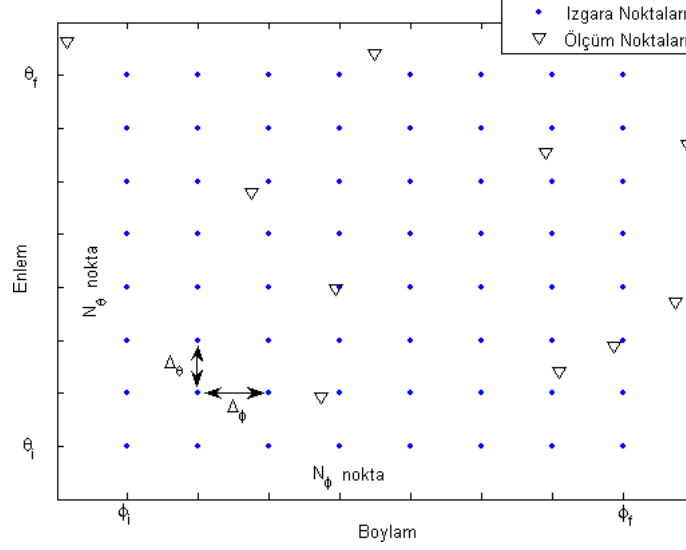
Eş. 5.2, Eş. 5.3 ve Eş. 5.4'te c_0 külçe etkisi, a yapısal uzaklık olarak adlandırılır, h ölçüm noktaları arası veya aradeğerleme noktası ile ölçüm noktaları arası uzaklıktır. c variogramın yapısal bileşenleri için kısmi eşik değeri ve $c + c_0$ da eşik olarak adlandırılır [9]. Yapısal uzaklık, farklı noktalardaki rassal değişkenlerin arasındaki ilişkinin kaybolduğu uzaklığı belirler.

Deneysel semivariogram fonksiyonu farklı yönlerde farklı özellikler gösterebilir. Bu durumda rassal fonksiyon yön bağımlı olarak adlandırılır. Semivariogram modelleri yön bağımsız durumda kullanıldıkları için, koordinatların transformasyonu ile rassal fonksiyon yönden bağımsız hale getirilmelidir. Yön bağımlılık farklı yönlerdeki deneysel semivariogramın incelenmesi ile tespit edilebilir.

Yön bağımlılık, deneysel semivariogramın eşit değışinti eğrilerinin nokta çiftleri arasındaki konum vektörüne göre çizilmesiyle incelenebilir. Eğer rassal fonksiyon yön bağımsız ise eşit semivariogram eğrileri orijin merkezli çemberler olacak, ve böylece semivariogram sadece konum vektörünün uzunluğuna bağılı olacaktır.

Yön bağımlı rassal fonksiyonlarda ise eşit semivariogram eğrileri yön bağımlılığın olduğu doğrultu boyunca uzanan elips şeklini alırlar. Bu tipteki yön bağımlılık, koordinatların doğrusal transformasyonu ile yönden bağımsız hale getirilebilir [45].

Zamanın belli bir $t = t_0$ anında *VTEC*'in kestirileceği bölge Eş. 3.3 ve Eş. 3.4'teki $N_\theta N_\phi$ tane ızgara noktası olarak tanımlanabilir. Şekil 5.1'de ızgara noktalarının ve ölçüm noktalarının koordinatlarının bir örneği verilmektedir. Kri-



Şekil 5.1: Izgara noktaları ve ölçüm noktalarının koordinatları.

ging ölçüm değerlerini Bölüm 2’de anlatılan bir rassal fonksiyonun gerçekleşmesinin ölçüm noktalarındaki örnekleri olduğu varsayımını yapar. Ölçüm değerleri vektörü \mathbf{d} vektörü içerisinde gösterilebilir.

Herbir ızgara noktasındaki $l = 1, \dots, N_\theta N_\phi$, Kriging kestirimi Eş. 5.5’te verildiği gibi ölçüm noktalarının doğrusal birleşimi olarak yazılır.

$$\hat{Z}_s(l) = \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} z(\mathbf{x}_{n_a}), \quad l = 1, \dots, N_\theta N_\phi \quad (5.5)$$

Eş. 5.5’te $\hat{Z}_s(l)$, l indeksli, \mathbf{x}_l ızgara noktasındaki kestirim değerini, $w_{l;n_a}$ ise, l indeksli ızgara noktasındaki kestirim için kullanılan n_a ’ncü ölçüm değerinin ağırlığını göstermektedir. N_a toplam ölçüm sayısıdır.

Aşağıda anlatılan Ortalamalı, Ortalamasız ve Evrensel Kriging yöntemlerinde genel olarak, hatanın varyansı yansız kestirim elde edilecek şekilde enküçültülerek Kriging ağırlıkları elde edilir.

5.1 Ortalamalı (Simple) Kriging

Ortalamalı Kriging yönteminde, $Z(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun, ikinci dereceden durağanlık özelliği gösterdiği ve beklentisinin $E\{Z(\mathbf{x})\} = \mu$ bilindiği kabul edilir [9]. $Z(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun ikinci dereceden durağan olması için Eş. 5.6 ve Eş. 5.7

sağlanmalıdır.

$$E[Z(\mathbf{x})] = \mu \quad (5.6)$$

$$E[(Z(\mathbf{x}) - \mu)(Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - \mu)] = \text{cov}(\mathbf{h}) \quad (5.7)$$

Ortalamasız ve Evrensel Kriging yönteminde kullanılan Eş. 5.5'teki kestirim ifadesinden farklı olarak, Ortalamalı Kriging Eş. 5.8'deki kestirimi kullanır.

$$\hat{Z}_s(l) = \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} (Z(\mathbf{x}_{n_a}) - \mu) + \mu \quad (5.8)$$

$E\{\hat{Z}_s(l)\} = \mu$ olduğu için Ortalamalı Kriging kestirimi yansızdır. Kestirim hatasının değışintisi aşağıdaki eşitliklerde verilmektedir.

$$\sigma_l^2 = \text{var} \left\{ Z_s(l) - \hat{Z}_s(l) \right\} \quad (5.9)$$

$$= E \left\{ \left(Z_s(l) - \hat{Z}_s(l) \right)^2 \right\} \quad (5.10)$$

$$= E \left\{ \left(\left(Z_s(l) - \mu \right) - \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} (Z(\mathbf{x}_{n_a}) - \mu) \right)^2 \right\} \quad (5.11)$$

$w_{l;0} = -1$, $Z_s(l) = Z(\mathbf{x}_0)$ olursa σ_l^2 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \sigma_l^2 &= E \left\{ \left(\sum_{n_a=0}^{N_a} w_{l;n_a} (Z(\mathbf{x}_{n_a}) - \mu) \right)^2 \right\} \\ &= E \left\{ \sum_{n_a=0}^{N_a} \sum_{n_b=0}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} (Z(\mathbf{x}_{n_a}) - \mu)(Z(\mathbf{x}_{n_b}) - \mu) \right\} \\ &= \sum_{n_a=0}^{N_a} \sum_{n_b=0}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} \text{cov}(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_{n_b}) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Eş. 5.12'nin $w_{l;n_a}$ 'ya göre kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlenerek Eş. 5.13'teki denklem sistemi bulunur.

$$\sum_{n_b=1}^{N_a} \text{cov}(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_{n_b}) w_{l;n_b} = \text{cov}(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{n_a}), \quad n_a = 1, \dots, N_a \quad (5.13)$$

Eş. 5.13 matris halinde yazılabilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \text{cov}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \dots & \text{cov}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{N_a}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(\mathbf{x}_{N_a}, \mathbf{x}_1) & \dots & \text{cov}(\mathbf{x}_{N_a}, \mathbf{x}_{N_a}) \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_l} \underbrace{\begin{bmatrix} w_{l;1} \\ \vdots \\ w_{l;N_a} \end{bmatrix}}_{\mathbf{w}_l} = \underbrace{\begin{bmatrix} \text{cov}(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ \text{cov}(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{N_a}) \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}_l}$$

$$\mathbf{w}_l = \mathbf{C}_l^{-1} \mathbf{c}_l$$

\mathbf{w}_l ağırlık vektörü yerine yazılırsa, \mathbf{d} ölçüm değerlerinden, l indeksli ızgara noktasındaki kestirim değeri Eş. 5.14 ve kestirim hatasının varyansı Eş. 5.15'teki şekilde bulunur.

$$\hat{Z}_s(l) = \mu + \mathbf{c}_l^T \mathbf{C}_l^{-1} (\mathbf{d} - \mu) \quad (5.14)$$

$$\sigma_l^2 = cov(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_l) - \mathbf{c}_l^T \mathbf{C}_l^{-1} \mathbf{c}_l \quad (5.15)$$

Ortalamalı Kriging yönteminde, rassal fonksiyonun beklentisinin ve eşdeğişinti fonksiyonunun bilindiği varsayılır. Bu nedenle uygulanabileceği durumlar kısıtlıdır [9].

5.2 Ortalamasız (Ordinary) Kriging

Ortalamasız Kriging yönteminde, beklentinin, $\mu(\mathbf{x}) = \mu$, sabit olduğu fakat bilinmediği ve rassal fonksiyonun özünlülük özelliği gösterdiği kabul edilir [31]. $\mu(\mathbf{x}) = \mu$ için, özünlülük rassal fonksiyonun aşağıdaki eşitlikleri sağlaması ile tanımlanır.

$$E\{Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})\} = 0 \quad (5.16)$$

$$var\{Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})\} = 2\gamma(\mathbf{h}) \quad (5.17)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\gamma(\mathbf{h})$ semivariogram fonksiyonudur.

Ortalamasız Kriging kestirimi Eş. 5.5'te verilmektedir. Kestirimin yansız bir şekilde yapılabilmesi için $E\{Z_s(l) - \hat{Z}_s(l)\} = 0$ koşulu sağlanmalıdır. Buradan yansızlık için ağırlıkların sağlaması gereken koşul $\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} = 1$ bulunur.

Kestirim hatasının varyansı,

$$\begin{aligned} \sigma_l^2 &= var\{Z_s(l) - \hat{Z}_s(l)\} \\ &= var\left\{Z_s(l) - \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} Z(\mathbf{x}_{n_a})\right\} \\ &= var\left\{\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} (Z_s(l) - Z(\mathbf{x}_{n_a}))\right\} \\ &= E\left\{\left(\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} (Z_s(l) - Z(\mathbf{x}_{n_a}))\right)^2\right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_l^2 &= \sum_{n_a=1}^{N_a} \sum_{n_b=1}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} E \{ (Z_s(l) - Z(\mathbf{x}_{n_a})) (Z_s(l) - Z(\mathbf{x}_{n_b})) \} \\
&= \sum_{n_a=1}^{N_a} \sum_{n_b=1}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} \text{cov}(Z_s(l) - Z(\mathbf{x}_{n_a}), Z_s(l) - Z(\mathbf{x}_{n_b})) \\
&= \sum_{n_a=1}^{N_a} \sum_{n_b=1}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} [\gamma(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_l) + \gamma(\mathbf{x}_{n_b}, \mathbf{x}_l) - \gamma(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_{n_b})] \\
&= 2 \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} \gamma(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_l) - \sum_{n_a=1}^{N_a} \sum_{n_b=1}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} \gamma(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_{n_b})
\end{aligned} \tag{5.18}$$

Eş. 5.19, ağırlıklar üzerindeki $\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} = 1$ koşulu dikkate alınarak Lagrange çarpanları yöntemi ile en aza indirilebilir [31]. Lagrange fonksiyonunun,

$$L(w_{l;n_a}, \lambda) = \sigma_l^2 - 2\lambda \left(\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} - 1 \right) \tag{5.19}$$

$w_{l;n_a}$ ağırlıkları ve λ Lagrange çarpanına göre kısmi türevlerinin sıfıra eşitlenmesi ile Eş. 5.20 ve Eş. 5.21'de verilen denklem sistemi bulunur.

$$\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} \gamma(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_{n_b}) + \lambda = \gamma(\mathbf{x}_{n_b}, \mathbf{x}_l), \quad j = 1, \dots, n \tag{5.20}$$

$$\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} = 1 \tag{5.21}$$

Yukarıdaki eşitlikler matris denklemleri şeklinde yazılabilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \dots & \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{N_a}) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_{N_a}, \mathbf{x}_1) & \dots & \gamma(\mathbf{x}_{N_a}, \mathbf{x}_{N_a}) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Gamma}_l} \underbrace{\begin{bmatrix} w_{l;1} \\ \vdots \\ w_{l;N_a} \\ \lambda \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Omega}_l} = \underbrace{\begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_l) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_{N_a}, \mathbf{x}_l) \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}_l}$$

Hatanın varyansını, yansızlık koşulu sağlanarak, en aza indirebilecek Kriging ağırlıkları yukarıdaki matris denklemi çözülerek bulunur. Kestirim değeri,

$$\hat{Z}_s(l) = [\mathbf{d}^T \ 0] \mathbf{\Omega}_l = [\mathbf{d}^T \ 0] \mathbf{\Gamma}_l^{-1} \mathbf{y}_l \tag{5.22}$$

hatanın varyansı ise,

$$\sigma_l^2 = \mathbf{y}_l^T \mathbf{\Omega}_l = \mathbf{y}_l^T \mathbf{\Gamma}_l^{-1} \mathbf{y}_l \tag{5.23}$$

olarak ifade edilebilir.

Ortalamasız Kriging yöntemi, rassal fonksiyonun durağanlık özelliği gösterdiğini ve her noktadaki beklentisinin sabit olduğunu kabul eder. Uygulamada bu özelliklerin gözlenmediği durumlarda kullanımı uygun değildir.

5.3 Evrensel Kriging

Evrensel Kriging yönteminde, Ortalamalı ve Ortalamasız Kriging yöntemlerinin aksine, rassal fonksiyonun beklentisinin koordinatlara göre değiştiği ve bilinmediği kabul edilir. Rassal fonksiyonun beklentisi, bilinen fonksiyonların doğrusal birleşimi olarak düşünülür.

$$\mu(\mathbf{x}) = E\{Z(\mathbf{x})\} = \sum_{n_k=0}^{N_k-1} a_{n_k} f_{n_k}(\mathbf{x}), \quad f_0(\mathbf{x}) = 1 \quad (5.24)$$

Yukarıdaki eşitlikte, N_k beklentinin içerdiği fonksiyon sayısı, a_{n_k} fonksiyonların ağırlıklarını, $f_{n_k}(\cdot)$ ler ise bilindiği varsayılan fonksiyonları göstermektedir. Beklenti rassal fonksiyondan çıkarıldığı zaman elde edilen $Y(\mathbf{x})$ kalıntı rassal fonksiyonun durağanlık koşullarını sağladığı kabul edilir.

$$Y(\mathbf{x}) = Z(\mathbf{x}) - \mu(\mathbf{x}) \quad (5.25)$$

$$\text{var}\{Y(\mathbf{x}) - Y(\mathbf{x} + \mathbf{h})\} = 2\gamma(\mathbf{h}) \quad (5.26)$$

Kriging kestirimi Eş. 5.5'te verilmektedir. Yansız kestirim için $E[Z_s(l) - \hat{Z}_s(l)] = 0$ denklemi sağlanmalıdır. Buradan Eş. 5.27'deki yansızlık koşulu bulunur.

$$\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} f_{n_k}(\mathbf{x}_{n_a}) = f_{n_k}(\mathbf{x}_l), \quad n_k = 1, \dots, N_k \quad (5.27)$$

Ortalamasız Kriging yönteminde yansız kestirim için yeterli olan $\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} = 1$ koşulu burada yansızlık koşullardan bir tanesidir.

Kestirim hatası,

$$\hat{Z}_s(l) - Z_s(l) = \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} Y(\mathbf{x}_{n_a}) - Y(\mathbf{x}_l)$$

olarak yazılabilir, buradan hata varyansı,

$$\begin{aligned}
\sigma_l^2 &= \text{var} \left\{ \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} Y(\mathbf{x}_{n_a}) - Y(\mathbf{x}_l) \right\} \\
&= \sum_{n_a=1}^{N_a} \sum_{n_b=1}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} \text{cov} \{ Y(\mathbf{x}_{n_a}) - Y(\mathbf{x}_l), Y(\mathbf{x}_{n_b}) - Y(\mathbf{x}_l) \} \\
&= \sum_{n_a=1}^{N_a} \sum_{n_b=1}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} [\gamma_Y(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_l) + \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_b}, \mathbf{x}_l) - \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_a} - \mathbf{x}_{n_b})] \\
&= 2 \sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_a} - \mathbf{x}_l) - \sum_{n_a=1}^{N_a} \sum_{n_b=1}^{N_a} w_{l;n_a} w_{l;n_b} \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_a} - \mathbf{x}_{n_b}) \tag{5.28}
\end{aligned}$$

şeklinde elde edilir.

Lagrange fonksiyonunun,

$$L(w_{l;n_a}, \lambda) = \sigma_l^2 + 2\lambda_1 \left(\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} - 1 \right) + 2 \sum_{n_k=1}^{N_k} \lambda_{n_k} \left(\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} f_{n_k}(\mathbf{x}_{n_a}) - f_{n_k}(\mathbf{x}_l) \right)$$

ağırlık katsayıları $w_{l;n_a}$, $n_a = 1, \dots, N_a$, ve Lagrange çarpanlarına λ_{n_k} , $n_k = 0, \dots, N_k$ göre kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlenerek Kriging denklemleri elde edilir. Kriging ağırlık indeksi $n_a = 1, \dots, N_a$ için, aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial w_{l;n_a}} &= 2\gamma_Y(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{n_a}) - 2 \sum_{n_b=1}^{N_a} w_{l;n_b} \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}_{n_b}) \\
&\quad + 2\lambda_1 + 2 \sum_{n_k=1}^{N_k} \lambda_{n_k} f_{n_k}(\mathbf{x}_{n_a}) \tag{5.29}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = 2 \left(\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} - 1 \right) \tag{5.30}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{n_k}} = 2 \left(\sum_{n_a=1}^{N_a} w_{l;n_a} f_{n_k}(\mathbf{x}_{n_a}) - f_{n_k}(\mathbf{x}_l) \right), \quad n_k = 2, \dots, N_k \tag{5.31}$$

Yukarıdaki denklemler sıfıra eşitlenerek matris haline getirilirse, katsayı vektörü $\mathbf{\Omega}_l$,

$$\mathbf{\Omega}_l = \mathbf{\Gamma}_l^{-1} \mathbf{y}_l$$

şeklinde bulunabilir. Yukarıdaki denklemde,

$$\mathbf{\Omega}_l = \left[w_{l;1} \quad \dots \quad w_{l;N_a} \quad \lambda_1 \quad \dots \quad \lambda_{N_k} \right]^T$$

$$\mathbf{\Gamma}_l = \begin{bmatrix} \gamma_Y(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \dots & \gamma_Y(\mathbf{x}_{N_a}, \mathbf{x}_1) & 1 & f_1(\mathbf{x}_1) & \dots & f_{N_k-1}(\mathbf{x}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_Y(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{N_a}) & \dots & \gamma_Y(\mathbf{x}_{N_a}, \mathbf{x}_{N_a}) & 1 & f_1(\mathbf{x}_{N_a}) & \dots & f_{N_k-1}(\mathbf{x}_{N_a}) \\ 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ f_1(\mathbf{x}_1) & \dots & f_1(\mathbf{x}_{N_a}) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N_k-1}(\mathbf{x}_1) & \dots & f_{N_k-1}(\mathbf{x}_{N_a}) & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}_l = \left[\gamma_Y(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_1) \quad \dots \quad \gamma_Y(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{N_a}) \quad 1 \quad f_1(\mathbf{x}_l) \quad \dots \quad f_{N_k}(\mathbf{x}_l) \right]^T$$

olarak veilmıştır. $\mathbf{\Omega}_l$ vektörünün içindeki ağırlık katsayılarıyla kestirim değeri bulunabilir. Hata varyansı da $\sigma^2(\mathbf{x}_0) = \mathbf{\Omega}_l^T \mathbf{y}_l$ şeklinde bulunur.

Evrensel Kriging yönteminde rassal fonksiyondan beklentinin çıkarılması ile elde edilen kalıntı rassal fonksiyonunun semivariogram fonksiyonunun bulunmasında beklentinin bilinmesi gerekir. Semivariogram fonksiyonunun beklentinin sabit olduğu yönlerde hesaplanması ile bu sorun çözülebilir [31].

Bölüm 7'de Ortalamasız Kriging, ve iki farklı yönseme fonksiyonu varsayan Evrensel Kriging algoritmaları ile sentetik veriler kullanılarak aradeğerleme yapılmıştır. Bir sonraki bölümde ise Rassal Alan Öncülü yöntemi anlatılmaktadır.

6. RASSAL ALAN ÖNCÜLÜ İLE ARADEĞERLEME

Rassal Alan Öncülü (RAÖ) yöntemi, uzay-zamansal bölgesel değişkenlerin kestiriminde kullanılmaktadır [44]. Ortalamalı Kriging yönteminden farklı olarak değişik zamanlardaki ölçümleri kullanarak zamanda da aradeğerleme yapmaktadır. Bu özelliği ile uzay-zamansal Ortalamalı Kriging yöntemine benzemektedir. Bu yöntemde bölgesel değişkenin uzayda ve zamandaki beklenti ve eşdeğişinti fonksiyonları bilinmektedir. Bölüm 3'de tanımlanan ızgara noktaları ve örneklenen noktalardaki VTEC değerlerinin ortak Gauss dağılımına sahip olduğu varsayılır. Izgara noktalarındaki değerler ve örneklenen noktalardaki değerler, sırasıyla, \mathbf{g}_s ve \mathbf{d} vektörleri ile gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}_s \\ \mathbf{d} \end{bmatrix} \sim \mathcal{N} \left(\begin{bmatrix} \underline{\mu}_g \\ \underline{\mu}_d \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{gg} & \mathbf{R}_{gd} \\ \mathbf{R}_{dg} & \mathbf{R}_{dd} \end{bmatrix} \right)$$

$\underline{\mu}_g = E\{\mathbf{g}_s\}$ ızgara noktalarındaki VTEC değerlerinin beklenti vektörü, $\underline{\mu}_d = E\{\mathbf{d}\}$ örneklenen noktalardaki beklenti vektörü, $\mathbf{R}_{gg} = E\{(\mathbf{g}_s - \underline{\mu}_g)(\mathbf{g}_s - \underline{\mu}_g)^T\}$ ve $\mathbf{R}_{dd} = E\{(\mathbf{d} - \underline{\mu}_d)(\mathbf{d} - \underline{\mu}_d)^T\}$, sırasıyla, \mathbf{g}_s ve \mathbf{d} 'nin eşdeğişinti matrisleri, $\mathbf{R}_{gd} = \mathbf{R}_{dg}^T = E\{(\mathbf{g}_s - \underline{\mu}_g)(\mathbf{d} - \underline{\mu}_d)^T\}$, \mathbf{g}_s ve \mathbf{d} vektörlerinin çapraz eşdeğişinti matrisidir.

Izgara noktaları üzerindeki kestirimleri içeren vektör aşağıda verilmektedir:

$$\hat{\mathbf{z}}_s = \left[\hat{Z}_s(1) \dots \hat{Z}_s(l) \dots \hat{Z}_s(N_\theta N_\phi N_t) \right]_{1 \times N_\theta N_\phi N_t}^T \quad (6.1)$$

Ölçüm değerleri olmadan ızgara noktalarındaki en iyi kestirim, \mathbf{g}_s vektörünün beklenti vektörü $\underline{\mu}_g$ olur. Ölçüm değerleri VTEC değerleri ile ilgili yeni bilgiler sağlar.

Ölçüm vektörü \mathbf{d} verildiğinde, ızgara noktalarındaki VTEC değerlerinin koşullu beklentisi aşağıdaki eşitlikteki gibi ölçüm değerlerinin doğrusal fonksiyonu olarak ifade edilebilir:

$$\hat{\mathbf{z}}_s = E\{\mathbf{g}_s | \mathbf{d}\} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\mathbf{d} \quad (6.2)$$

Yukarıdaki denklemde \mathbf{b} vektörü ve \mathbf{A} matrisi sabit elemanlardan oluşmaktadır. Yansız kestirim için hatanın beklentisi sıfır olmalıdır.

$$E\{\mathbf{g}_s - \hat{\mathbf{z}}_s\} = 0 \quad (6.3)$$

Bu durumda

$$\underline{\mu}_g - \mathbf{b} - \mathbf{A}\underline{\mu}_d = 0 \quad (6.4)$$

olur. Buradan \mathbf{b} vektörü aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\mathbf{b} = \underline{\mu}_g - \mathbf{A}\underline{\mu}_d \quad (6.5)$$

\mathbf{g}_s 'in, \mathbf{d} 'ye göre koşullu eşdeğişinti matrisi aşağıda verilmektedir.

$$\mathbf{R}_{gg|d} = E\{(\mathbf{g}_s - E\{\mathbf{g}_s|\mathbf{d}\})(\mathbf{g}_s - E\{\mathbf{g}_s|\mathbf{d}\})^T\} \quad (6.6)$$

$$= \mathbf{A}\mathbf{R}_{dd}\mathbf{A}^T + \mathbf{R}_{gg} - \mathbf{A}\mathbf{R}_{gd}^T - \mathbf{R}_{gd}\mathbf{A}^T \quad (6.7)$$

En az sonsal değışintiyi verecek olan \mathbf{A} matrisi, Eş. 6.7'de verilen matrisin izinin \mathbf{A} matrisine göre türevinin sıfıra eşitlenmesi ile aşağıdaki gibi bulunur.

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}_{gd}\mathbf{R}_{dd}^{-1} \quad (6.8)$$

\mathbf{b} ve \mathbf{A} değerleri $\hat{\mathbf{z}}_s$ 'de yerlerine konularak ızgara noktalarındaki kestirim değerleri Eş. 6.9'deki gibi elde edilir [44].

$$\hat{\mathbf{z}}_s = E\{\mathbf{g}_s|\mathbf{d}\} = \underline{\mu}_g + \mathbf{R}_{gd}\mathbf{R}_{dd}^{-1}(\mathbf{d} - \underline{\mu}_d) \quad (6.9)$$

Sonsal değışinti matrisi $\mathbf{R}_{gg|d}$, \mathbf{A} matrisi Eş. 6.7'de yerine konularak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\mathbf{R}_{gg|d} = \mathbf{R}_{gg} - \mathbf{R}_{gd}\mathbf{R}_{dd}^{-1}\mathbf{R}_{gd}^T \quad (6.10)$$

$\mathbf{R}_{gg|d}$ matrisinin köşegeni üzerinde bulunan elemanlar $\hat{\mathbf{z}}_s$ vektörü içerisindeki kestirimlerin hata değışintilerine karşılık gelmektedir.

\mathbf{g} ve \mathbf{d} vektörlerinin eşdeğişinti ve çapraz değışinti matrislerinin bulunmasında GIM haritalarından, IRI modelinden veya her ikisinden alınan değerler kullanılabilir. Bunların yanında, YKS sinyallerinden elde edilen kestirimler kullanılarak özyineli bir yöntemle de matrisler kestirilebilir.

Bölüm 7'de, Kriging yöntemleri ve RAÖ yöntemi ile sentetik TEİ verileri üzerinde aradeğerlemenin nasıl yapıldığı ve elde edilen sonuçlar anlatılmaktadır. Bölüm 9'da ise bu yöntemler gerçek TEİ verilerine uygulanmıştır.

7. SENTETİK TEİ HARİTALAMA BENZETİMİ

İyonosferin gelişmiş bir ileri modelinin bulunmaması ve örneklemenin konumda ve zamanda yeteri sıklıkta yapılamaması, aradeğerleme yöntemlerinin başarımlarının karşılaştırılmasında sentetik TEİ verilerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu bölümde, Bölüm 5 ve Bölüm 6'da anlatılan aradeğerleme yöntemleri, sentetik veriler üzerinde [47]'de izlenen yöntem ek olarak, örnek sayıları ve çeşitli yönseme fonksiyonları getirilerek karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde anlatılan Kriging ve Rassal Alan Öncülü yöntemlerinin aradeğerleme başarımlarının sentetik TEİ yüzeyleri üzerinde karşılaştırılması çalışmalarının bir kısmı çeşitli konferanslarda sunulmuştur [33; 34].

7.1 Sentetik TEİ Yüzeylerinde Aradeğerleme Uygulaması

Sentetik TEİ verilerinin gerçekleştirilmesi iyonosferin sakin ve bozulmalı durumları için, orta enlemlerde bulunan, enlemden $p_\theta = 1^\circ$ aralıklı $N_\theta = 11$ nokta, boylamda $p_\phi = 1^\circ$ aralıklı $N_\phi = 24$ nokta olacak şekilde, 264 noktadan oluşan bir ızgara üzerinde yapılmıştır. Belli bir anda iyonosferdeki *VTEC* değerleri, Bölüm 2'de anlatıldığı gibi bir $\mu(\mathbf{x})$ yönseme fonksiyonu ve beklentisi sıfır $Y(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonun toplamı olarak düşünülebilir.

$$G(\mathbf{x}) = \mu(\mathbf{x}) + Y(\mathbf{x}) \quad (7.1)$$

Gün içerisinde TEİ değerlerinin gece saatlerinde öğlen saatlerine göre daha az olması, yüksek enlemlerdeki TEİ değerlerinin ekvatora doğru gidildikçe artması, güneş ışınlarının daha dik geldiği boylamlardaki TEİ değerlerinin diğer boylamlara göre fazla olması iyonosferdeki yönseme fonksiyonlarına örnek olarak verilebilir. Orta enlemlerde yönseme fonksiyonları daha az değişiklik gösterirken ekvatora doğru değişiklikleri arttır. Sentetik TEİ verilerinde, iyonosferdeki yönseme fonksiyonlarını modelleyebilecek deterministik fonksiyonlar seçilebilir. İyonosferin günün değişik saatleri, sakin ve bozulmalı günleri gibi farklı değişkenlik durumlarını modelleyebilecek şekilde seçilen yönseme

fonksiyonları aşağıda verilmektedir.

$$\mu_1(\mathbf{x}) = a_{11} \quad (7.2)$$

$$\mu_2(\mathbf{x}) = a_{21} + a_{22}\theta + a_{23}\phi \quad (7.3)$$

$$\mu_3(\mathbf{x}) = a_{31} + a_{32}\theta + a_{33}\phi + a_{34}\theta^2 + a_{35}\theta\phi + a_{36}\phi^2 \quad (7.4)$$

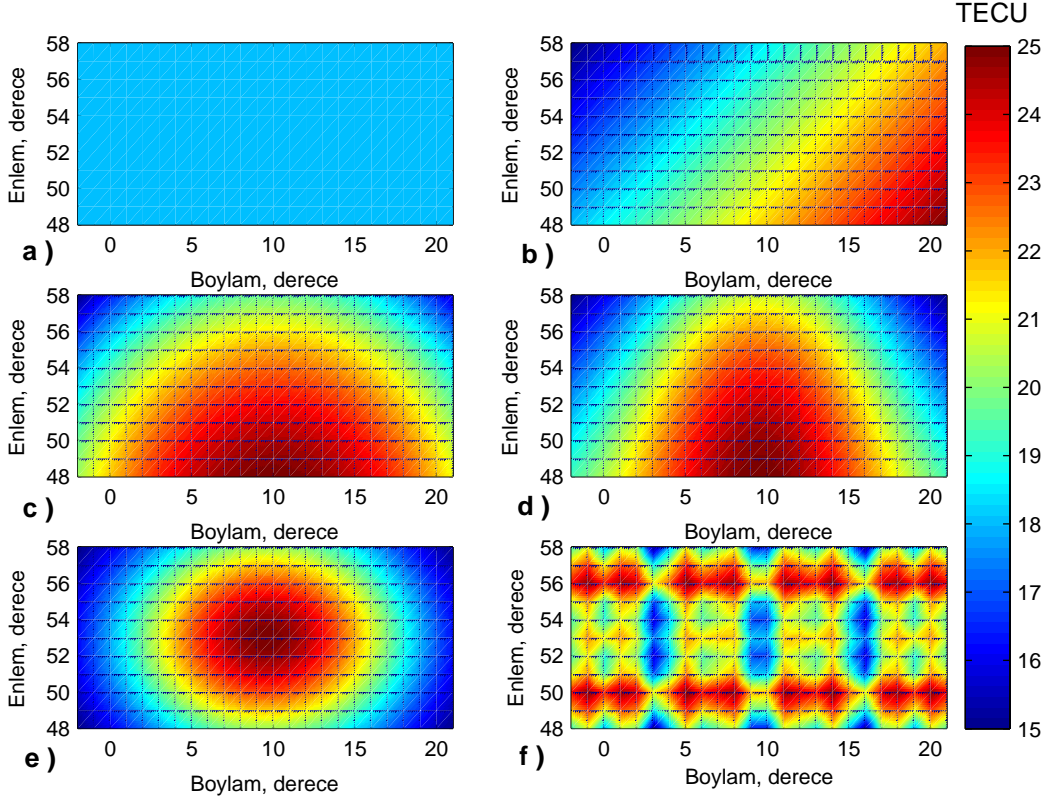
$$\mu_4(\mathbf{x}) = a_{41} + a_{42}\theta + a_{43} \exp \left(- \left(\frac{\theta - \theta_{40}}{a_{44}} \right)^2 - \left(\frac{\phi - \phi_{40}}{a_{45}} \right)^2 \right) \quad (7.5)$$

$$\mu_5(\mathbf{x}) = a_{51} + a_{52} \exp \left(- \left(\frac{\theta - \theta_{50}}{a_{53}} \right)^2 - \left(\frac{\phi - \phi_{50}}{a_{54}} \right)^2 \right) \quad (7.6)$$

$$\mu_6(\mathbf{x}) = a_{61} + a_{62} \sqrt{a_{63} \cos^2(\theta - \theta_{60}) + a_{64} \sin^2(\phi - \phi_{60})} - a_{65} \exp [a_{66}(\cos(\theta - \theta_{60}) + \cos(\phi - \phi_{60}))] \quad (7.7)$$

Eş. 7.2 sabit, Eş. 7.3 doğrusal, Eş. 7.4 ikinci dereceden polinom ve Eş. 7.5 Gauss yönseme fonksiyonlarını göstermektedir. Bu fonksiyonların parametreleri, iyonosferdeki kuzeyden güneye artışı ifade edecek şekilde seçilmiştir. Eş. 7.6 ve Eş. 7.8 fonksiyonları ise iyonosferin bozulmalı günlerini ifade edebilecek değişkenlikte fonksiyonlardır. Eş. 7.6'da Gauss fonksiyonunun merkezi seçilen bölgenin merkezinde iken Eş. 7.5'teki Gauss yönseme fonksiyonunun merkezi seçilen bölgenin güneyinde kalmaktadır. Seçilen bölgedeki ızgara noktalarında VTEC değerleri en küçük 15 TECU, en büyük 25 TECU olacak şekilde seçilmiştir. Şekil 7.1'de yönseme fonksiyonlarının ızgara noktalarında aldığı değerler verilmektedir. Bu durumda $\mu_1(\mathbf{x})$ için $a_{11} = 18$, $\mu_2(\mathbf{x})$ için $a_{21} = 33, 18$, $a_{22} = -0, 30$, $a_{23} = 0, 30$, $\mu_3(\mathbf{x})$ için $a_{31} = -44, 61$, $a_{32} = 2, 96$, $a_{33} = 0, 66$, $a_{34} = -0, 03$, $a_{35} = 0$, $a_{36} = -0, 03$, $\mu_4(\mathbf{x})$ için $a_{41} = 38, 06$, $a_{42} = -0, 43$, $a_{43} = 8, 66$, $a_{44} = 15$, $a_{45} = 10$, $\theta_{40} = 53$, $\phi_{40} = 9, 5$, $\mu_5(\mathbf{x})$ için $a_{51} = 1$, $a_{52} = 5$, $a_{53} = 7$, $a_{54} = 10$, $\theta_{50} = 53$, $\phi_{50} = 9, 5$, $\mu_6(\mathbf{x})$ için $a_{61} = 21, 09$, $a_{62} = a_{65} = 6, 01$, $a_{63} = a_{64} = 1$, $a_{66} = 0, 25$, $\theta_{60} = 53$, $\phi_{60} = 9, 5$ olarak seçilmiştir.

Dünya ve güneşin manyetik alanlarına, güneş fırtınalarına bağlı olarak iyonosferin değişkenliği belli zamanlarda artıp azalabilir. Güneş fırtınalarında TEİ değerleri diğer zamanlardakine göre daha fazla değişiklik gösterir. Bu değişikliği modelleyebilecek rassal bir fonksiyon $Y(\mathbf{x})$, jeostatistik veri benzetim yöntemlerinden biri olan Cholesky ayrıştırma yöntemi ile değişik konumsal bağımlılık veya yapısal uzaklık, a , değerleri ve değışinti değerleri için gerçekleştirilebilir [9]. Cholesky Ayrıştırma yöntemi



Şekil 7.1: Yönseme fonksiyonları, a) $\mu_1(\mathbf{x})$, b) $\mu_2(\mathbf{x})$, c) $\mu_3(\mathbf{x})$, d) $\mu_4(\mathbf{x})$, e) $\mu_5(\mathbf{x})$, f) $\mu_6(\mathbf{x})$

ile jeostatistiksel veri benzetimi Ek B'de anlatılmaktadır. Sentetik TEİ verilerinde $Y(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun gerçekleştirilmesi, Eş. 7.8'deki üssel eşdeğişinti fonksiyonunun kullanıldığı Cholesky ayrıştırma yöntemi ile yapılmıştır.

$$cov_Y(\mathbf{h}) = \sigma^2 \exp\left(\frac{-|\mathbf{h}|}{a}\right) \quad (7.8)$$

Eş. 7.8'de a yapısal uzaklık, σ^2 değişinti değerlerini göstermektedir. $Y(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun gerçekleştirilmesinde farklı konumsal ilinti değerleri için $a = 5, 10, 15$ ve çeşitli değişkenlik seviyeleri için $\sigma^2 = 0.64, 1.44, 2.56$ değerleri kullanılmıştır.

Örnekleme değişik çeşit ve sayılarda yapılmıştır. Düzenli örnekleme kare, üçgen ve altıgenlerden oluşan ızgara noktalarında yapılmıştır [43]. Rassal örnekleme birbiriyle, yakınlık engelli ve kümeli olarak yapılmıştır [47]. Birbiriyle örnekleme, enlemde ve boylamda çalışma bölgesi içerisinde birbiriyle gerçekleştirilen yapılar istenen sayıda oluşturulan enlem ve boylam çiftlerinden oluşmaktadır. Engelli örnekleme, örnek noktaları arasında en az 1.3^0 olmak koşulu ile birbiriyle oluşturulmuştur.

Kümeli örneklemelelerde, ortalaması 10 olan Poisson dağılımının gerçekleşmesi ana nokta sayısını vermektedir. Ana noktaların koordinatları, birbiçimli dağılımın çalışma bölgesindeki gerçeklemeleridir. Her ana noktanın etrafında, 10 nokta koordinatı iki boyutlu Gauss dağılımının gerçekleşmesinden bulunur. Gerçeklenen noktalardan çalışma bölgesi içerisinde kalanlar kümeli örnekleme noktalarıdır. Örnekleme $N_a=20$ (%7.6), 30 (%11.4), 40 (%15.2), 50 (%19.0), 60 (%22.7), 70 (%26.5) sayılarında yapılmıştır.

Sentetik TEİ verileri $G(\mathbf{x})$, ızgara ve örnekleme noktalarındaki yönseme $\mu(\mathbf{x})$ ve kalıntı $Y(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonlarının toplamıdır.

Aradeğerleme yöntemleri olarak, Bölüm 6'da anlatılan Rassal Alan Öncülü (RAÖ), Bölüm 5.2'de anlatılan Ortalamasız Kriging (NK), Bölüm 5.3'te anlatılan $N_k = 3$ durumu için doğrusal yönseme varsayan Evrensel Kriging (EK1) ve $N_k = 6$ durumu için ikinci dereceden polinom yönseme varsayan Evrensel Kriging (EK2) algoritmaları kullanılmıştır.

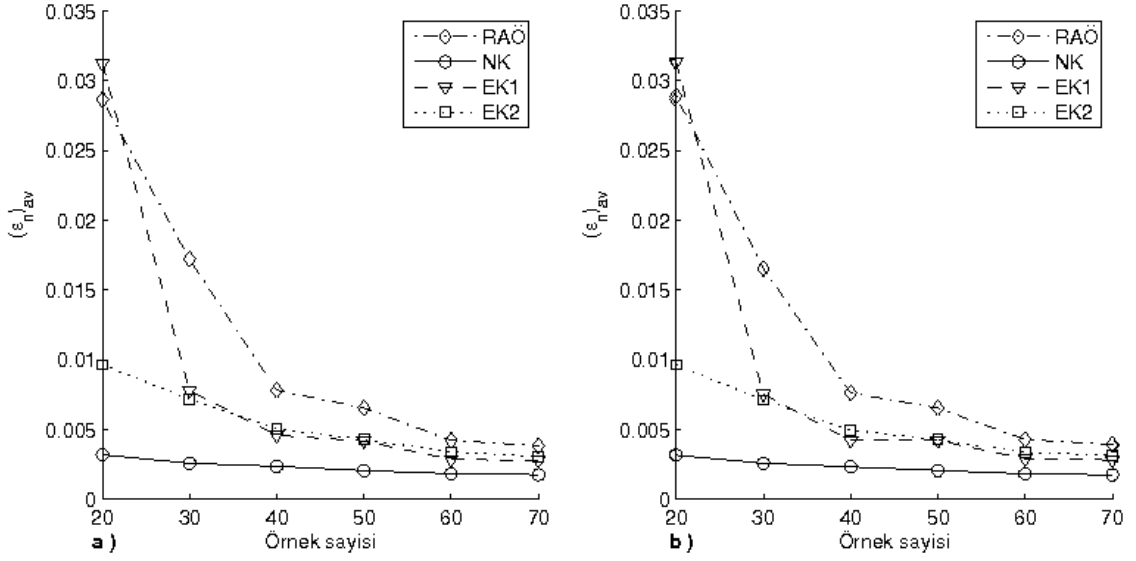
Izgara noktalarındaki kestirim değerleri $\hat{\mathbf{g}}_s$ ile gerçek değerler \mathbf{g}_s arasındaki normalize hata, ϵ_n , Eş. 7.9'da verilmektedir.

$$\epsilon_n = \frac{\|\mathbf{g}_s - \hat{\mathbf{g}}_s\|^2}{\|\mathbf{g}_s\|^2} \quad (7.9)$$

Normalize hata değeri 264 ızgara noktası üzerindeki gerçek değerler ve kestirimleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Ortalama normalize hata, $(\epsilon_n)_{av}$, herbir senaryonun n_g gerçekleşmesi ile yapılan benzetimlerin sonucunda hesaplanan normalize hata değerlerinin ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 7.2'de görüldüğü gibi, değişkenliği yüksek olan $\mu_5(\mathbf{x})$ yönseme fonksiyonu, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$ değerleri ve kümeli örnekleme ile yapılan aradeğerlemelerde gerçekleştirme sayısı $n_g = 10$ ve $n_g = 100$ değerleri için birbirine yakın ortalama normalize hata, $(\epsilon_n)_{av}$, değerleri elde edilmiştir. Bu yüzden bütün senaryolarda ortalama normalize hata değerlerinin bulunmasında $n_g = 10$ gerçekleştirme sayısı yeterli olacaktır.

Sentetik TEİ aradeğerleme benzetimlerinin uygulanmasındaki adımlar özet olarak aşağıda verilmektedir.

- 1) Izgara noktalarının koordinatlarını hesapla.
- 2) (Bir gerçekleştirme için) Örnek noktalarını üret;
 - a) Örnekleme çeşidini seç: Kare, Üçgen, Altıgen, Birbiçimli, Yakınlık Engelli, Kümeli.



Şekil 7.2: a) $n_g = 10$ ve b) $n_g = 100$ için $\mu_5(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, kümeli örnekleme ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri

b) Örnek sayısını N_a seç: 20, 30, 40, 50, 60, 70

c) Seçilen örnekleme çeşidi ve örnek sayısındaki örnek noktalarını üret.

3) Yönseme fonksiyonu değerlerini hesapla;

a) Yönseme fonksiyonunu seç: $\mu_1(\mathbf{x})$, $\mu_2(\mathbf{x})$, $\mu_3(\mathbf{x})$, $\mu_4(\mathbf{x})$, $\mu_5(\mathbf{x})$, $\mu_6(\mathbf{x})$.

b) Izgara noktaları ve örnek noktaları üzerindeki yönseme fonksiyonu değerlerini hesapla.

4) Kalıntı rassal fonksiyonun gerçeklemesini üret;

a) Değişinti σ^2 değerini seç: 0.64, 1.44, 2.56

b) Yapısal uzaklık a değerini seç: 5, 10, 15

c) Seçilen değişinti ve yapısal uzaklıktaki kalıntı rassal fonksiyonunun gerçeklemesini $y(\mathbf{x})$, ızgara ve örnek noktaları üzerinde üret.

5) Izgara ve örnek noktalarındaki yönseme ve kalıntı rassal fonksiyon değerlerini toplayarak Sentetik TEİ \mathbf{g}_s değerlerini bul

6) Örnek noktalarındaki değerlerden, RAÖ, NK, EK1 ve EK2 yöntemleri ile ızgara noktalarındaki değerleri kestir $\hat{\mathbf{g}}_s$ ve her yöntem için normalize hatayı ϵ_n

hesapla.

7) İkinci ve altıncı adımları $N_g = 10$ gerçekleştirme için tekrar ederek normalize hataları bul. Her yöntem için gerçeklemler üzerinden normalize hataların ortalamasını alarak ortalama normalize hata $(\epsilon_n)_{av}$ değerlerini hesapla.

Aradeğerleme algoritmalarında eşdeğişinti fonksiyonunun veya ikinci dereceden durağanlık durumunda bundan elde edilecek semivariogram fonksiyonlarının bilindiği varsayıp, gerçeklemede kullanılan semivariogram veya eşdeğişinti fonksiyonları kullanılmıştır. Böylece eşdeğişinti yapısını tahmin ederken yapılacak olan hata aradeğerleme sonuçlarını etkilemeyecektir. Hatalar yöntemlerin farklı yönseme fonksiyonu varsayımları, örneklem sayısı ve düzenleri, eşdeğişinti fonksiyonunun değişinti ve yapısal uzaklık değerlerinden kaynaklanacaktır.

RAÖ yönteminde, sadece konumda aradeğerleme yapılmıştır ve yönseme fonksiyonunun bilindiği kabul edilmektedir. Bu yöntem yönseme fonksiyonu varsayımından kaynaklanan hatalardan etkilenmeyecektir. Bu sayede yönseme fonksiyonunun bilindiği durumlar ile yönseme fonksiyonunun farklı fonksiyonlar varsayıldığı durumlardaki hata değerleri, örnekleme durumları, değişinti ve yapısal uzaklık değerleri üzerinden birbirleri ile karşılaştırılabilir.

Ek C'de aradeğerleme algoritmalarının, örnek sayılarına karşı Eş. 7.9'da verilen ortalama normalize hata değerlerinin grafikleri, bütün olası senaryolar için, yönseme fonksiyonu, değişinti, yapısal uzaklık ve örnekleme düzenleri için verilmektedir. Grafiklerde değişinti ve yapısal uzaklığın a) ($\sigma^2 = 0,64$, $a = 5$), b) ($\sigma^2 = 0,64$, $a = 10$), c) ($\sigma^2 = 0,64$, $a = 15$), d) ($\sigma^2 = 1,44$, $a = 5$), e) ($\sigma^2 = 1,44$, $a = 10$), f) ($\sigma^2 = 1,44$, $a = 15$), g) ($\sigma^2 = 2,56$, $a = 5$), h) ($\sigma^2 = 2,56$, $a = 10$), i) ($\sigma^2 = 2,56$, $a = 15$) değerleri; örnekleme düzenlerinden kare, üçgen, altıgen, birbiçimli, engelli ve kümeli olmak üzere 6 çeşit örnekleme düzeni; $N_a = 20, 30, 40, 50, 60, 70$ olmak üzere 6 örnekleme sayısı; sabit $\mu_1(\mathbf{x})$, doğrusal $\mu_2(\mathbf{x})$, ikinci dereceden polinom $\mu_3(\mathbf{x})$, güneyde ve merkezde bulunan Gauss fonksiyonları $\mu_4(\mathbf{x})$, $\mu_5(\mathbf{x})$ ve üssel-sinüsoidal $\mu_6(\mathbf{x})$ olmak üzere 6 yönseme fonksiyonu; RAÖ, NK, EK1 ve EK2 olmak üzere 4 aradeğerleme yöntemi ile toplam 7776 senaryo, $n_g = 10$ gerçekleştirme için 77.760 aradeğerleme hatası üzerinden incelenmektedir. Yapılan aradeğerleme benzetimlerinde genel olarak değişinti artarken, yüzeyin değişkenliği de arttığı için, hata değerleri artmakta, yöntemler birbirlerine yakın hatalar vermektedir. Yapısal uzaklık artarken, uzaklık arttıkça nokta-

lar arası ilinti daha geç azaldığı için, hata değerleri azalmaktadır. Bu durum sadece, değişkenliği ve elde edilen hata değerleri diğer yönseme fonksiyonlarına göre daha fazla olan $\mu_6(\mathbf{x})$ fonksiyonunda farklılık göstermiş, hata değerleri değişinti ve yapısal uzaklık değerlerine daha az bağımlılık göstermiştir. Bu durum $\mu_6(\mathbf{x})$ yönseme fonksiyonunun değişkenliğinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Düzenli örnekleme-lerde değişkenliğin az olduğu en iyi durum olan ($\sigma^2 = 0,64$, $a = 15$) değerlerinden değişkenliğin fazla olduğu en kötü durum olan ($\sigma^2 = 2,56$, $a = 5$) değerlerine gidildikçe ortalama normalize hatalarında 10 kata yakın bir artış gözlenmektedir (Şekil C.8). Ras-sal örnekleme düzenlerinde artan hata değerleri ile birlikte değişkenliğin en az ve en fazla olduğu durumlardaki fark azalmaktadır.

Yönseme fonksiyonunun sabit veya doğrusal olduğu ve düzenli örnekleme-ler ile yapılan aradeğerlemelerde (Şekil C.1, Şekil C.2, Şekil C.7, Şekil C.8, Şekil C.13, Şekil C.14) tüm değişinti ve yapısal uzaklık değerleri için bütün yöntemler birbirle-rine çok yakın sonuçlar vermiştir. Yönsemenin sabit, örnekleme-rin rassal olduğu du-rumlarda (Şekil C.19, Şekil C.25, Şekil C.31) EK2 en fazla hata değeri verirken, NK RAÖ'ye en yakın hata değerleri vermiştir. Yönseme doğrusal, örnekleme rassal iken (Şekil C.20, Şekil C.26, Şekil C.32) NK en fazla hata değeri verirken, EK1 RAÖ'ye çok yakın sonuçlar vermiştir.

Yönsemenin 2. dereceden polinom fonksiyonu, örnekleme-rin düzenli olduğu durumlarda (Şekil C.3, Şekil C.9, Şekil C.15) değişinti azken, EK2 RAÖ'ne çok yakın, NK ve EK1 bunlara göre daha fazla hata değerleri vermiş, örnekleme sayıları arttıkça, NK ve EK1, RAÖ hata değerlerine yaklaşmıştır. Değişinti arttıkça NK ve EK1, RAÖ ve EK2'ye yakın hatalar vermekte ve bütün yöntemlerin hataları artmaktadır.

Yönseme 2. dereceden polinom fonksiyonu, örnekleme rassal iken (Şekil C.21, Şekil C.27, Şekil C.27) NK, EK1'e göre daha fazla hata vermiş, EK2 ve RAÖ düşük değışintiler için birbirlerine çok yakın hata değerleri vermiştir.

Değişinti az iken $\mu_4(\mathbf{x})$ Gauss yönseme fonksiyonu, 2. derece polinom fonk-siyonundan farklı olarak, bütün örnekleme düzenleri için (Şekil C.4, Şekil C.10, Şekil C.16, Şekil C.22, Şekil C.28, Şekil C.34) NK, EK1, EK2 hataları birbirine yakın ve RAÖ'ne göre daha fazla hata değerleri vermiştir.

İyonosferin değişkenliği fazla olan durumları için kullanılabilecek $\mu_5(\mathbf{x})$ Gauss fonksiyonunda, düzenli örnekleme-lerde (Şekil C.5, Şekil C.11, Şekil C.17) yöntemlerin

hata değerleri birbirine yakinken, rassal örneklemelerde (Şekil C.23, Şekil C.29, Şekil C.35) EK2 yöntemi RAÖ yöntemine en yakın hata değerlerini verirken, EK1 yöntemi en fazla hata değerleri vermiş, NK de EK1'e yakın hata değerleri vermiştir. $\mu_6(\mathbf{x})$ yönseme fonksiyonunda ise değişkenlik daha fazla olduğu için hata değerleri artmakta, NK yöntemi EK1 ve EK2 yöntemlerine göre daha az hata değerleri vermektedir.

Şekil 7.3, $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$ ve $a = 15$ için birbiçimli örnekleme düzeni ve 30 örnek ile hesaplanan ortalama normalize hata değerlerinin yönseme fonksiyonlarına göre değişimini göstermektedir. Yönseme fonksiyonunu daha doğru modelleyen Kriging algoritmaları RAÖ'ne daha yakın hatalar vermişlerdir. Değişinti ve yapısal uzaklığın farklı değerleri için elde edilen grafikler de Şekil 7.3'e benzemektedir. Yönseme fonksiyonunun doğru varsayımı normalize hatayı etkileyen önemli parametrelerden biridir.

Şekil 7.4, ikinci dereceden yönseme fonksiyonu $\mu_3(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, ve 30 örnek sayısı için ortalama normalize hata grafiklerini göstermektedir. Düzenli örnekleme birbirine yakın hatalar vermiş, rassal örnekleme engelli örnekleme en az, kümeli örnekleme en fazla hata değerleri vermiştir. Şekil 7.5, yönseme fonksiyonu ikinci dereceden $\mu_3(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, değerleri için, birbiçimli örnekleme ile aradeğerleme ortalama normalize hatalarının örnek sayısına göre değişimini göstermektedir. Yönseme fonksiyonu ikinci dereceden olduğu için EK2 yöntemi RAÖ yöntemine yakın hata değerleri vermekte, NK yöntemi en fazla hata değerleri vermektedir.

Çizelge 7.1 kare, altıgen, birbiçimli ve kümeli örnekleme düzenleri ile, farklı yönseme fonksiyonları, $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, $N_a = 30$ örnek sayısı için RAÖ'nün ortalama normalize hataları ve NK, EK1, EK2 yöntemlerinin görelî hatalarını vermektedir. Kriging yöntemlerinin görelî hataları aşığıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\epsilon_r^K = 100 \times \frac{((\epsilon_n)_{av}^K - (\epsilon_n)_{av}^{RAO})}{(\epsilon_n)_{av}^{RAO}} \quad (7.10)$$

Eş. 7.10'da $(\epsilon_n)_{av}^K$ Kriging yöntemlerinin ve $(\epsilon_n)_{av}^{RAO}$ RAÖ yönteminin ortalama normalize hata değerleridir. Çizelge 7.1'de düzenli kare ve altıgen örnekleme ile yapılan aradeğerlendirme benzetimlerinde, farklı yönseme varsayımları yöntemlerin hata değerlerinde fazla bir sapmaya neden olmamıştır. İyonosferin sakin günlerini modelleyen yönseme fonksiyonları için görelî hata genellikle %10'dan azdır. Çizelge 7.1'de rassal örnekleme çeşitlerinden birbiçimli ve kümeli örnekleme ile aradeğerlemede yönseme yanlış tahmin edildiğinde görelî hata değerleri %100'ün üzerine çıkabilmektedir.

Çizelge 7.2’de EK2 yönteminin, NK yöntemine göre ϵ_r bağıl hatalarının,

$$\epsilon_r = \frac{(\epsilon_n)_{av}^{EK2} - (\epsilon_n)_{av}^{NK}}{(\epsilon_n)_{av}^{NK}} \times 100 \quad (7.11)$$

örnek sayısı arttıkça nasıl değiştiği bütün yönseme fonksiyonları ve iki farklı örnekleme düzeni için verilmiştir. Verilen değerler örnek sayısı arttıkça görülen en büyük bağıl hata değerleridir. Negatif değerler için NK daha fazla ortalama normalize hata değerleri vermektedir. Bütün yönseme fonksiyonları için rassal örnekleme düzeni ile yapılan aradeğerlemelerde yöntemlerin hataları arasındaki farklar düzenli örnekleme göre daha fazladır. Sabit yönseme fonksiyonu üzerinde rassal örnekleme ile yapılan aradeğerlemelerde yöntemler birbirine yakınken, rassal örnekleme EK2 daha fazla hata değerleri vermektedir. Doğrusal yönseme fonksiyonu ile yapılan aradeğerlemelerde düzenli örnekleme ile yöntemler birbirine yakın değerler verirken, rassal örnekleme ile NK daha fazla hata değerleri vermektedir. İkinci dereceden yönseme fonksiyonunda düzenli örnekleme ile NK daha fazla hata değeri verirken, rassal örnekleme ile bu değer artmaktadır. $\mu_4(\mathbf{x})$ yönseme fonksiyonunda ise düzenli örnekleme iki yöntem birbirine yakın değerler verirken, rassal örnekleme ile EK2 yöntemi NK’e göre daha az hata değerleri vermektedir. $\mu_5(\mathbf{x})$ yönseme fonksiyonunda düzenli örnekleme NK hata değerleri EK2 hata değerlerine yaklaşırken, rassal örnekleme örnek sayısı arttıkça yöntemlerin arasındaki fark daha fazla kalmıştır. Değişkenliğin fazla olduğu $\mu_6(\mathbf{x})$ fonksiyonunda ise düzenli örnekleme NK ve EK2 birbirlerine yakın sonuçlar verirken rassal örnekleme ile NK, EK2’ye göre daha az hata vermiştir. Her iki yöntem için de, az örnek ile daha fazla hata değeri veren yöntem, örnek sayısı arttıkça, daha az hata veren yönteme yaklaşmaktadır. Örnek sayısı arttıkça daha az hata veren yönteme yaklaşım hızı EK2 yöntemi için NK yöntemine göre daha fazladır.

Orta enlemlerde IGS alıcı istasyonlarının yerleşimleri kümeli örnekleme düzenlerine benzemektedir. Tek katmanlı iyonosfer modelini delme noktalarında hesaplanan TEİ değerleri kullanılırsa örnek sayısı artmakta, Bölüm 3.3’de anlatılan IONOLAB D-TEİ yöntemi ile istasyonlar üzerindeki değerleri kullanılırsa bu durum az sayıda örnek ve kümeli örnekleme düzeni ile yapılan aradeğerlemelere karşılık gelmektedir. Bu yüzden bu örnekleme düzeninin başarımı daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Kümeli örnekleme ile daha az sayıda olan $N_a = 10$ örnek kullanılarak, $n = 100$ gerçekleştirme için ve σ^2 , a ve yönseme fonksiyonlarının yukarıda kullanılan değerleri ile aradeğerlemeler yapılmıştır. Çizelge 7.3’te kümeli örnekleme ve $N_a = 10$ örnek sayısı için, aradeğerleme

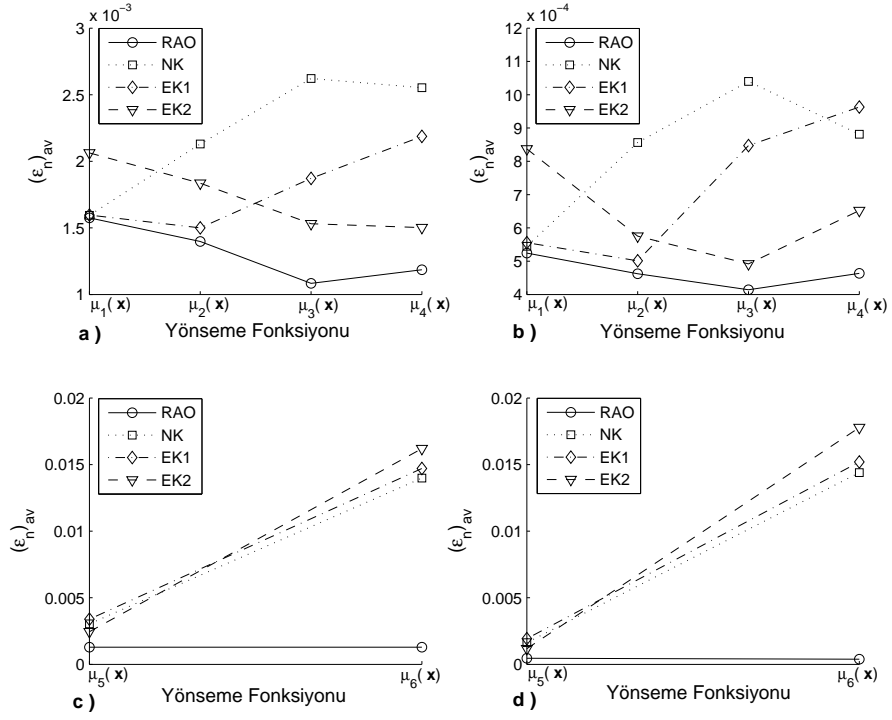
normalize hatalarının, σ^2 , a , $\mu(\mathbf{x})$ ve gerçeklemeler üzerinden en fazla ve en az değerleri verilmiştir. Normalize hatanın yanında ızgara noktaları üzerinde yapılan en büyük hata e_{eb} ve bu hataların ortalaması e_{ort} verilmektedir. Bir gerçekleştirme için hata vektörü $\mathbf{e} =$, her ızgara noktasında yapılan kestirim hatasının mutlak değeri olarak tanımlandığında e_{eb} , \mathbf{e} 'nin en büyük elemanı, e_{ort} ise \mathbf{e} 'nin elemanlarının ortalaması olarak hesaplanmıştır. Hata değerleri örneklemenin farklı dağılmış ve daha çok örneğin olduğu durumlara göre daha fazladır. RAÖ, NK, ve EK1'in bütün senaryolarda verdikleri hatalar belli bir üst limitin altında iken, EK2 yöntemi bazı kümeli örnekleme gerçeklemelerinde çok daha fazla hata değerleri verebilmektedir. Şekil 7.6 RAÖ, Şekil 7.7 NK, Şekil 7.8 EK1 ve Şekil 7.9 EK2 yöntemlerinin en az ve en çok hata verdiği Çizelge 7.3'teki durumlar için sentetik TEİ değerleri ile kestirimlerin haritalarını göstermektedir.

Şekil 7.10, Şekil 7.11 ve Şekil 7.12, sırasıyla, $N_a = 10$, $N_a = 20$, $N_a = 30$ örnek sayıları için kümeli örnekleme ile yöntemlerin normalize hata değerlerini gerçeklemelere göre göstermektedir. EK2'nin kümeli örnekleme ve az sayıda örnek ile yapılan aradeğerlemelerde bazı gerçeklemeler için, yüzeyin yönseme fonksiyonundan farklı yönseme fonksiyonu varsayan diğer yöntemlere göre çok fazla normalize hata değerleri verdiği görülmektedir. EK1 yöntemi de örneklemenin az sayıda ve kümeli olduğu durumlarda, NK yöntemine göre daha fazla hata değerleri vermektedir. Bu durum yetersiz örnek sayısı yüzünden yönseme fonksiyonunun yanlış bir şekilde tahmin edilmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 7.11 ve Şekil 7.12'de örnek sayısı arttığı için yönseme daha doğru bulunmakta ve hata değerleri azalmaktadır. Şekil 7.11'de EK2'nin en büyük normalize hataları EK1'in hatalarına yaklaşmış, Şekil 7.12'de EK1'in hatalarından daha az değerler almıştır. NK yöntemi ile elde edilen en fazla normalize hata değerleri her üç örnekleme sayısı için de EK1 ve EK2'nin en fazla normalize hatalarından daha azdır. Yönseme fonksiyonunu hesaplariken meydana gelebilecek hatalardan etkilenmediği için NK kümeli dağılmış az sayıda örnek ile yapılan aradeğerlemeler için daha gürbüz bir yöntem olarak düşünülebilir.

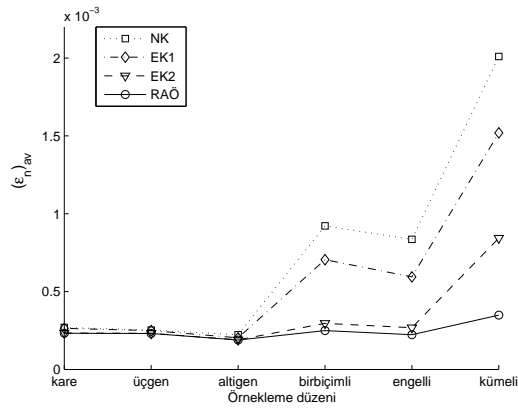
Sentetik verilerin aradeğerlemesinin yapıldığı bölge Kuzey Avrupa'ya karşılık gelmektedir. Bu bölgedeki işler durumunda olan YKS istasyonlarının dağılımı ise kümeli örnekleme düzeni, $N_a = 10$ için 80. gerçekleştirme ile elde edilen dağılıma benzemektedir. Bu durumda değişinti, yapısal uzaklık ve yönseme değişkenleri üzerinden en az ve en fazla normalize hata değerleri Çizelge 7.4'te verilmektedir. EK2 yöntemi az sayıda örnek

için diğer yöntemlere göre fazla normalize hata değerleri vermektedir.

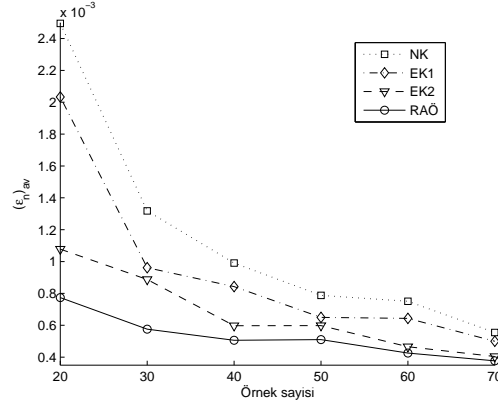
Yüzeylerin değişkenliklerinin en az olduğu $\sigma^2 = 0,64$ ve $a = 15$, ortalama sayılabilecek $\sigma^2 = 1,44$, $a = 15$ ve $a = 5$, değişkenliğin en fazla olduğu $\sigma^2 = 2,56$ ve $a = 5$ durumları için, ikinci dereceden yönseme fonksiyonu $\mu_3(\mathbf{x})$, altıgen, birbiçimli ve kümeli örneklemeler ve örnek sayıları $N_a = 20$ ve $N_a = 30$ ile yapılan aradeğerlemeler için Çizelge 7.5, Çizelge 7.6, Çizelge 7.7, sırasıyla, ortalama normalize hata, gerçeklemeler üzerinden en büyük hata $(e_{eb})_{av}$ ve ortalamaları $(e_{ort})_{av}$ vermektedir. $(e_{eb})_{av}$, yukarıda anlatılan e_{eb} 'nin tüm gerçeklemeler için en büyüğü, $(e_{ort})_{av}$ de tek bir gerçekleştirme için ızgara noktaları üzerinde yapılan hataların ortalaması olan e_{ort} 'nin gerçeklemeler üzerinden ortalamasıdır. Çizelge 7.5'te görüldüğü gibi düzenli örneklemelerden olan altıgen örnekleme ile yöntemler birbirlerine ve RAÖ'ne çok yakın ortalama normalize hata değerleri vermektedir. Yönseme fonksiyonu ikinci dereceden olduğu için EK2'nin hata değerleri diğer Kriging yöntemlerine göre biraz daha azdır. Bu durum Çizelge 7.6'da verilen en büyük hata değerleri ve Çizelge 7.7'de verilen ortalama hata değerlerinde de görülmektedir. Birbiçimli örneklemede ise sadece en kötü durum için EK2 biraz daha fazla hata vermiş, örnek sayısı artınca yine en az hata değerleri vermiştir. Kümeli örneklemede ise $N_a = 20$ iken EK1 NK'e göre daha fazla, $N_a = 30$ ike daha az hata değerleri vermiş, EK2 değişkenlik az olduğunda NK'e göre daha az hata vermiş, değişkenlik arttığında ise fazla hata vermektedir.



Şekil 7.3: Yönseme fonksiyonu ve ortalama normalize hata, $\sigma^2 = 1.44$, birbiçimli örnekleme, $N_a = 30$, a) $\mu_{1-4}(\mathbf{x})$, $a = 5$, b) $\mu_{1-4}(\mathbf{x})$, $a = 15$, c) $\mu_{5-6}(\mathbf{x})$, $a = 5$, d) $\mu_{5-6}(\mathbf{x})$, $a = 15$.



Şekil 7.4: Örnekleme düzeni ve ortalama normalize hata, $\mu_3(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, $N_a = 30$.



Şekil 7.5: Örnek sayısı ve ortalama normalize hata, $\mu_3(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, birbiçimli örnekleme.

		$(\epsilon_n)_{av}^{RAO}$	ϵ_r^{NK}	ϵ_r^{EK1}	ϵ_r^{EK2}
Kare	$\mu_1(\mathbf{x})$	$1,36 \times 10^{-3}$	+%0,01	-%0,12	+%1,09
	$\mu_2(\mathbf{x})$	$1,07 \times 10^{-3}$	+%0,31	+%0,03	-%0,19
	$\mu_3(\mathbf{x})$	$0,96 \times 10^{-3}$	+%9,03	+%8,96	+%0,39
	$\mu_4(\mathbf{x})$	$1,1 \times 10^{-3}$	+%9,17	+%8,90	+%4,77
Altıgen	$\mu_1(\mathbf{x})$	$1,23 \times 10^{-3}$	-%0,05	+%0,36	+%1,21
	$\mu_2(\mathbf{x})$	$0,96 \times 10^{-3}$	+%3,78	-%0,18	+%1,65
	$\mu_3(\mathbf{x})$	$0,91 \times 10^{-3}$	+%11,59	+%4,69	+%0,72
	$\mu_4(\mathbf{x})$	$0,93 \times 10^{-3}$	+%8,83	+%2,89	+%4,37
Birbiçimli	$\mu_1(\mathbf{x})$	$1,61 \times 10^{-3}$	+%0,12	+%6,31	+%37,48
	$\mu_2(\mathbf{x})$	$1,23 \times 10^{-3}$	+%65,69	+%7,30	+%37,32
	$\mu_3(\mathbf{x})$	$1,2 \times 10^{-3}$	+%115,09	+%83,02	+%15,99
	$\mu_4(\mathbf{x})$	$1,08 \times 10^{-3}$	+%117,04	+%102,99	+%42,87
Kümüli	$\mu_1(\mathbf{x})$	$2,22 \times 10^{-3}$	+%3,61	+%21,12	+%264,50
	$\mu_2(\mathbf{x})$	$1,32 \times 10^{-3}$	+%270,63	+%8,27	-%112,39
	$\mu_3(\mathbf{x})$	$1,30 \times 10^{-3}$	+%212,7	+%346,57	+%1118,90
	$\mu_4(\mathbf{x})$	$1,61 \times 10^{-3}$	+%191,63	+%570,82	+%372,26

Çizelge 7.1: Kare, Altıgen, Birbiçimli ve Kümüli örnekleme ile ortalama bağıl hata, $N_a = 30$, $\sigma^2 = 1,44$, $a = 5$.

Yönseme fonksiyonu	ϵ_r			
	Düzenli (Kare)		Rassal (Birbiçimli)	
	$N_a = 20$	$N_a = 70$	$N_a = 20$	$N_a = 70$
$\mu_1(\mathbf{x})$	%5	%0	%90	%10
$\mu_2(\mathbf{x})$	\pm %5	%0	-%50	-%30
$\mu_3(\mathbf{x})$	-%30	-%2	-%80	-%50
$\mu_4(\mathbf{x})$	\pm %15	\pm %15	-%55	-%30
$\mu_5(\mathbf{x})$	-%40	%0	-%50	-%15
$\mu_6(\mathbf{x})$	\pm %10	\pm %2	%70	%5

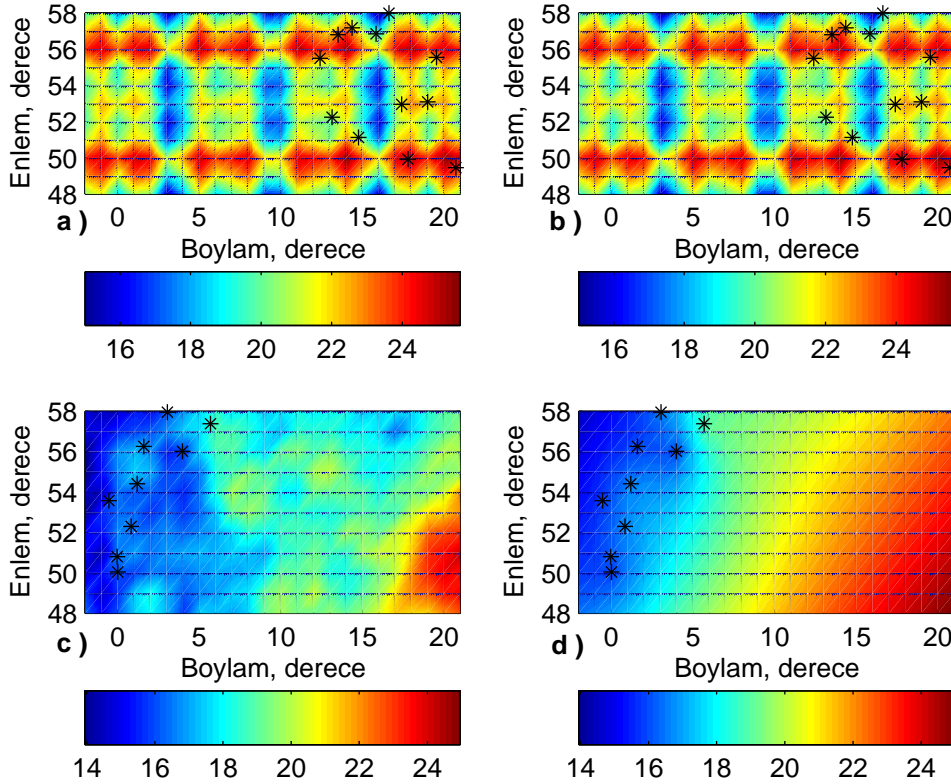
Çizelge 7.2: Tüm σ^2 ve a değerleri için, örnek sayısı arttıkça EK2'nin NK'e göre en büyük bağıl hata değerleri

		σ^2	a	n	$\mu(\mathbf{x})$	ϵ_n	e_{eb} (TECU)	e_{ort} (TECU)
RAÖ	en fazla	2.56	10	60	$\mu_2(\mathbf{x})$	$1,33 \times 10^{-2}$	4,99	1,76
	en az	0,64	15	42	$\mu_6(\mathbf{x})$	$1,56 \times 10^{-4}$	1,10	0,21
NK	en fazla	1.44	5	60	$\mu_2(\mathbf{x})$	$6,99 \times 10^{-2}$	10,94	4,31
	en az	0,64	15	2	$\mu_1(\mathbf{x})$	$1,98 \times 10^{-4}$	0,90	0,21
EK1	en fazla	2.56	5	99	$\mu_5(\mathbf{x})$	$5,29 \times 10^{-1}$	34,73	10,68
	en az	0,64	15	3	$\mu_1(\mathbf{x})$	$2,22 \times 10^{-4}$	1,00	0,22
EK2	en fazla	0.64	10	60	$\mu_6(\mathbf{x})$	850	1838	410
	en az	0,64	15	27	$\mu_1(\mathbf{x})$	$2,51 \times 10^{-4}$	0,97	0,22

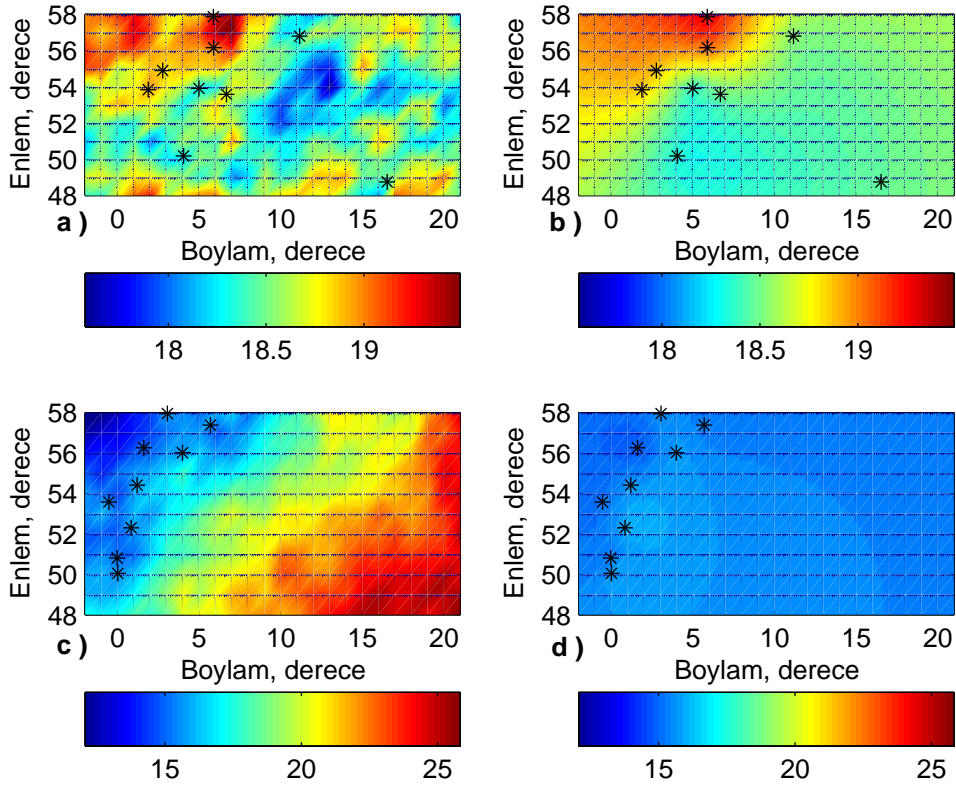
Çizelge 7.3: Poisson kümeli örnekleme düzeni, örnek sayısı $N_a = 10$ için bütün değişinti σ^2 , yapısal uzaklık a , gerçekleştirme n ve yönseme $\mu(\mathbf{x})$ fonksiyonları üzerinden yöntemlerin verdikleri en fazla ve en az normalize hata ϵ_n değerleri

		σ^2	a	$\mu(\mathbf{x})$	ϵ_n	e_{eb} (TECU)	e_{ort} (TECU)
RAÖ	en fazla	2,56	5	$\mu_1(\mathbf{x})$	$8,41 \times 10^{-3}$	4,34	1,33
	en az	0,64	15	$\mu_3(\mathbf{x})$	$1,58 \times 10^{-4}$	0,73	0,22
NK	en fazla	2,56	5	$\mu_6(\mathbf{x})$	$2,52 \times 10^{-2}$	10,65	2,48
	en az	0,64	15	$\mu_1(\mathbf{x})$	$6,43 \times 10^{-4}$	1,46	0,36
EK1	en fazla	1,44	5	$\mu_6(\mathbf{x})$	$5,38 \times 10^{-2}$	14,25	3,52
	en az	0,64	15	$\mu_2(\mathbf{x})$	$3,57 \times 10^{-4}$	1,17	0,29
EK2	en fazla	1,44	15	$\mu_6(\mathbf{x})$	$1,81 \times 10^{-1}$	23,52	5,63
	en az	0,64	15	$\mu_2(\mathbf{x})$	$1,23 \times 10^{-3}$	2,91	0,48

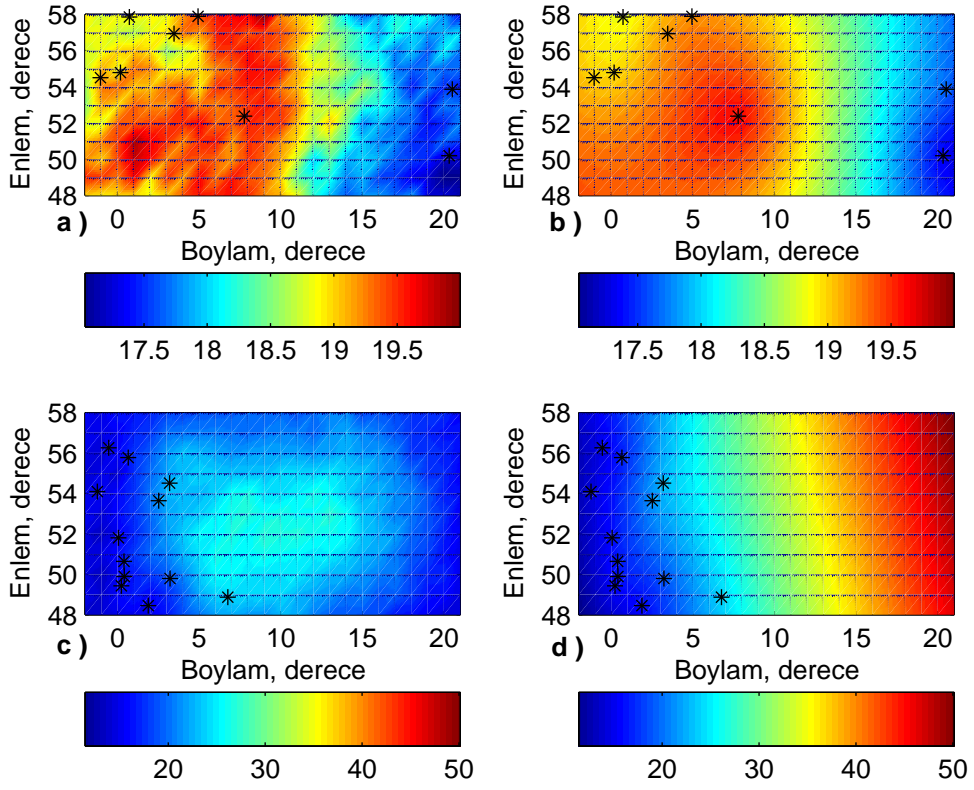
Çizelge 7.4: Poisson kümeli örnekleme düzeni, örnek sayısı $N_a = 10$, dağılımı Avrupa'daki YKS istasyonlarının dağılımına benzeyen 80. gerçekleştirme için, bütün değışinti σ^2 , yapısal uzaklık a , gerçekleştirme n ve yönseme $\mu(\mathbf{x})$ fonksiyonları üzerinden yöntemlerin verdikleri en fazla ve en az normalize hata ϵ_n değeri



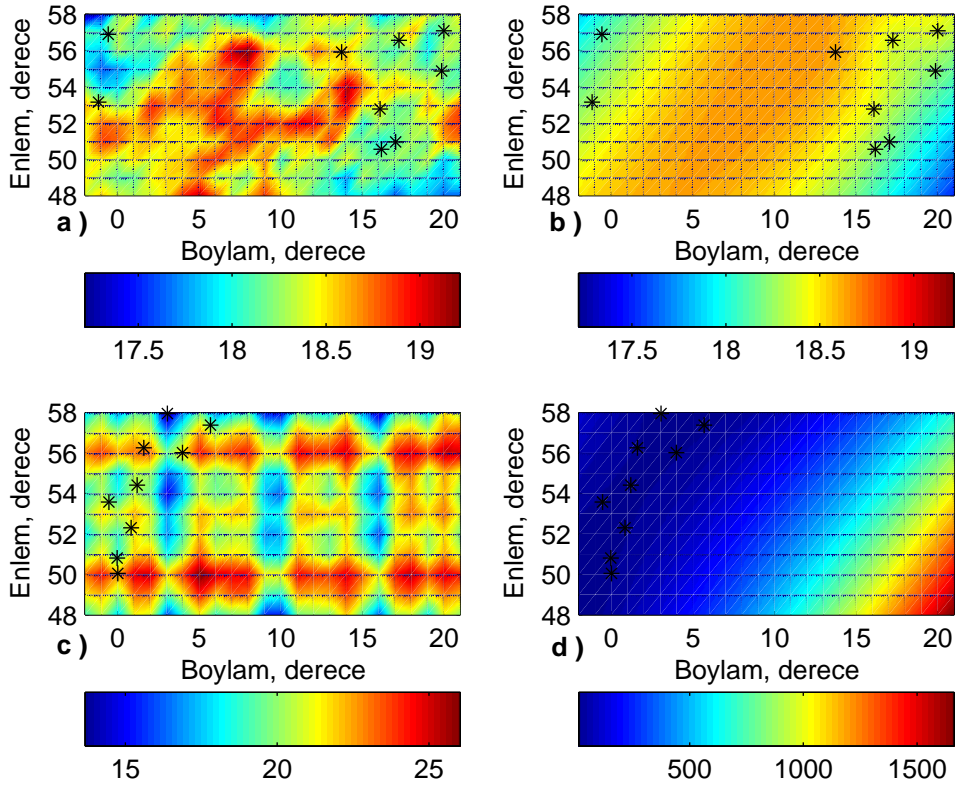
Şekil 7.6: a) $\mu_6(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$ için yüzey, b) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (a)'daki yüzeyin RAÖ yöntemi ile aradeğerlemesi, c) $\mu_2(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$ için yüzey, d) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (c)'deki yüzeyin RAÖ yöntemi ile aradeğerlemesi. '*' örnekleme noktalarıdır.



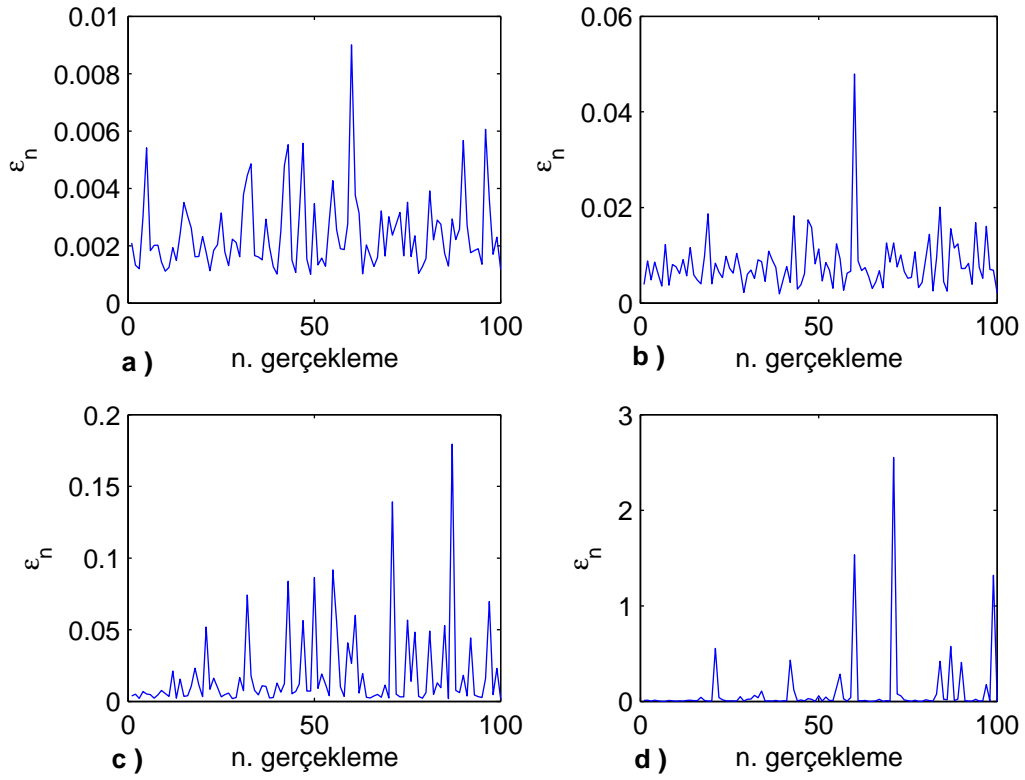
Şekil 7.7: a) $\mu_1(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$ için yüzey, b) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (a)'daki yüzeyin NK yöntemi ile aradeğerlemesi, c) $\mu_2(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$ için yüzey, d) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (c)'deki yüzeyin NK yöntemi ile aradeğerlemesi. '*' örnekleme noktalarıdır.



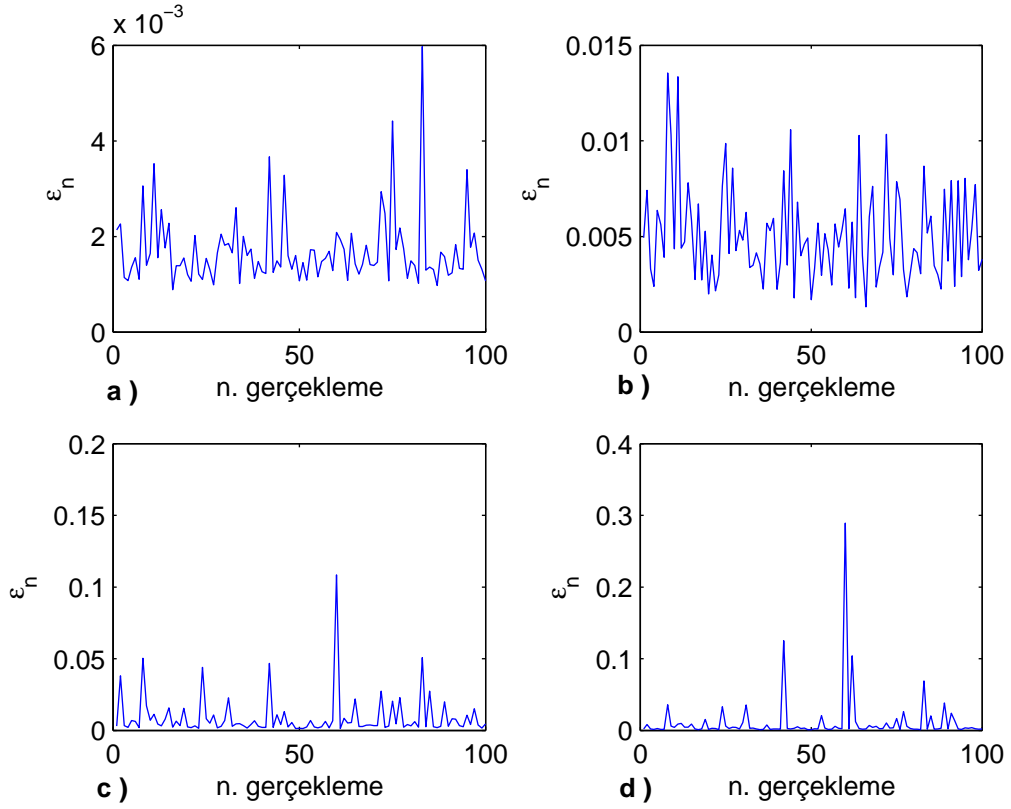
Şekil 7.8: a) $\mu_1(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$ için yüzey, b) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (a)'daki yüzeyin EK1 yöntemi ile aradeğerlemesi, c) $\mu_5(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$ için yüzey, d) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (c)'deki yüzeyin EK1 yöntemi ile aradeğerlemesi. '*' örnekleme noktalarıdır.



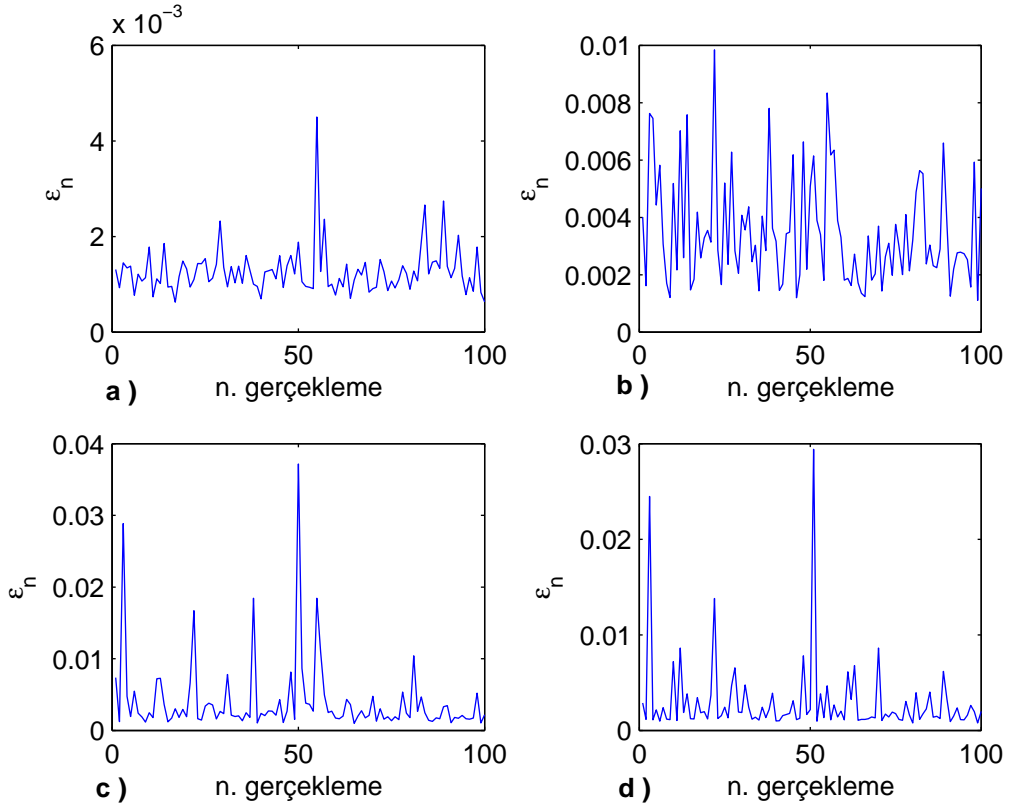
Şekil 7.9: a) $\mu_1(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$ için yüzey, b) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (a)'daki yüzeyin EK2 yöntemi ile aradeğerlemesi, c) $\mu_6(\mathbf{x})$, $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$ için yüzey, d) kümeli örnekleme, $N_a = 10$ için (c)'deki yüzeyin EK2 yöntemi ile aradeğerlemesi. '*' örnekleme noktalarıdır.



Şekil 7.10: Kümeli örnekleme, $N_a = 10$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$ ve $\mu_3(\mathbf{x})$ için a) RAÖ, b) NK, c) EK1, d) EK2 yöntemleri ile elde edilen normalize hata değerleri



Şekil 7.11: Kümeli örnekleme, $N_a = 20$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$ ve $\mu_3(\mathbf{x})$ için a) RAÖ, b) NK, c) EK1, d) EK2 yöntemleri ile elde edilen normalize hata değerleri



Şekil 7.12: Kümeli örnekleme, $N_a = 30$, $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$ ve $\mu_3(\mathbf{x})$ için a) RAÖ, b) NK, c) EK1, d) EK2 yöntemleri ile elde edilen normalize hata değerleri

	σ^2	a	$(\epsilon_n)_{av} (\times 10^{-3})$					
			Altıgen		Birbiçimli		Kümeli	
			$N_a = 20$	$N_a = 30$	$N_a = 20$	$N_a = 30$	$N_a = 20$	$N_a = 30$
RAÖ	0,64	15	0,20	0,14	0,21	0,19	0,24	0,22
	1,44	15	0,41	0,30	0,59	0,38	0,53	0,45
	1,44	5	1,20	0,93	1,44	1,08	1,48	1,22
	2,56	5	2,09	1,60	2,47	1,75	3,00	2,07
NK	0,64	15	0,24	0,16	1,42	0,79	2,36	2,30
	1,44	15	0,49	0,33	1,66	0,91	2,90	2,33
	1,44	5	1,33	1,04	3,41	2,36	4,90	3,94
	2,56	5	2,15	1,70	5,05	3,22	5,14	4,81
EK1	0,64	15	0,24	0,16	1,72	0,63	3,58	2,05
	1,44	15	0,47	0,32	1,94	0,83	4,44	2,22
	1,44	5	1,31	0,96	3,85	2,01	6,16	3,16
	2,56	5	2,14	1,64	4,83	2,43	7,03	3,75
EK2	0,64	15	0,20	0,14	0,27	0,25	1,01	0,28
	1,44	15	0,41	0,31	0,90	0,40	1,04	0,62
	1,44	5	1,23	0,93	2,03	1,32	4,97	1,48
	2,56	5	2,10	1,61	5,84	2,11	12,52	5,56

Çizelge 7.5: $\mu_3(\mathbf{x})$, en iyi $(\sigma^2, a) = (0.64, 5)$ ortalama $(\sigma^2, a) = (1.44, 15)$ ve $(\sigma^2, a) = (1.44, 5)$ ve en kötü $(\sigma^2, a) = (2.56, 5)$ durumlar, $N_a = 20$ ve 30 , altıgen, birbiçimli, kümeli örnekleme için ortalama normalize hata değerleri.

	σ^2	a	$(e_{eb})_{av}$ (TECU)					
			Altıgen		Birbiçimli		Kümeli	
			$N_a = 20$	$N_a = 30$	$N_a = 20$	$N_a = 30$	$N_a = 20$	$N_a = 30$
RAÖ	0,64	15	1,17	1,06	1,58	1,22	1,43	1,33
	1,44	15	1,78	1,38	2,61	1,59	2,45	2,37
	1,44	5	2,89	2,43	3,73	2,43	3,85	3,23
	2,56	5	3,81	3,21	5,12	3,19	4,59	4,33
NK	0,64	15	1,46	1,15	5,41	3,82	6,20	5,93
	1,44	15	1,92	1,49	5,64	3,83	7,28	6,54
	1,44	5	3,32	2,58	6,83	5,79	7,79	6,48
	2,56	5	4,06	3,44	8,85	6,21	7,73	7,28
EK1	0,64	15	1,38	1,20	6,56	3,39	7,63	6,79
	1,44	15	1,98	1,40	6,87	3,48	8,97	6,94
	1,44	5	3,21	2,52	8,20	5,34	9,62	7,99
	2,56	5	4,10	3,42	7,96	4,993	10,84	8,00
EK2	0,64	15	1,18	1,07	1,91	1,81	5,85	1,93
	1,44	15	1,74	1,38	3,32	1,84	4,60	3,36
	1,44	5	3,04	2,38	4,71	3,28	9,70	3,69
	2,56	5	3,98	3,20	8,99	4,65	18,68	10,97

Çizelge 7.6: $\mu_3(\mathbf{x})$, en iyi $(\sigma^2, a) = (0.64, 5)$ ortalama $(\sigma^2, a) = (1.44, 15)$ ve $(\sigma^2, a) = (1.44, 5)$ ve en kötü $(\sigma^2, a) = (2.56, 5)$ durumlar, $N_a = 20$ ve 30 , altıgen, birbiçimli, kümeli örnekleme için en büyük hata değerleri.

	σ^2	a	$(e_{ort})_{av}$ (TECU)					
			Altıgen		Birbiçimli		Kümeli	
			$N_a = 20$	$N_a = 30$	$N_a = 20$	$N_a = 30$	$N_a = 20$	$N_a = 30$
RAÖ	0,64	15	0,24	0,20	0,24	0,23	0,26	0,24
	1,44	15	0,34	0,30	0,39	0,33	0,38	0,35
	1,44	5	0,58	0,51	0,63	0,55	0,64	0,57
	2,56	5	0,78	0,68	0,83	0,70	0,91	0,77
NK	0,64	15	0,26	0,21	0,53	0,40	0,64	0,64
	1,44	15	0,36	0,31	0,62	0,46	0,75	0,66
	1,44	5	0,60	0,53	0,91	0,76	1,06	0,93
	2,56	5	0,79	0,69	1,12	0,90	1,14	1,11
EK1	0,64	15	0,26	0,21	0,51	0,36	0,68	0,54
	1,44	15	0,36	0,31	0,59	0,45	0,83	0,60
	1,44	5	0,60	0,52	0,86	0,69	1,03	0,81
	2,56	5	0,79	0,68	1,04	0,81	1,22	0,97
EK2	0,64	15	0,24	0,20	0,27	0,25	0,39	0,27
	1,44	15	0,34	0,30	0,48	0,34	0,50	0,39
	1,44	5	0,58	0,51	0,73	0,60	0,96	0,62
	2,56	5	0,78	0,68	1,11	0,76	1,46	1,05

Çizelge 7.7: $\mu_3(\mathbf{x})$, en iyi $(\sigma^2, a) = (0.64, 5)$ ortalama $(\sigma^2, a) = (1.44, 15)$ ve $(\sigma^2, a) = (1.44, 5)$ ve en kötü $(\sigma^2, a) = (2.56, 5)$ durumlar, $N_a = 20$ ve 30 , altıgen, birbiçimli, kümeli örnekleme için ortalama hata değerleri.

8. KONUMSAL SEMIVARIOGRAM FONKSİYONU KESTİRİMİ

Bölüm 7’de sentetik veriler kullanılarak yapılan aradeğerlemelerde semivariogram değerleri, sentetik verilerin gerçekleşmesinde kullanılan semivariogram fonksiyonlarından elde edilmiştir. Bu sayede aradeğerleme başarımını etkileyen örnek sayısı, örnekleme düzeni, rassal fonksiyonun yapısal uzaklık ve değışintisi gibi parametrelerin etkisi, semivariogram kestiriminden bağımsız hale getirilerek daha ayrıntılı incelenmiştir. Gerçek verilerle yapılacak olan aradeğerlemelerde ise öncelikle semivariogram kestiriminin yapılması gerekmektedir.

Bu bölümde, YKS sinyallerinden elde edilen TEİ verileri kullanılarak semivariogramın kestirimi incelenecektir. Bölüm 2’de ifade edildiği gibi, rassal fonksiyonun iki noktadaki değerinin farklarının değışintisinin aradaki uzaklığa bağı olan değışimi semivariogram fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Semivariogram fonksiyonu aradeğerleme yöntemlerinde kullanıldığı için kestirimi önem kazanmaktadır. Blanch [7], iyonosferden kaynaklanan YKS gecikmelerinin konumsal semivariogramları incelenerek 2500 km’lik bir uzaklıktan sonra konumsal bağımlılığın azaldığı gözlemlenmiştir. Edwards et al. [10], iyonosferin doğu-batı yönündeki konumsal bağımlılığının, kuzey-güney yönündeki konumsal bağımlılığından daha fazla olduğunu gözlemiştir [39].

Semivariogram kestirimi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada elde edilen verilerden deneysel semivariogram $\hat{\gamma}(\mathbf{h})$ hesaplanır. TEİ rassal fonksiyonunun ergodik olduğu varsayılarak tek bir TEİ rassal fonksiyon gerçekleşmesinden istatistiksel yapının kestirimi yapılabilir. Bölüm 2’de Eş. 2.15 ile verilen uzay-zaman semivariogram fonksiyonunun konum için olan hali deneysel semivariogramın kestiriminde kullanılabilir:

$$2\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{N(\mathbf{h})} \sum_{n_a=1}^{N(\mathbf{h})} (z(\mathbf{x}_{n_a}) - z(\mathbf{x}_{n_a} + \mathbf{h}))^2 \quad (8.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte $z(\mathbf{x}_{n_a})$, \mathbf{x}_{n_a} konumundaki TEİ ölçümünü, $N(\mathbf{h})$, uzayda aralarındaki konum farkı \mathbf{h} vektörü olan nokta çiftlerinin sayısını göstermektedir. Gerçek TEİ verileri kullanılırken, noktalar arası uzaklığın, $h = |\mathbf{h}|$, hesaplanmasında dünyanın şekli gözönüne alınmalıdır. Noktalar arası uzaklık, h , Dünya Jeodezik Sistemi 1984 (WGS84) elipsoidinde tanımlanan jeodezik koordinatlardan, [38]’de anlatılan yöntem kullanılarak hesaplanmıştır.

İkinci aşamada ise deneysel semivariograma $\hat{\gamma}(\mathbf{h})$, teorik bir semivariogram $\gamma(\mathbf{h})$ modeli uyarlanır [9]. Teorik semivariogram fonksiyonu koşullu negatif tanımlı bir

fonksiyondur ve Kriging denklemlerinde kullanılan semivariogram değerleri bu fonksiyondan bulunabilir [45].

Bölüm 2’de durağanlık koşulunu sağlamayan rassal fonksiyonların, $Z(\mathbf{x})$, bir yönseme fonksiyonu, $\mu(\mathbf{x})$, ve küçük ölçekli değişimi ifade eden durağan bir rassal fonksiyonun, $Y(\mathbf{x})$, toplamı olarak modellenebileceği anlatılmıştı (Eş. 2.9). Bir rassal fonksiyonun semivariogram kestiriminde, yönseme fonksiyonun kestiriminin rassal fonksiyondan çıkartılması ve semivariogram kestiriminin küçük ölçekli değişimi ifade eden rassal fonksiyonun gerçekleştirilmesi olarak düşünülen kalıntılardan elde edilmesi gerekmektedir. Yönsemenin çıkartılmadığı durumlarda ise semivariogram kestirimi yanlış olabilmektedir [9]. İyonosferdeki TEİ değerleri de konumda, kutuplardan ekvatora doğru artmakta, güneşi gören boylamlardan diğer yerlere doğru azalmaktadır. Bunların yanında 11 yıllık güneş lekesi çevrimi de büyük ölçekli bir yönseme olarak düşünülebilir. Bu yüzden, TEİ rassal fonksiyon olarak ifade edildiğinde yönseme ve küçük ölçekli değişimleri ifade eden durağan bir rassal fonksiyonun toplamı olarak modellenebilir. Bu durumda, deneysel semivariogram yönseme fonksiyonu üzerindeki küçük ölçekli rassal fonksiyonun gerçekleştirilmesi olarak düşünülen ve TEİ değerlerinden yönseme fonksiyonunun değerlerinin çıkartılması ile elde edilen kalıntılardan $Y(\mathbf{x})$ hesaplanabilir. Bu küçük ölçekli değişimin bulunabilmesi için yönseme fonksiyonunun kestirimi gerekmektedir.

TEİ veri kaynakları olarak, Bölüm 3’te bahsedilen IRI modeli, IGS merkezlerinin GIM haritaları ve IONOLAB D-TEİ ölçümleri kullanılabilir. IRI modeli ampirik bir model olup, belli bir zaman ve konumdaki TEİ değerini, iyonosonda ölçümlerine dayalı bir modele göre vermektedir. Bu da bazı durumlarda IRI kestirimlerinin, modele olan bağlılıktan dolayı, iyonosferin değişkenliklerini yansıtabilmesini güçleştirmektedir. GIM haritaları dünya üzerinde geniş alanlara yayılmış çift frekanlı YKS alıcılarının ölçümlerinden elde edilen TEİ kestirimlerinden üretildikleri için IRI modeline göre iyonosferin değişkenliğini daha iyi yansıtabilmektedir. IONOLAB D-TEİ ise GIM’lere göre zamanda daha fazla çözünürlük sağlamaktadır.

Güneş iyonosferi etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesidir. Güneşin zenit açısı χ , güneş ışınlarının yerel zenit ile yaptığı açı olarak tanımlanmaktadır. Gulyaeva [11] iyonosferik ölçümlere uygulanabilecek, güneşin zenit açısının etkisinin giderildiği bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, belli bir andaki bir noktadan elde edilen ölçüm üzerindeki güneşin zenit açısının etkisini gidermek için, güneşin zenit açısı χ ve güneşin

zenit açısının en küçük değeri χ_0 kullanılarak elde edilen bir faktör kullanılmaktadır. Dik TEİ değerleri $VTEC$ ile gösterilirse, güneşin zenit açısının etkisinin giderilmiş dik TEİ değerleri de $VTECn$ ile gösterilebilir. Bu yöntemde $VTECn$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [11];

$$VTECn = VTEC \times \frac{p(\chi)}{p(\chi_0)} \quad (8.2)$$

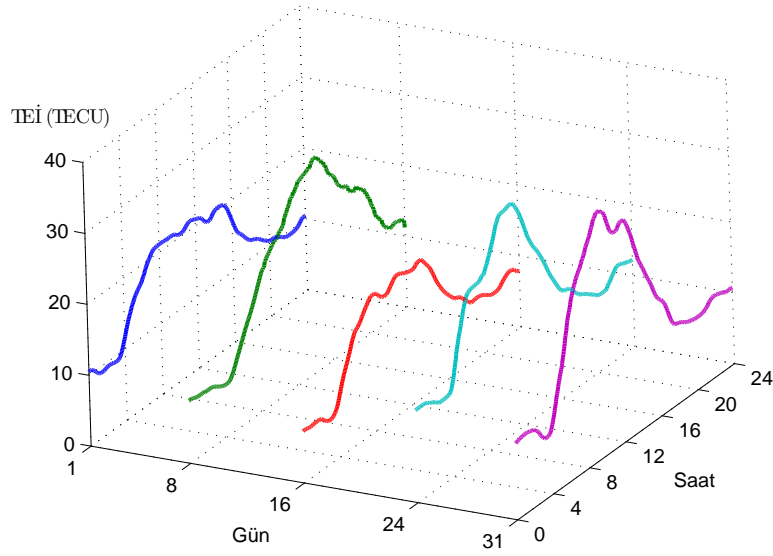
Yukarıdaki eşitlikte, $p(\chi) = \chi^2 - \alpha\chi + \beta$ polinomunu ifade etmektedir ve katsayıları, χ ve χ_0 açıları radyan cinsinde iken $\alpha = 3.54$ ve $\beta = 3.875$ 'dir. GIMn, GIM haritalarından, D-TEİn, D-TEİ değerlerinden güneş zenit açısı etkisi giderilerek elde edilen harita ve değerleri ifade edecektir.

Bu bölümde yönseme ve semivariogram fonksiyonlarının kestirimi hem GIM haritalarından hem de YKS istasyonlarının kaydettiği gözlemlerden elde edilen D-TEİ kullanılarak yapılacaktır. Güneşin zenit açısının etkisinin giderildiği GIMn ve D-TEİn verilerinden de kestirimler yapılarak güneşin zenit açısının etkisi incelenecektir. Bulunan yönseme fonksiyonları, TEİ değerlerinden çıkarılarak elde edilecek olan kalıntılar üzerinden deneysel semivariogram hesaplanacaktır.

8.1 GIM ve GIMn Kullanılarak Yönseme ve Semivariogram Kestirimi

Yönseme fonksiyonunun belli bir nokta ve zamandaki kestiriminde aylık ortanca metodu kullanılmıştır. Bu yöntemle, istenilen bir günün 15 gün öncesi ve sonrasındaki günlerin aynı saatinde ölçülen TEİ değerleri üzerinden ortanca değerleri alınarak istenilen saatteki verilere göre daha az değişken bir yüzey elde edilebilir. Şekil 8.1'de Ankara istasyonu üzerindeki TEİ değişiminin 2004 yılının Ekim ayının 1, 8, 16, 24 ve 31'inci günlerindeki değişimi görülmektedir. Bu noktadaki aylık ortanca değeri saat eksenine dik, gün eksenine paralel bir doğru boyunca uzanan değerlerin ortancası olur. Her saat için bir ortanca değeri bulunabilir. Bu ortanca değerleri yönseme fonksiyonları olarak düşünülebilir.

Yönseme fonksiyonunun kestirimine bir örnek olarak, GIM haritaları kullanılarak, 16 Mayıs 2004 ve 16 Ekim 2004 günleri için iki saat aralıklarla aylık ortancalar alınmıştır. Şekil 8.2 GIM ve GIMn değerlerinden elde edilen 16 Ekim 2004 saat 1200UT için aylık ortanca yüzeylerini göstermektedir. Şekil 8.2b'deki yüzey Şekil 8.2a'daki yüzeye göre daha az değişkenlik göstermektedir. Güneş zenit açısının etkisi



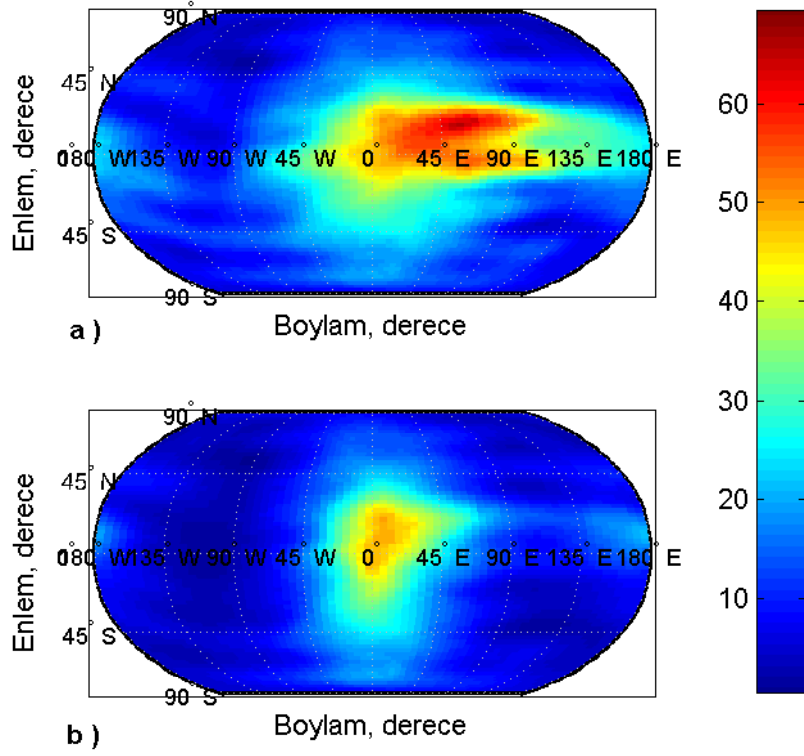
Şekil 8.1: Ekim 2004 ayı için Ankara istasyonu üzerindeki günlük TEİ değerleri.

giderildiğinde TEİ değerleri güneşin dik geldiği boylamlarda toplanmakta ve normalizasyondan dolayı değerleri azalmaktadır.

Aylık ortancalar alınarak elde edilen yönseme kestirimleri istenilen saat için TEİ değerlerinden çıkartılarak, deneysel semivariogram kestirimi kalıntıları üzerinden yapılabilir. Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'te, sırasıyla 16 Mayıs 2004 ve 16 Ekim 2004 günlerinin farklı saatlerinde GIM ve GIMn verileri kullanılarak elde edilen deneysel semivariogram fonksiyonları gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde noktalar arasındaki uzaklık yaklaşık 2500 km ile 3000 km'yi geçtikten sonra noktalar üzerindeki TEİ değerlerinin konumsal bağımlılığı azalmaktadır. Hem GIM hem de GIMn verilerinden elde edilen deneysel semivariogram fonksiyonlarında genel olarak 3000 km uzaklıktan sonra semivariogram fonksiyonunun eğiminde bir azalma gözlenmiştir. 3000 km'lik bir uzaklığı kapsayan bir bölgede konumsal bağımlılığın belirlenmesi ve haritalamanın bu büyüklükte bir bölgede yapılması daha anlamlı olacaktır.

8.2 D-TEİ ve D-TEİn Kullanılarak Yönseme ve Semivariogram Kestirimi

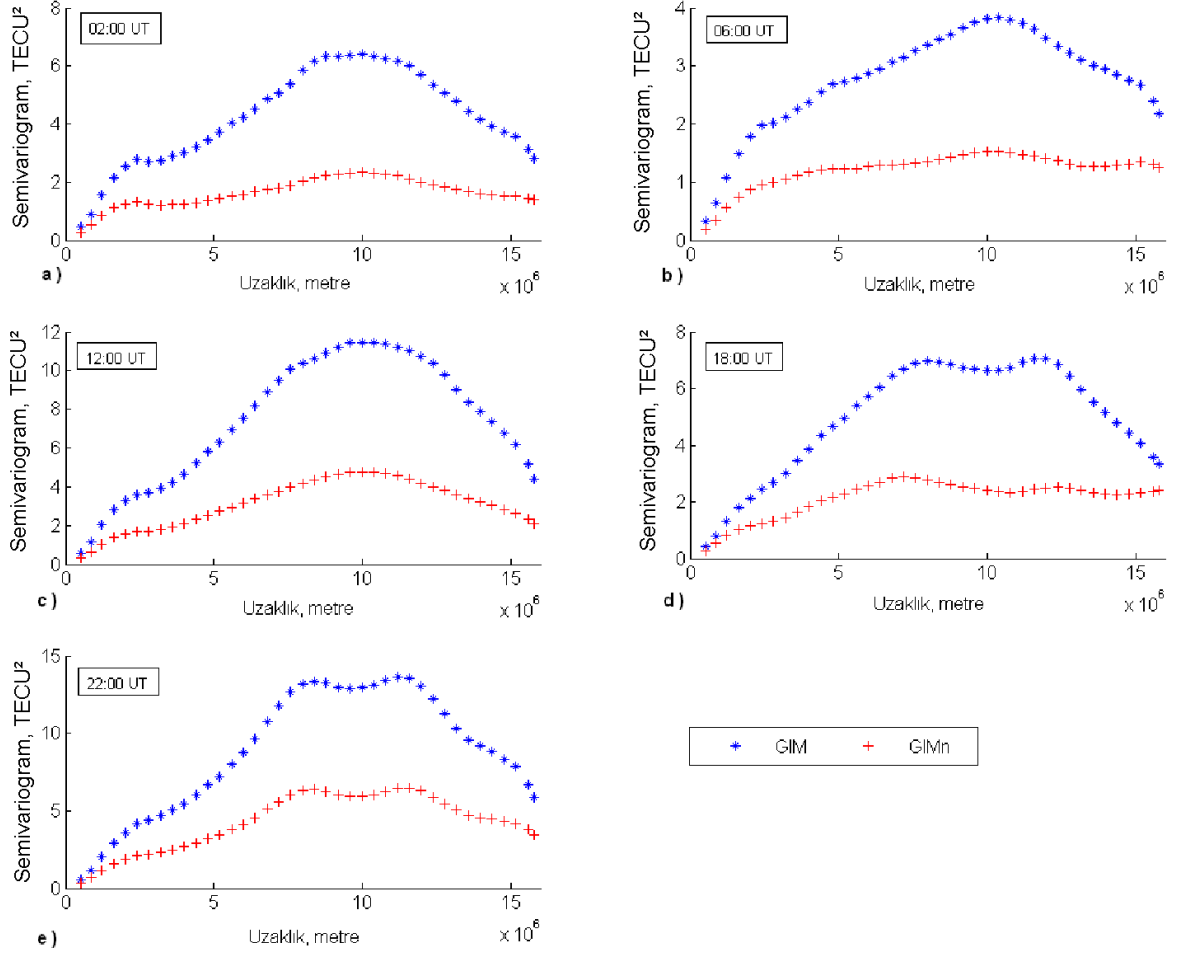
YKS istasyonlarının kaydettiği sözde menzil ve faz verileri kullanılarak hesaplanan ve Bölüm 3'te anlatılan D-TEİ verileri kullanılarak da yönseme fonksiyonu ve deneysel semivariogram hesaplanabilir. D-TEİ ve D-TEİn değerleri IGS istasyonlarının



Şekil 8.2: a) GIM, b) GIMn haritaları 16 Ekim 2004, 1200UT

üzerindeki VTEC değerlerinin kestirimleridir. Bu verilerle bulunacak olan semivariogram fonksiyonu hesaplanmadan önce istasyon üzerindeki yönseme değerleri kestirilmelidir. 2004 yılının Ekim ayı boyunca veri elde edilebilen IGS istasyonlarının listesi Çizelge 8.1’de verilmektedir. İstasyonların dağılımı ise Şekil 8.5’te gösterilmektedir.

16 Ekim 2004 günü için Avrupa üzerinde Çizelge 8.1’de verilen 39 IGS istasyonu kullanılarak faz ölçümlerinden D-TEİ verileri elde edilmiştir. Bir aylık ortancalar alınarak bulunan yönseme fonksiyonu, TEİ değerlerinden çıkartılmış ve semivariogram kestirimleri yapılmıştır. İncelenen IGS istasyonlarının sayısının az olması semivariogram yapısının en iyi şekilde kestirimini güçleştirmiştir. Şekil 8.6’da günün belli saatleri için D-TEİ ve D-TEİ’nin kullanılarak elde edilen deneysel semivariogramlar verilmiştir. Şekil 8.6a ve Şekil 8.6b grafiklerinde yaklaşık 3000 km’lik bir uzaklıktan sonra noktalar üzerindeki değerlerin ilintisinin azaldığı gözlenmektedir. Diğer grafiklerde ise örnek sayısı az olduğu için semivariogram yapısı sağlıklı bir şekilde kestirilememiştir. Bir sonraki bölümde haritalama için yönseme fonksiyonu GIM’lerden elde edilebilir veya D-TEİ değerlerinden elde edilen aylık ortancalara iki boyutlu bir fonksiyonun

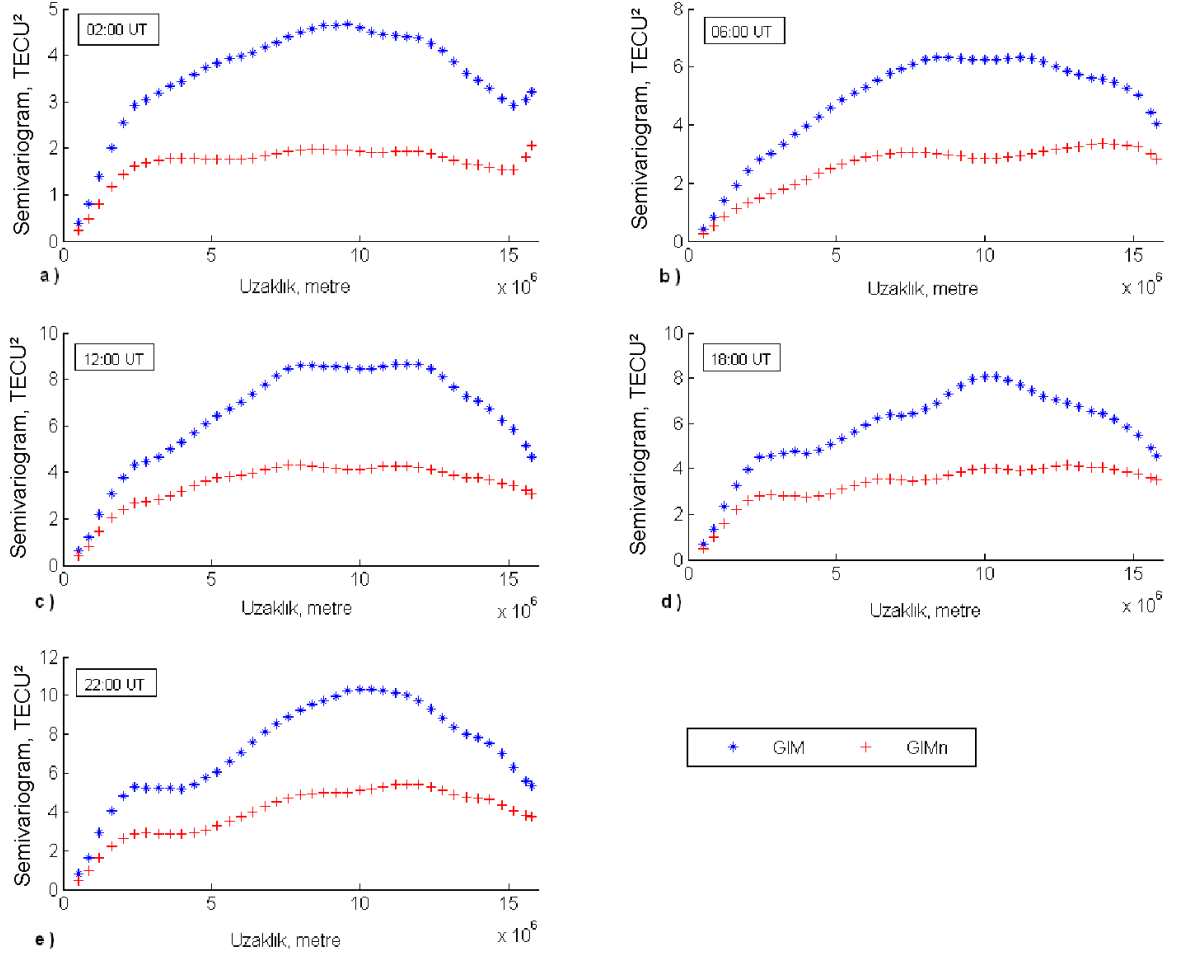


Şekil 8.3: 16 Mayıs 2004 günü için GIM ve GIMn değerleri ile elde edilen deneysel semivariogram fonksiyonları, a) 0200UT, b) 0600UT, c)1200UT, d) 1800UT, e) 2200UT.

uyarlanması ile bulunabilir.

D-TEİ verileri ile yapılacak olan haritalamaların anlamlı olabilmesi için en büyük boyutları 3000 km'lik bir uzaklığı kaplayabilecek büyüklükte bir alan üzerinde seçilmiştir.

Aylık ortalama alma yöntemi ile yönseme fonksiyonu değerleri sadece ölçüm noktaları üzerinde kestirilebilmektedir. Ölçüm alınmayan noktalardaki TEİ rassal fonksiyonunun yönseme değerlerinin kestirimi için GIM haritalarından aylık ortalama alınarak kestirimler yapılabilir. Yönseme, D-TEİ'lerin aylık ortancaları alınarak da bulunabilir. Bu durumda ölçüm alınmayan noktalardaki yönseme fonksiyonu aylık ortalama ile bulunan yönseme değerlerine uyarlanacak olan iki boyutlu deterministik bir fonksiyondan hesaplanabilir. Günün saatine göre bu fonksiyon sabit, doğrusal veya



Şekil 8.4: 16 Ekim 2004 günü için GIM ve GIMn değerleri ile elde edilen deneysel semivariogram fonksiyonları, a) 0200UT, b) 0600UT, c)1200UT, d) 1800UT, e) 2200UT.

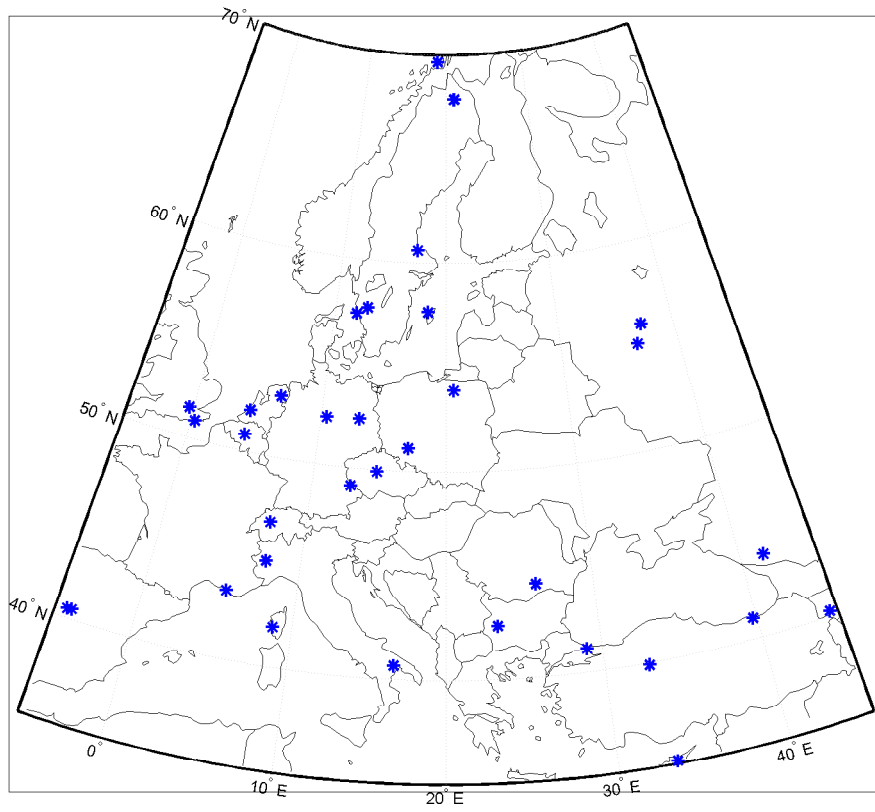
ikinci derecededen bir polinom olabilir.

Kestirilen yönseme fonksiyonu TEİ değerlerinden çıkartılarak, kalıntıların semivariogram kestiriminde kullanılacaktır. Kalıntıların aradeğerlemesinden sonra ise kestirilen kalıntı değerlerine eklenerek TEİ kestirimleri elde edilecektir.

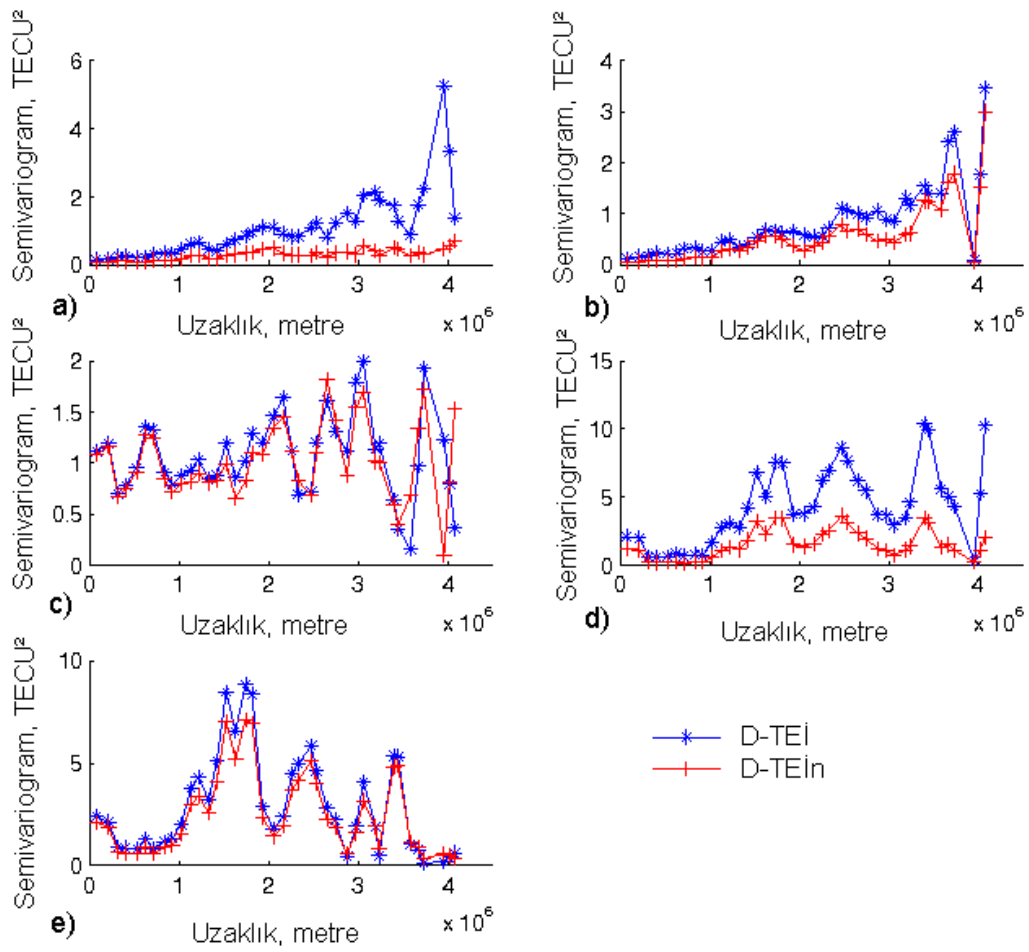
Bir sonraki bölümde faz ölçümlerinden elde edilen D-TEİ verileri ile aradeğerlemeler yapılarak iyonosferdeki TEİ değişimi incelenecektir.

YKS İstasyonu	Kısa İsim	Enlem	Boylam
Ajaccio, Fransa	ajac	41.93°N	8.76°E
Ankara, Türkiye	ankr	39.89°N	32.76°E
Brüksel, Belçika	brus	50.80°N	4.36°E
Bükreş, Romanya	bucu	44.46°N	26.13°E
Delft, Hollanda	dlft	51.99°N	4.39°E
Ondrejov, Çek Cumhuriyeti	gope	49.91°N	14.79°E
Hailsham, İngiltere	hers	50.87°N	0.34°E
Hailsham, İngiltere	hert	50.87°N	0.33°E
Torino, İtalya	ieng	45.02°N	7.64°E
İstanbul, Türkiye	ista	41.10°N	29.02°E
Kiruna, İsveç	kir0	67.88°N	21.06°E
Kiruna, İsveç	kiru	67.86°N	20.97°E
Olsztyn, Polonya	lama	53.89°N	20.67°E
Robledo, İspanya	madr	40.43°N	-4.25°E
Maartsbo, İsveç	mar6	60.56°N	17.26°E
Marsilya, Fransa	mars	43.28°N	5.35°E
Matera, İtalya	mat1	40.65°N	16.71°E
Mendeleev, Rusya	mdvj	56.02°N	37.22°E
Obninsk, Rusya	mobn	55.12°N	36.57°E
Lefkoşa, Güney Kıbrıs	nico	35.14°N	33.39°E
Teddington, İngiltere	npld	51.42°N	-0.34°E
Erivan, Ermenistan	nssp	40.23°N	44.50°E
Onsala, İsveç	onsa	57.40°N	11.93°E
Potsdam, Almanya	pots	52.38°N	13.07°E
Braunschweig, Almanya	ptbb	52.30°N	10.46°E
Sofya, Bulgaristan	sofi	42.57°N	23.40°E
Boras, İsveç	spt0	57.72°N	12.89°E
Trabzon, Türkiye	trab	41.00°N	39.78°E
Tromsøe, Norveç	tro1	69.66°N	18.94°E
Tromsøe, Norveç	trom	69.66°N	18.94°E
Villafranca, İspanya	vill	40.44°N	-3.95°E
Visby, İsveç	vis0	57.65°N	18.37°E
Wroclaw, Polonya	wroc	51.11°N	17.06°E
Westerbork, Hollanda	wsrt	52.92°N	6.61°E
Koetzting, Almanya	wtza	49.14°N	12.88°E
Bad Koetzting, Almanya	wtzr	49.14°N	12.88°E
Bad Koetzting, Almanya	wtzz	49.14°N	12.88°E
Zelenchukskaya, Rusya	zeck	43.79°N	41.57°E
Zimmerwald, İsviçre	zimj	46.88°N	7.47°E

Çizelge 8.1: YKS istasyonlarının listesi



Şekil 8.5: İncelenen IGS istasyonlarının dağılımı



Şekil 8.6: D-TEİ ve D-TEİn kullanılarak bulunan deneysel semivariogramlar

9. D-TEİ VERİLERİ KULLANILARAK ELDE EDİLEN TEİ HARİTALARI

Bölüm 7’de sentetik verilerle yapılan aradeğerleme benzetimi çalışmalarında hangi örnekleme düzeni ve örnek sayısında, hangi aradeğerleme yönteminin daha gürbüz değerler vereceğinin belirlenmesine çalışılmış, Bölüm 8’de ise gerçek TEİ ölçümleri kullanılarak TEİ rassal fonksiyonunun yönseme ve semivariogram fonksiyonlarının kestirimi yapılmıştır. Bu bölümde ise önceki bölümlerde edinilen bilgiler çerçevesinde gerçek TEİ değerleri kullanılarak Avrupa üzerindeki iyonosfer haritaları oluşturulacaktır.

Bölüm 8’de yaklaşık 3000 km’lik bir uzaklıktan sonra noktalar arasındaki kornusal bağımlılığın azaldığı bilgisine ulaşılmıştır. Bu yüzden Avrupa kıtasını kapsayacak, boylamda -5° ’den 45° ’ye, enlemde 35° ’den 70° ’ye olan bölgede TEİ kestirimi yapmak, birbirleri ile ilintili değerler kullanılacağı için anlamlı olacaktır. TEİ değerlerinin kestirimleri enlemde ve boylamda 1° ’lik aralıklarla yapılacaktır. Bölüm 3’te anlatılan ızgara modeli için Eş. 3.3’de $\theta_i = -5^\circ$, $p_\theta = 1^\circ$, $N_\theta = 51$ ve Eş. 3.4’de $\phi_i = -5^\circ$, $p_\phi = 1^\circ$, $N_\phi = 51$ için elde edilecek düzenli noktalarda kestirimler yapılarak TEİ haritaları elde edilecektir.

16 Ekim 2004 günü için haritalamanın yapılacağı bölge içerisindeki YKS istasyonlarının koordinatları Bölüm 8’de Çizelge 8.1’de verilmiştir. İstasyonların dağılımları ise Şekil 8.5’te verilmiştir. Bölgede veri alınabilen toplam 39 YKS istasyonu bulunmaktadır ve bunlardan birçoğu batı Avrupa bölgesinde kümelenmiştir. Bölüm 7’de kümeli örnekleme durumlarında az sayıda örnek için EK1 ve EK2 yöntemlerinin fazla hatalar verebileceği, NK yönteminin ise daha makul hatalar verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışılan bölge ve gün için veri sayısı çok düşük olmadığı için EK1 ve EK2 yöntemleri ile de aradeğerlemeler yapılabilir. Aradeğerlemelerin yapılacağı zamanlar olarak iyonosferin gece durumları için 0200UT, güneşin doğuşundaki durumları için 0600UT, güneşin tepede olduğu durumları için 1200UT, güneş batarkenki durumları için 1800UT ve güneşin battıktan sonraki durumları için 2200UT anları seçilmiştir. Aradeğerleme yöntemleri olarak Bölüm 5 ve Bölüm 6’da anlatılan NK, EK1, EK2 ve RAÖ yöntemleri Bölüm 3.3’te anlatılan kullanılarak YKS istasyonlarından elde edilen D-TEİ verileri ile iyonosferdeki TEİ değerlerinin haritaları elde edilmiştir.

Haritalamanın yapıldığı her saat için, yönseme fonksiyonu, Bölüm 8’de an-

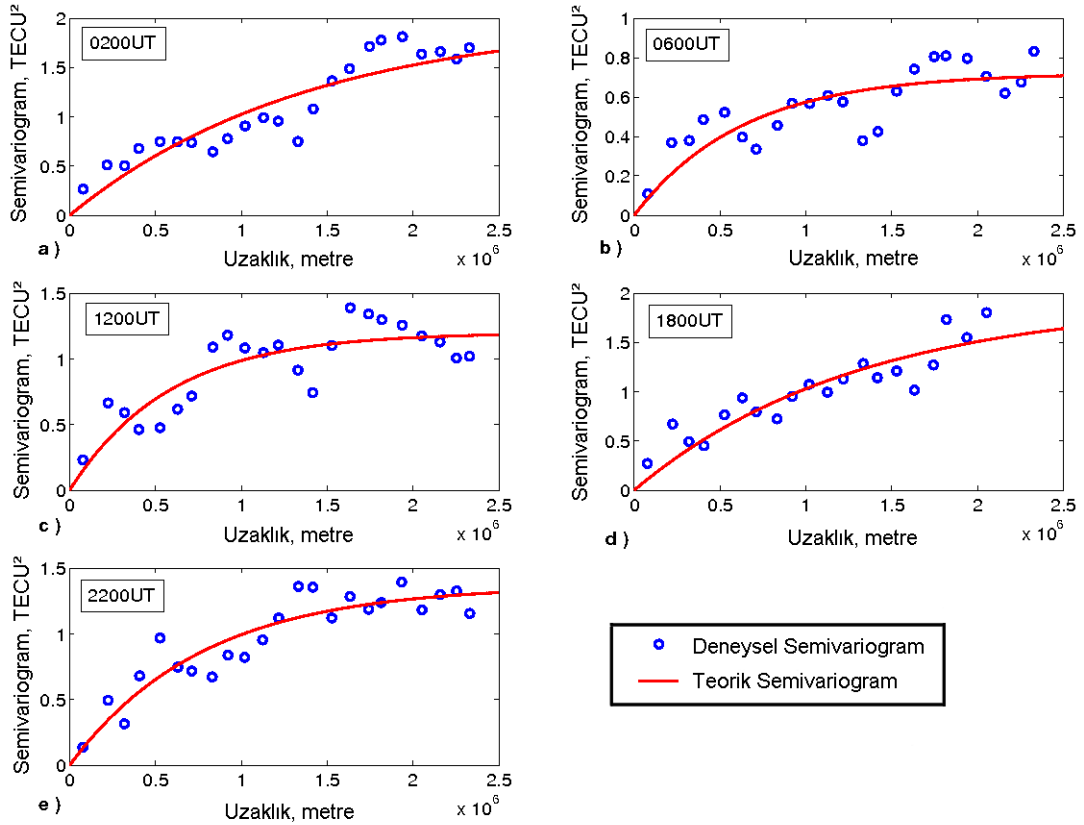
latıldığı gibi, istasyonların üzerindeki GIM değerlerinin aylık ortancalarının bulunması ile kestirilmiştir. GIM'lerden elde edilen aylık ortanca değerleri D-TEİ değerlerinden çıkartılmış ve geride kalan değerlerin deneysel semivariogramı Eş. 8.1 ile hesaplanmıştır. Eş. 5.3'te verilen üssel semivariogram fonksiyonu, deneysel semivariogram fonksiyonuna uyarlanarak teorik semivariogram fonksiyonu elde edilmiştir. Bütün aradeğerleme yöntemleri için kalıntılar üzerinden bulunan üssel semivariogram fonksiyonunun değerleri kullanılmıştır. Şekil 9.1, 16 Ekim 2004 gününün 0200UT, 0600UT, 1200UT, 1800UT ve 2200UT saatleri için 39 YKS istasyonunun gözlemlerinden hesaplanan D-TEİ verileri ile elde edilen deneysel ve teorik semivariogramları göstermektedir. Teorik semivariogram modeli için üssel semivariogram fonksiyonu kullanılmıştır. Üssel semivariogram fonksiyonu, deneysel semivariogram değerlerine doğrusal olmayan en küçük kareler metodu kullanılarak uyarlanmıştır. Çizelge 9.1 her saat için üssel semivariogram fonksiyonunun parametrelerinin aldığı değerleri göstermektedir. Uyarlama hatası, ϵ_γ , deneysel semivariogram değerleri ile onlara karşılık gelen teorik semivariogram fonksiyonunun değerlerinin farkının karelerinin toplamıdır.

UT	$c_0, TECU^2$	$c, TECU^2$	$a, metre$	$\epsilon_\gamma, TECU^4$
0200	0	2.00	1.39×10^6	0.89
0600	0	0.72	6.30×10^5	0.29
1200	0	1.20	5.78×10^5	0.66
1800	0	1.92	1.31×10^6	0.63
2200	0	1.37	7.72×10^5	0.42

Çizelge 9.1: 16 Ekim 2004 günü incelenen saatlerdeki üssel semivariogram parametreleri.

Bölüm 6'da RAÖ yönteminde rassal fonksiyonun semivariogram ve yönsemesinin bilindiğinin varsayıldığı ifade edilmiştir. Bu yüzden GIM'lerden aylık ortancalarla elde edilen yönseme fonksiyonu kestirimleri D-TEİ değerlerinden çıkartılarak haritalama kalıntılar üzerinden yapılmış, ızgara noktaları üzerinde kalıntı değerleri kestirildikten sonra yönseme fonksiyonunun bu noktalar üzerindeki kestirimi eklenerek TEİ kestirimi bulunmuştur.

Bölüm 5.2'de anlatılan NK yönteminde ise yönsemenin sabit olduğu ve yönseme fonksiyonunun bilindiği kabul edilmektedir. NK yöntemi ile ızgara noktaları üzerindeki aradeğerlemeler D-TEİ verileri kullanılarak yapılmıştır. Yönseme fonksiyonu



Şekil 9.1: 16 Ekim 2004 günü için deneysel ve teorik semivariogramlar.

D-TEİ değerlerinden çıkartılmamıştır.

Bölüm 5.3'de anlatılan EK yönteminde ise $N_k = 3$ için EK1 yöntemi TEİ yüzeyi içerisinde doğrusal yönseme fonksiyonu olduğunu, $N_k = 6$ için ise EK2 yöntemi ikinci dereceden polinom yönseme fonksiyonu varsaymaktadır. Bu yöntemler yönseme fonksiyonunu Kriging denklemleri içerisinde veriye uyarlayarak kestirimleri yönseme fonksiyonunda gözönünde bulundurarak yapmaktadırlar.

D-TEİ verileri ile yapılan aradeğerlemeler sonucunda Bölüm 7'deki sentetik verilerle yapılan çalışmalarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. NK yönteminin verdiği hata değişimleri EK1 ve EK2 yöntemlerinin verdikleri hata değişimlerinden daha azdır. 16 Ekim 2004 günü için RAÖ, NK, EK1 ve EK2 yöntemleri kullanılarak 0200UT, 0600UT, 1200UT, 1800UT, 2200UT saatlerinde elde edilen TEİ haritaları, sırası ile, Şekil 9.1, Şekil 9.2, Şekil 9.3, Şekil 9.4 ve Şekil 9.5'de veilmiştir. Bu şekillerde a), c), e), f) grafikleri, sırasıyla, RAÖ, NK, EK1 ve EK2 yöntemleri ile elde edilen TEİ

kestirimlerinin haritalarını; b), d), f), h) grafikleri ise, sırasıyla, RAÖ, NK, EK1 ve EK2 yöntemleri ile elde edilen TEİ kestirimlerinin hata değişimlerinin haritalarını göstermektedir. İncelenen bütün saatlerde en az hata değişimi veren yöntem NK, en fazla hata değişimi veren ise EK2 yöntemidir. EK1 yönteminin hata değişimleri NK ve EK2'ninkilerin arasındadır. RAÖ yöntemi ise 0200UT ve 1800UT saatlerinde diğer saatlere göre daha fazla hata değişimi vermiştir.

Kestirim yöntemlerinin başarımının incelenmesinde çapraz doğrulama metodu yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [45]. Çapraz doğrulama yönteminde, N_a örnek içeren veri kümesinde bulunan her örnek, $Z(\mathbf{x}_{n_a})$, $1 \leq n_a \leq N_a$, sırasıyla veri kümesinden çıkartılır ve çıkartılan noktadaki değer veri kümesindeki diğer örnekler kullanılarak kestirilir. $\hat{Z}(\mathbf{x}_{[n_a]})$, n_a 'ncı örneğin diğer örnekler kullanılarak kestirimi gösterecektir. Gerçek değerden kestirilen değer çıkartılarak bu noktadaki kestirim hatası $e_{n_a} = Z(\mathbf{x}_{n_a}) - \hat{Z}(\mathbf{x}_{[n_a]})$ olur. Kestirim hatasının mutlak değeri gerçek değere bölünerek bağıl hata, $e_{r_{n_a}} = |e_{n_a}|/Z(\mathbf{x}_{n_a})$ bulunur. Çapraz doğrulama yönteminin başarım ölçütü her noktada elde edilen kestirim hatalarının veya bağıl hataların ortalamasıdır. Bunlar, sırası ile, çapraz doğrulama kestirim hatası, ϵ_x , ve çapraz doğrulama bağıl hatası, ϵ_{r_x} , olarak adlandırılacaktır.

$$\epsilon_x = \frac{1}{N_a} \sum_{n_a=1}^{N_a} |e_{n_a}| \quad (9.1)$$

$$\epsilon_{r_x} = \frac{1}{N_a} \sum_{n_a=1}^{N_a} e_{r_{n_a}} \quad (9.2)$$

Çizelge 9.2'de 16 Ekim 2004 günü için, 0200UT, 0600UT, 1200UT, 1800UT, 2200UT saatlerindeki, RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile Çizelge 8.1'de verilen istasyonlar kullanılarak elde edilen çapraz doğrulama bağıl hataları verilmektedir. Çizelge 9.2'de bağıl hata

UT	RAÖ	NK	EK1	EK2
0200	0.1367	0.1378	0.1378	0.1405
0600	0.0677	0.0717	0.0691	0.0691
1200	0.0608	0.0746	0.0418	0.0392
1800	0.1085	0.0875	0.0850	0.0838
2200	0.1302	0.1828	0.1292	0.1393

Çizelge 9.2: 16 Ekim 2004 günü çapraz doğrulama ile elde edilen bağıl hatalar, ϵ_{r_x} .

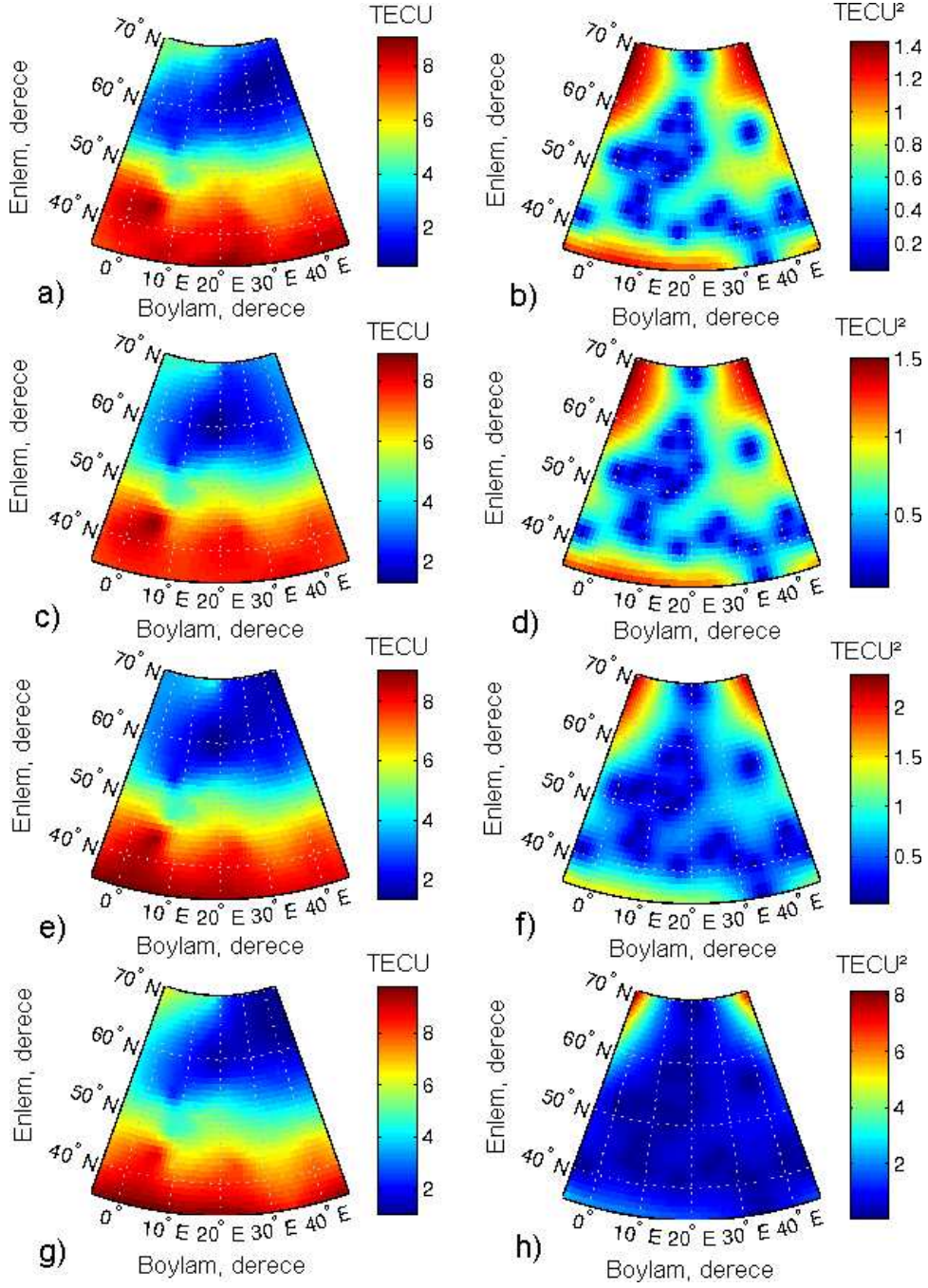
değerleri gece saatlerinde gündüz saatlerindeki değerlere göre daha fazladır. Çizelge

9.3'de ise çapraz doğrulama yöntemi ile elde edilen kestirim hataları TECU cinsinden verilmiştir. İyonosferdeki yönseme fonksiyonunun sabit bir fonksiyona benzediği

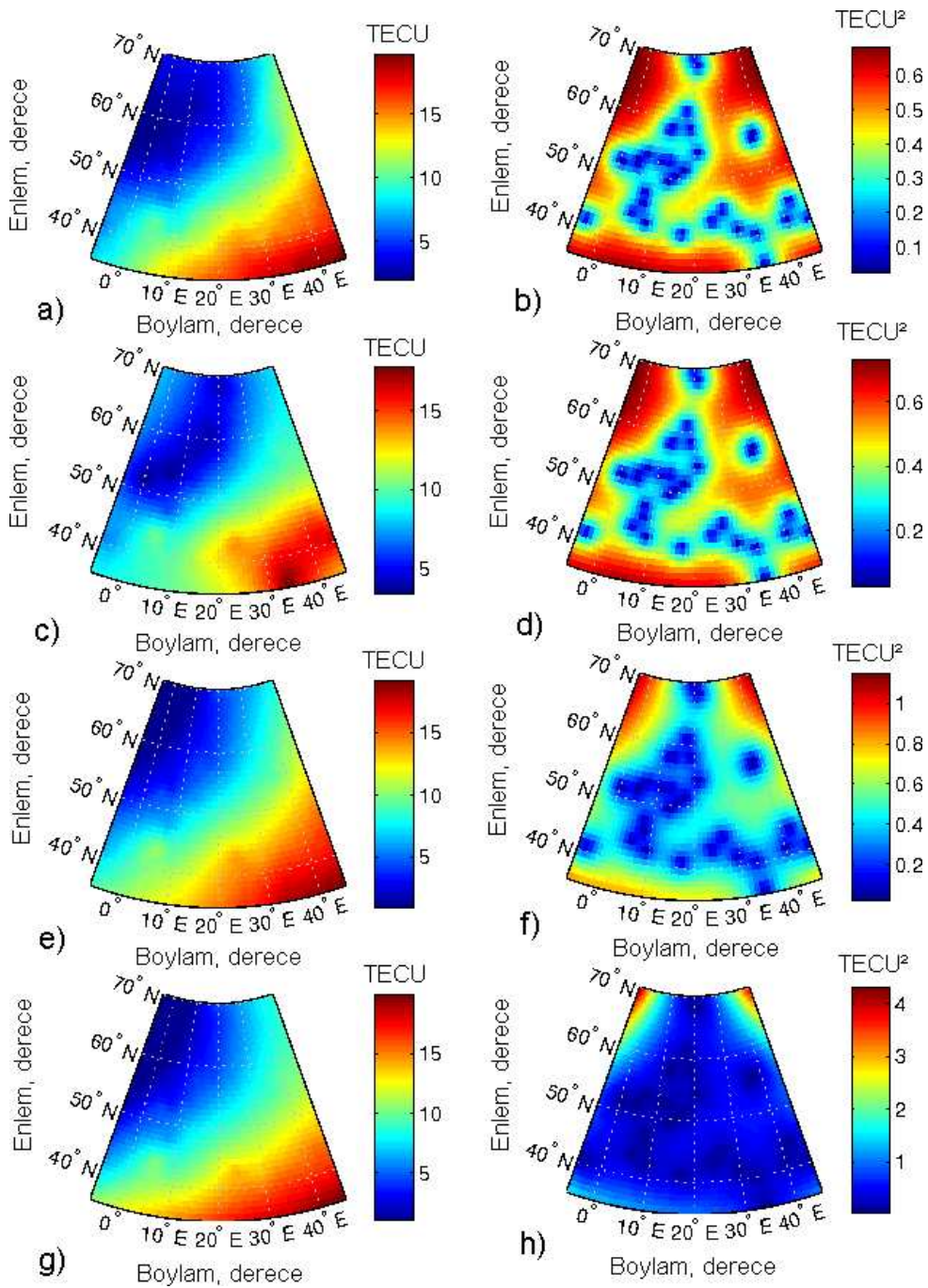
UT	RAÖ	NK	EK1	EK2
0200	0.5968	0.5630	0.5663	0.6106
0600	0.4927	0.5127	0.4912	0.4993
1200	0.8822	1.0788	0.6170	0.5815
1800	0.6414	0.5188	0.5036	0.5058
2200	0.5079	0.7221	0.4798	0.5538

Çizelge 9.3: 16 Ekim 2004 günü çapraz doğrulama ile elde edilen kestirim hataları, ϵ_x (TECU).

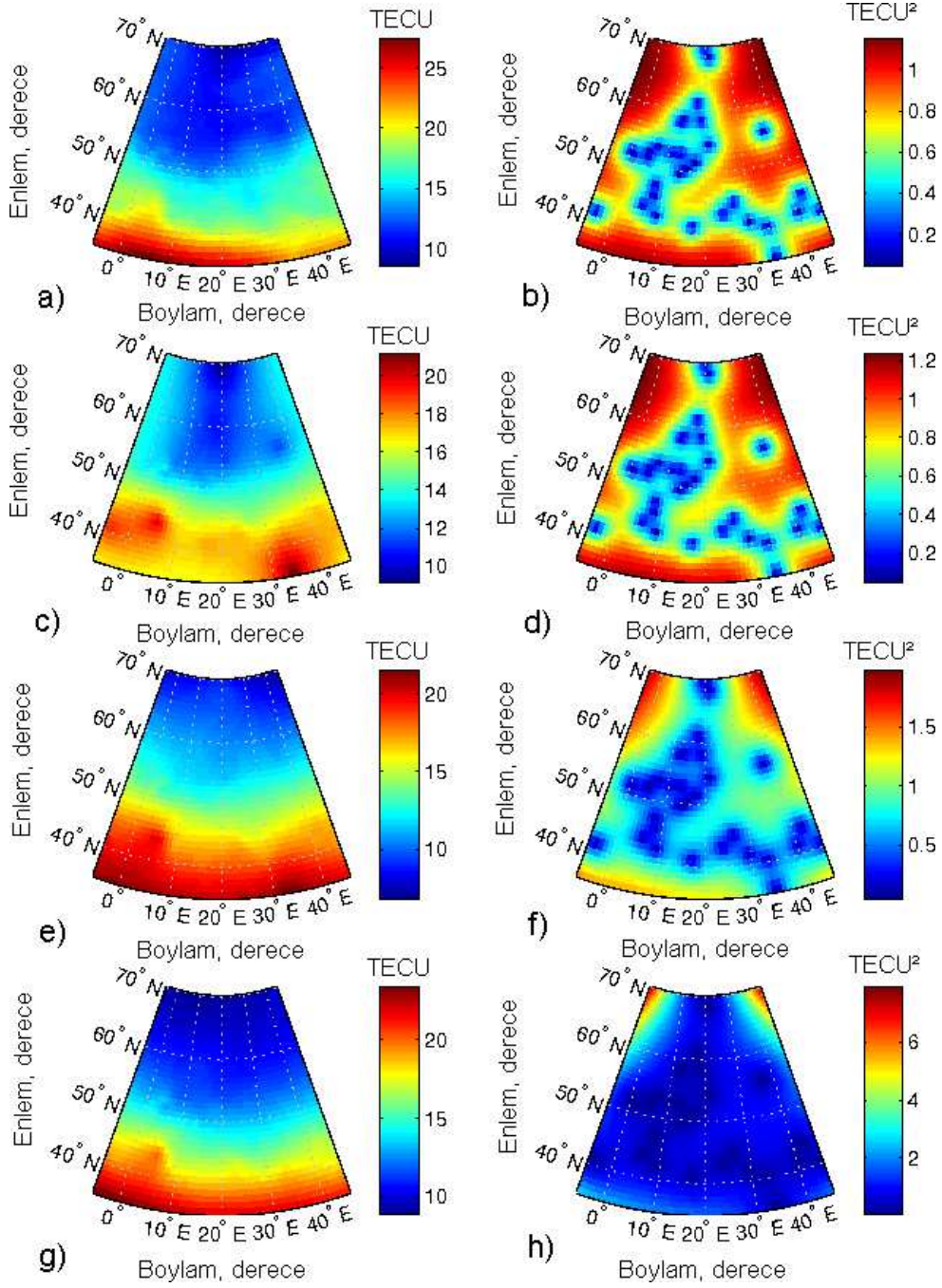
0200UT'de, EK2, yönseme fonksiyonunu ikinci dereceden bir polinom olarak varsaydığı için hem bağıl hemde kestirim hataları diğer yöntemere göre fazladır. 0600UT'de ise güneşin doğuşundan dolayı bir yönseme oluşacağı için NK yöntemi fazla bağıl ve kestirim hatası vermektedir. 1200UT ve 1800UT'de de güneydeki bölgelerin TEİ değerleri güneşten dolayı daha fazla artmakta ve bir yönseme oluşmaktadır, bu saatlerde Kriging yöntemleri arasından NK yöntemi en fazla bağıl ve kestirim hatalarını vermiştir. 2200UT'de güneşin etkisinin azalmasına rağmen çalışma bölgesinde güneydoğudan kuzeybatıya doğru azalan bir yönseme oluşmuştur, bu da NK yönteminin en fazla bağıl ve kestirim hatalarını vermesine neden olmuştur.



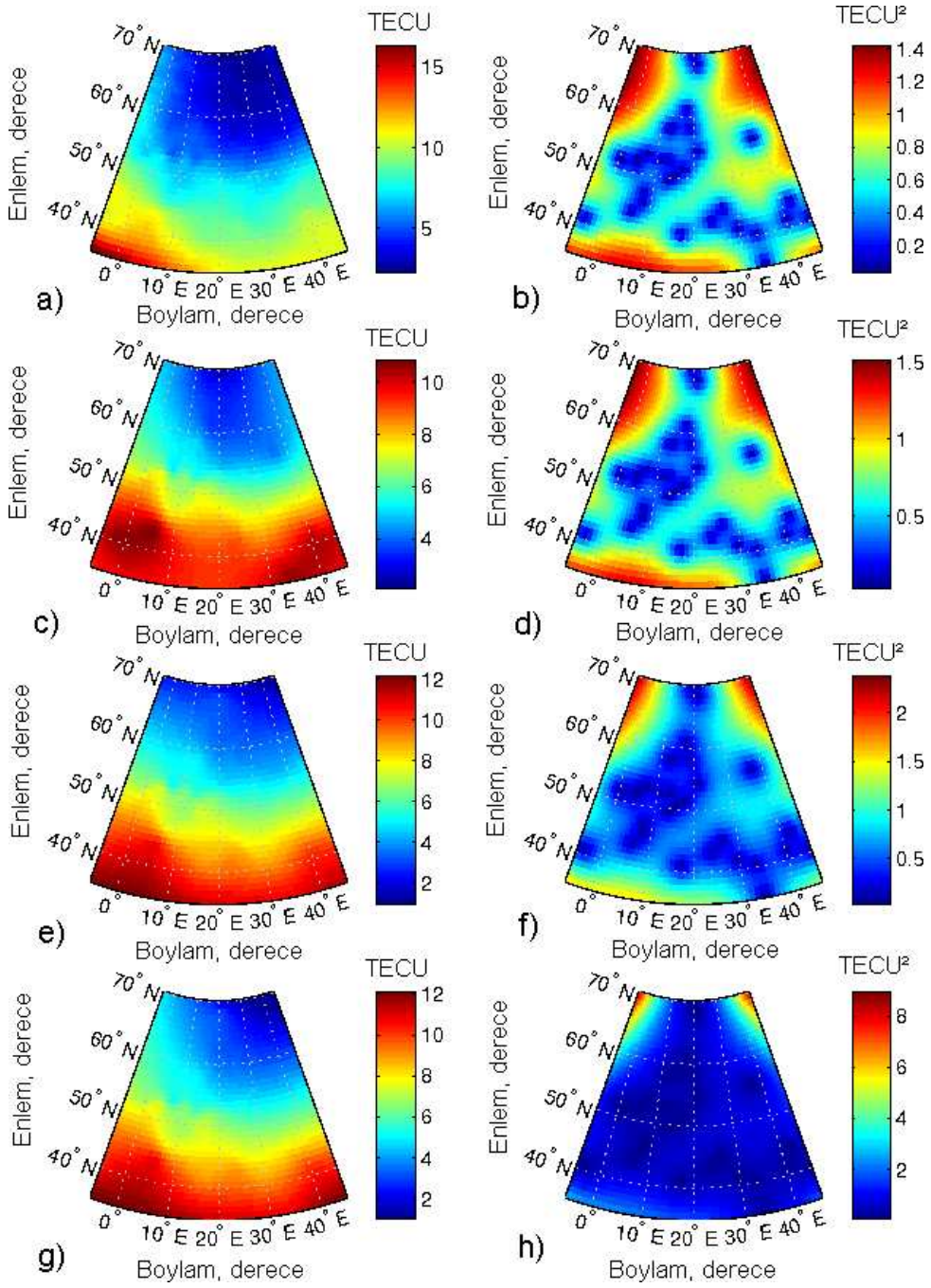
Şekil 9.2: 16 Ekim 2004 0200UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değışintilerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değışintileri.



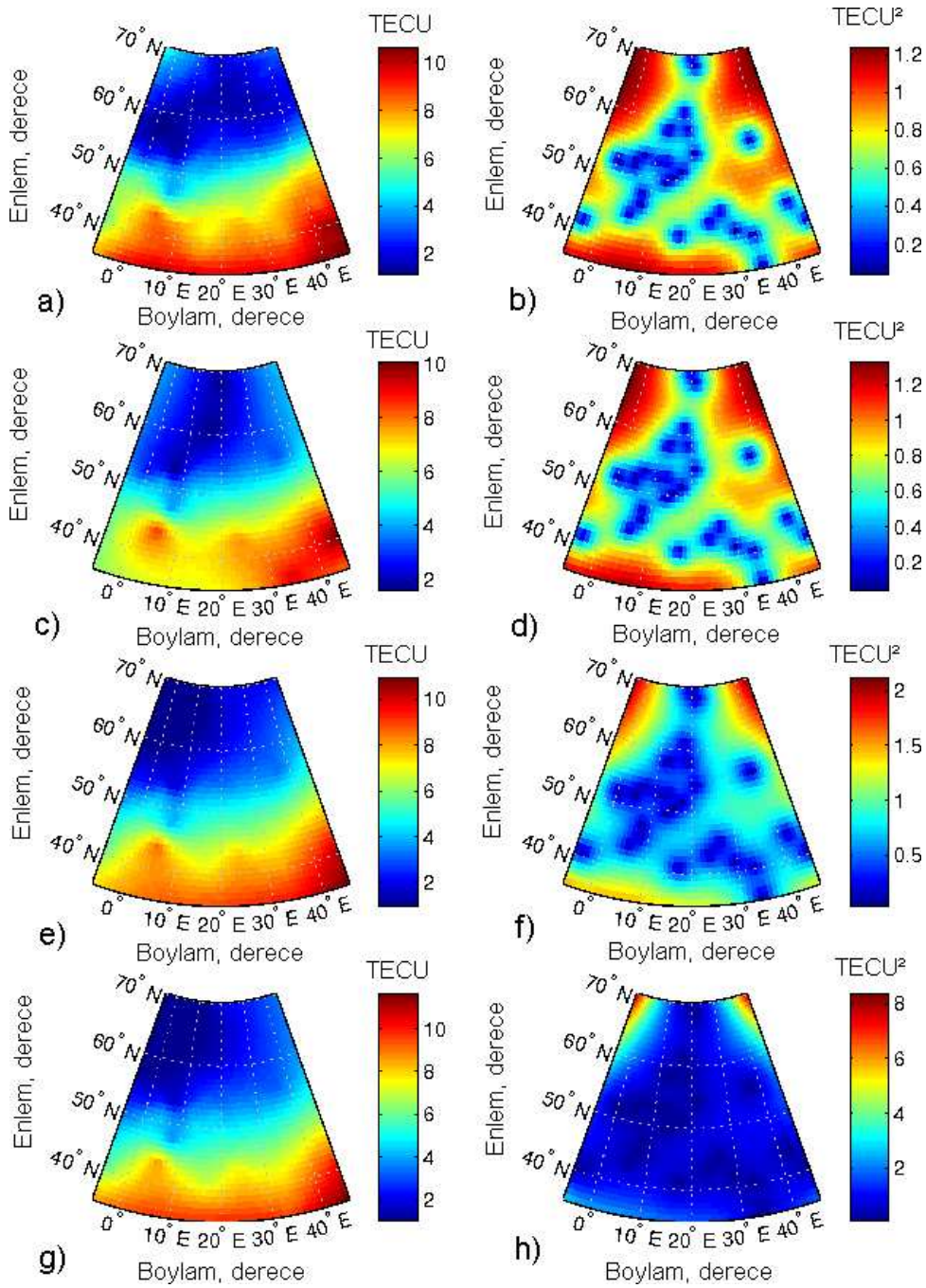
Şekil 9.3: 16 Ekim 2004 0600UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değışintilerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değışintileri.



Şekil 9.4: 16 Ekim 2004 1200UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değışintilerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değışintileri.



Şekil 9.5: 16 Ekim 2004 1800UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değışintilerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değışintileri.



Şekil 9.6: 16 Ekim 2004 2200UT RAÖ, NK, EK1 ve EK2 ile elde edilen kestirimlerin ve hata değışintilerinin haritaları. a), c), e), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen TEİ haritaları, b), d), f), g), sırasıyla, RAÖ, NK, EK1, EK2 ile elde edilen haritaların hata değışintileri.

10. SONUÇ

İyonosfer değişkenliğinin gözlenmesi haberleşme sistemlerinin başarımını etkilediği için önemlidir. TEİ iyonosferin gözlenmesinde kullanılacak önemli parametrelerden bir tanesidir. Bu çalışmada iyonosferdeki TEİ dağılımını modelleyebilecek uzay-zamansal rassal fonksiyon modeli anlatılmış, jeostatistikte sıkça kullanılan Kriging ve Rassal Alan Öncülü yöntemlerinin konumsal aradeğerleme başarımları sentetik ve gerçek TEİ verileri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Sentetik TEİ verileri iyonosferin orta enlem, sakin ve bozulmalı günlerindeki TEİ değerlerine uygun özelliklerde seçilmeye çalışılmıştır. Yöntemlerin uygulanmasında kullanılan örneklem sayısı ve düzenleri, benzetimi yapılan jeostatistiksel verilerin içerdiği yönseme fonksiyonu, değişinti ve yapısal uzaklık değerleri yöntemlerin başarımlarının karşılaştırılmasında kullanılan parametrelerdir. İyonosferin sakin ve bozulmalı günlerini modelleyebilecek rassal fonksiyonun gerçekleştirilmesinde yönseme fonksiyonları, değişinti ve yapısal uzaklık değerleri kullanılmıştır. Örnekleme örüntüleri, düzenli ve rassal dağılmış nokta kümelerinden oluşturulmuştur. Herbir örnekleme düzeni için belirli sayılarda alınan örneklerle ızgara noktalarında aradeğerlemeler yapılmış ve bu noktalardaki hata değerlerinden ortalama normalize hata değerleri 10 gerçekleştirme üzerinden hesaplanarak yöntemlerin başarımlarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Aradeğerleme benzetimlerinde genel olarak değişinti arttıkça ve konumsal ilintiyi ifade eden yapısal uzaklık azaldıkça sentetik yüzeyin değişkenliğinin artmasından dolayı hata değerleri artmaktadır. Düzenli örnekleme türlerinde değişkenliğin en iyi ve en kötü durumları arasında 10 kata yakın bir fark varken, rassal örnekleme türlerinde bu fark daha az olmaktadır. Sabit $\mu_1(\mathbf{x})$ ve değişkenliği fazla olan $\mu_6(\mathbf{x})$ yönseme fonksiyonlarında Kriging yöntemlerinden NK diğer Kriging yöntemlerine göre daha az hata değerleri vermektedir. Diğer yönseme fonksiyonlarında ise yönseme fonksiyonunu doğru bir şekilde modelleyen yöntemler daha az hata değerleri vermektedir. Farklı yönseme fonksiyonları varsayılarak yapılan aradeğerleme benzetimlerinde düzenli örnekleme türleri ile yöntemler birbirine yakın hata değerleri verirken rassal örnekleme türleri ile hata değerleri artmakta ve doğru yönseme fonksiyonu seçimi önem kazanmaktadır.

YKS istasyonlarının yeryüzü üzerindeki dağılımları daha çok Poisson kümeli dağılıma benzemektedir. Bu yüzden bu dağılım ve daha az örnek sayısı ile yöntemlerin başarımları daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. EK1 ve EK2'nin bazı durumlarda diğer

yöntemlere göre çok daha fazla normalize hata verdiği, örnek sayısı arttıkça bu yüksek hatanın makul seviyelere indiği gözlenmiştir. Az sayıda kümeli örnekler ile yapılan aradeğerlemelerde bazı gerçeklemeler için EK1 ve EK2 yönseme fonksiyonunu farklı şekilde modelledikleri için çok yüksek hata değerleri verebilmektedirler. NK ise aynı örnekleme düzenleri için daha az hata değerleri vermektedir. Yönseme fonksiyonunu hesaplariken meydana gelebilecek hatalardan daha az etkilendiği için NK kümeli dağılmış az sayıda örnek ile yapılan aradeğerlemeler için daha gürbüz bir yöntemdir. Örnek sayısı arttıkça RAÖ'ne en yakın hata değeri veren yöntem doğru yönseme fonksiyonu varsayan yöntem olmaktadır.

GIM haritalarından ve YKS gözlemlerinden elde edilen D-TEİ verileri kullanılarak TEİ değerlerinin yönseme ve semivariogram fonksiyonları kestirilmiştir. Yönseme fonksiyonunun kestiriminde aylık ortanca alma yöntemi kullanılmış ve bu yönseme değerlerinin TEİ değerlerinden çıkartılması ile bulunan kalıntılar üzerinden deneysel semivariogram fonksiyonları kestirilmiştir. Deneysel semivariogram fonksiyonları incelendiğinde 3000 km'lik bir uzaklıktan sonra TEİ değerleri arasındaki konumsal bağımlılığın çok azaldığı gözlenmiştir. Güneşin zenit açısının etkisinin giderildiği verilerle yapılan yönseme ve semivariogram kestirimlerinde de 3000 km'lik uzaklıktan sonra TEİ değerlerinin ilintinin azaldığı gözlenmiştir. Buradan gerçek TEİ değerleri ile yapılacak olan aradeğerlemelerin bu uzaklığı içerecek bir alanda yapılmasının, birbiri ile ilintili değerler kullanılacağı için anlamlı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Avrupa kıtasını kapsayan bir bölge üzerinde, 16 Ekim 2004 günü için 39 YKS istasyonundan elde edilen D-TEİ verileri ile, RAÖ, NK, EK1 ve EK2 yöntemleri kullanılarak aradeğerlemeler yapılmıştır. Sentetik verilerle yapılan aradeğerleme benzetimlerinden elde edilen sonuçlara uygun olarak, iyonosferde belli bir yönsemenin gözlendiği zamanlarda sabit yönseme fonksiyonu varsayan NK yöntemi fazla hata değeri ve kestirim hatası değişikliği vermektedir. İyonosferin gece saatlerinde ise yönseme gözlenmediği için TEİ verilerinde yönseme fonksiyonu olduğunu varsayan aradeğerleme yöntemleri, EK1 ve EK2, daha fazla hata değerleri vermektedir. Örneğin saat 0200UT iken NK daha az çapraz doğrulama bağıl ve kestirim hataları verirken, EK1 ve EK2 daha fazla hata değerleri vermektedir. İncelenen bölgede güneşin etkisi ile TEİ değerlerinde bir yönsemenin gözlendiği 0600UT gibi saatlerde ise EK1 ve EK2 yöntemleri yüzeyde bir yönseme fonksiyonu varsaydıkları için daha az hata değerleri

vermektedir.

Bu çalışmada YKS istasyonlarının üzerinde elde edilen D-TEİ verileri kullanılarak TEİ haritaları elde edilmiş ve sadece konumda aradeğerleme yapılmıştır. İlerideki çalışmalarda, iyonosfer delme noktalarında elde edilen STEC değerleri kullanılarak TEİ haritaları oluşturulacaktır. Uzay-zamansal TEİ aradeğerleme ve öngörülere uzayda Kriging, zamanda da Kalman Süzgeci kullanan bir algoritma ile yapılabilir. İyonosferin değişik durumlarında elde edilen semivariogram fonksiyonları incelenerek normalize semivariogram eğrileri oluşturulmaya çalışılacaktır. İyonosferin yapısına uygun uzay-zamansal yönseme ve semivariogram fonksiyonları IRI, GIM, veya YKS ile elde edilen TEİ değerlerinden elde edilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Altınay, O., 1996, İyonosfersel Kritik Sıklık Sürecinin Doğrusal Olmayan Karakteri, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] Arıkan, F., Erol, C. B., Arıkan, O., 2003, Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12), 1469-1480.
- [3] Arıkan, F., Erol, C. B., Arıkan, O., 2004, Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period, *Radio Science*, 39, RS6012.
- [4] Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C. B., 2007, Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model, *Advances in Space Research*, doi:10.1016/j.asr.2007.01.082, 39, 867-874.
- [5] Arıkan, O., Arıkan, F., Erol, C. B., 2007, 3-D Computerized Ionospheric Tomography with Random Field Priors, *Mathematical Methods in Engineering*, K. Tas, J.A. Tenreiro Machado and D. Baleanu (Eds.), Springer.
- [6] Bilitza, D., 1990, International Reference Ionosphere 2000, *Radio Science*, 36, 261-275.
- [7] Blanch, J. (2002), An Ionosphere Estimation Algorithm for WAAS Based on Kriging, In *Proceedings of ION GPS 2002*, Oregon Convention Center, Portland, OR, 24-27 September.
- [8] Chilès, J. P., Delfiner, P., 1999, *Geostatistics: modelling spatial uncertainty*, John Wiley & Sons, 695p.
- [9] Cressie, N. A. C., 1993, *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, New York, 900p.

- [10] Edwards, W. R., Rush and D. Miller, C. M., 1975, Studies on the development of an automated objective ionospheric mapping technique, Report AFCRL-TR-75-0124, Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford Mass. 01730, USA.
- [11] Gulyaeva, T. L., 2007, Proxy for the ionospheric peak plasma density reduced by the solar zenith angle. *Earth, Planets and Space*, (kabul edilmiş).
- [12] Gürün, M., Akdoğan, K. E., Yılmaz, A., 2007a, Regional Ionosphere Mapping By Using Neural Networks, Proceedings of International Conference RAST2008, 14-16 June, İstanbul.
- [13] Gürün, M., 2007b, Sınır Ağı Modelleme Yöntemleri Kullanarak TEİ Verileri ile Durağan ve Dinamik Bölgesel İyonosfer Haritalarının Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [14] Hardy, R. L., 1971, Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces, *J. Geophys. Res.*, 76, 1905-1915.
- [15] Haykin, S., *Neural Network-A Comprehensive Foundation*, 1999, Prentice Hall-Upper Saddle River, New Jersey.
- [16] İnal, C., Yiğit, C. Ö., 2003, Jeodezik uygulamalarda Kriging enterpolasyon yönteminin kullanılabilirliği, TUJK 2003 Yılı Bilimsel Toplantısı, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, 24-26 Eylül, Konya.
- [17] Jin, S., Wang, J., Zhang, H., Zhu, W., 2004, Real-time Monitoring and Prediction of Ionospheric Electron Content by Means of GPS, *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 28(3), 331-337.
- [18] Komjathy, A., 1997, Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System, Doktora Tezi, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Kanada.
- [19] Kumluca, A., 1997, Neural Network Modelling of an Ionospheric Process: Temporal and Spatial Forecasting of the Critical Frequency, Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [20] Kunitsyn, V. E., Tereshchenko, E. D., 2003, *Ionospheric Tomography*, Springer-Verlag, Berlin, 259p.

- [21] Kyriakidis, P. C., Journel, A., 1999, Geostatistical Space-Time Models, *Math. Geo.*, 31(6), 651-684.
- [22] Lazo, B., Calzadilla, A., Alazo K., Rodríguez M., González J.S., 2004, Regional Mapping of F2 peak plasma frequency by spherical harmonic expansion, *Advances in Space Research*, 33(6), 880-883.
- [23] Leandro, R. F., Santos M. C., 2004, Regional Computation of TEC using Neural Network Model, American Geophysical Union / Canadian Geophysical Union, Spring Meeting, Montreal, May 2004.
- [24] Liao, X., 2000, Carrier Phase Based Ionosphere Recovery Over A Regional Area GPS Network, Yüksek Lisans Tezi, University of Calgary, Calgary, Alberta, Kanada.
- [25] Luo, X., 1998, Spatiotemporal Stochastic Models for Earth Science and Engineering Applications, Doktora Tezi, McGill University, Montreal, Kanada, 177p.
- [26] Ma, C., 2005, Linear Combinations of Space-Time Covariance Functions and Variograms, *IEEE Transactions of Signal Processing*, 53(3), 857-864 .
- [27] Mautz, R., Ping, J., Heki, K., Schaffrin, B., Shum, C., Potts, L., 2005, Efficient spatial and temporal representations of global ionosphere maps over Japan using B-spline wavelets, *Journal of Geodesy*, 78, 660-667.
- [28] Moon, Y., 2004, Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National and Regional GPS Networks in Canada, Yüksek Lisans Tezi, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Kanada.
- [29] Nayir, H., 2007a, Yer Küresel Konumlama Sistemi Kullanılarak Toplam Elektron İçeriği Kestirimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [30] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O., Erol, C. B., 2007b, Total Electron Content Estimation with Reg-Est, *J. Geophys. Res.*, 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459.
- [31] Olea, R. A., 1999, *Geostatistics For Engineers and Earth Scientists*, Kluwer Academic Publishers, 303p.

- [32] Orús, R., Hernandez-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., 2005, Improvement of global ionospheric VTEC maps by using Kriging interpolation technique, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, 1598-1609.
- [33] Sayın, I., Arıkan, F., Arıkan, O., 2007a, Kriging ve Rassal Alan Öncülü ile Sentetik Toplam Elektron İçeriği Aradeğerlemesi, 15. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SİU 2007 Bildiriler CDsi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 11-13 Haziran.
- [34] Sayın, I., Arıkan, F., Arıkan, O., 2007b, Synthetic TEC Mapping with Ordinary and Universal Kriging, *Proceedings of RAST-2007, Recent Advances in Space Research*, Harbiye Military Museum, Istanbul, 14-16 June 2007.
- [35] Sayın, I., Yılmaz, A., Arıkan, F., Gürün, M., Arıkan, O., 2007c, Comparison of Kriging, Random Field Priors and Neural Network on Synthetic TEC Data, *Turkish National Geodetic Commission (TUJK) Scientific Meeting 2007*, METU, Ankara, 14-16 November 2007.
- [36] Sayın, I., Arıkan, F., Arıkan, O., 2007d, Regional Space-Time Interpolation of GPS-TEC with Kriging, *Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007*, Institute of Atmospheric Physics, Prague, Czech Rep., 10-14 July 2007.
- [37] Schaer, S., 1999, *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*, Doktora Tezi, Astronomical Institute, University of Bern, Bern, İsviçre.
- [38] Sodano, E. M., 1965, General non-iterative solution of the inverse and direct geodetic problems, *Bull. Geod.*, 75, 69-89.
- [39] Stanislawska, I., Juchnikowski, G., Cander, L. R., Ciraolo, L., Bradley, P. A., Zbyszynski, Z., Swiatek, A., 2002, The Kriging Method of TEC Instantaneous Mapping, *Adv. Space Res.*, 29, 945-948.
- [40] Tascione, T. F., 1988, *Introduction to the Space Environment*, Orbit Book Company, Florida, 116p.
- [41] Uğurlu, O., 2007a, IONOLAB Yöntemi ile Web Tabanlı Toplam Elektron İçeriği (TEİ) Hesaplanması ve Sunumu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [42] Ugurlu, O., Sezen, U., Alkar, A. Z., 2007b, Web Based Automated Total Electron Content Computation, Proceedings of International Conference RAST2008, 14-16 June, İstanbul.
- [43] Yfantis, E. A., Flatman, G. T., Behar, J. V., 1987, Efficiency of Kriging Estimation for Square, Triangular and Hexagonal Grids, *Math. Geo.*, 19(3), 183-205.
- [44] Vanmarcke, E., 1988, *Random Fields: Analysis and Synthesis*, The MIT Press, London.
- [45] Wackernagel, H., 1998, *Multivariate Geostatistics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- [46] Wielgosz, P., Brzezinska, D., Kashani, I., 2003, Regional Ionosphere mapping with Kriging and Multiquadric method, *Journal of Global Pos. Sys.*, 2(1), 48-55.
- [47] Zimmermann, D., Pavlik, C., Ruggles, A., Armstrong, M. P., 1999, An experimental comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting, *Math. Geo.*, 31(4), 375-390.

EKLER

EK A : Delme Noktalarının Koordinatları

Bölüm 3’de tek katmanlı iyonosfer modeli’ni (SLIM) uydu ve alıcı arasındaki çizginin kestiği noktalara delme noktaları denilmekte idi. Bu bölümde delme noktalarının koordinatlarının alıcı ve uydu koordinatlarından nasıl hesaplanacağı anlatılmaktadır. Şekil A.1’da (x_r, y_r, z_r) alıcı istasyonu koordinatlarını, (x_s, y_s, z_s) uydu koordinatlarını, (x_p, y_p, z_p) delme noktasının koordinatlarını, r_{eb} tek katmanlı iyonosfer modelinin yeryüzünden yüksekliğini, r_e dünyanın yarıçapını göstermektedir. Alıcı ve uydudan geçen çizgi denklemi aşağıda verilmektedir.

$$\alpha = \frac{x - x_r}{x_s - x_r} = \frac{y - y_r}{y_s - y_r} = \frac{z - z_r}{z_s - z_r} \quad (\text{A-1})$$

Delme noktası koordinatları alıcı ve uydu arasındaki çizgi üzerinde olacağı için (x_p, y_p, z_p) yukarıdaki denkleme konarak aşağıdaki denklemler elde edilir [29].

$$x_p = \alpha(x_s - x_r) + x_r \quad (\text{A-2})$$

$$y_p = \alpha(y_s - y_r) + y_r \quad (\text{A-3})$$

$$z_p = \alpha(z_s - z_r) + z_r \quad (\text{A-4})$$

Yukarıdaki eşitliklerde delme noktasının alıcı ve uydu arasında olabilmesi için α pozitif ve $0 \leq \alpha \leq 1$ olarak seçilmelidir. Delme noktalarının dünyanın merkezine olan uzaklığı Eşitlik A-5’de verilmektedir.

$$x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 = (r_e + r_{eb})^2 \quad (\text{A-5})$$

Eş. A-2, Eş. A-3 ve Eş. A-4, Eş. A-5’de yerlerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\alpha^2 d_{rs}^2 + 2\alpha\beta_{rs} + r_e^2 = (r_e + r_{eb})^2 \quad (\text{A-6})$$

Yukarıda,

$$d_{rs}^2 = [(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2] \quad (\text{A-7})$$

$$\beta_{rs}^2 = (x_r(x_s - x_r) + y_r(y_s - y_r) + z_r(z_s - z_r)) \quad (\text{A-8})$$

$$r_e^2 = x_r^2 + y_r^2 + z_r^2 \quad (\text{A-9})$$

olarak verilmektedir. Eşitlik A-6'dan aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

$$\alpha^2 d_{rs}^2 + 2\alpha\beta_{rs} + r_e^2 = r_e^2 + 2r_e r_{eb} + r_{eb}^2 \quad (\text{A-10})$$

$$\alpha^2 d_{rs}^2 + 2\alpha\beta_{rs} - (2r_e r_{eb} + r_{eb}^2) = 0 \quad (\text{A-11})$$

Buradan α çözülebilir [29].

$$\alpha_{1,2} = \frac{-\beta_{rs} \pm \sqrt{\beta_{rs}^2 + d_{rs}^2(2r_e r_{eb} + r_{eb}^2)}}{d_{rs}^2} \quad (\text{A-12})$$

$0 \leq \alpha \leq 1$ koşulunu sağlayan α_p seçilirse:

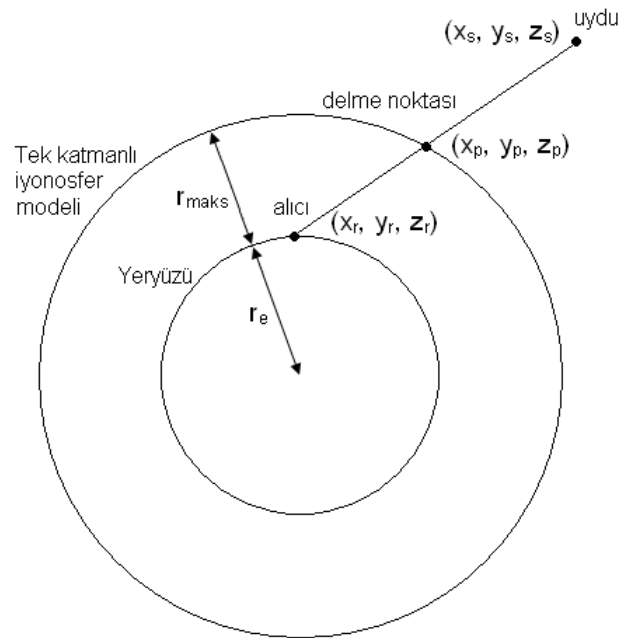
$$\alpha_p = \frac{\sqrt{\beta_{rs}^2 + d_{rs}^2(2r_e r_{eb} + r_{eb}^2)} - \beta_{rs}}{d_{rs}^2} \quad (\text{A-13})$$

Buradan delme noktasının koordinatları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$x_p = \alpha_p(x_s - x_r) + x_r \quad (\text{A-14})$$

$$y_p = \alpha_p(y_s - y_r) + y_r \quad (\text{A-15})$$

$$z_p = \alpha_p(z_s - z_r) + z_r \quad (\text{A-16})$$



Şekil A.1: Tek katmanlı iyonosfer modeli (SLIM) delme noktası, uydu ve alıcı koordinatları

EK B : Cholesky Ayrıştırma Yöntemi ile Sentetik Veri Benzetimi

Uzayda, $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$, N noktada $Z(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} = [\theta \ \phi]^T$, rassal fonksiyonunun gerçekleşmesi, $\mathbf{z} = [z(\mathbf{x}_1) \dots z(\mathbf{x}_N)]^T$, Cholesky ayrıştırma yöntemi ile elde edilebilir. Eşitlik 7.1'deki gibi, $Z(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonu, ortalaması sıfır, ikinci dereceden durağan bir $Y(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonu ve $E\{Z(\mathbf{x})\} = \mu(\mathbf{x})$ yönseme fonksiyonunun toplamı olarak düşünülebilir. Yönseme fonksiyonu, konuma bağlı deterministik bir fonksiyon olarak seçildiğinde $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$ noktalarındaki beklenti değerleri, $\mu(\mathbf{x})$ fonksiyonundan hesaplanabilir. $Y(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun N noktadaki rassal değişkenleri bir araya getirilerek aşağıdaki rassal değişken vektörü elde edilebilir.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} Y(\theta_1, \phi_1) \\ \vdots \\ Y(\theta_N, \phi_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ Y(\mathbf{x}_N) \end{bmatrix} \quad (\text{B-1})$$

\mathbf{y} rassal değişken vektörünün eşdeğişinti matrisi aşağıda verilmektedir.

$$\Sigma_Y = E\{(\mathbf{y} - \underline{\mu}_y)(\mathbf{y} - \underline{\mu}_y)^T\} \quad (\text{B-2})$$

$$= E\{\mathbf{y}\mathbf{y}^T\} \quad (\text{B-3})$$

Eşdeğişinti fonksiyonu $cov(y(\mathbf{x}_m), y(\mathbf{x}_n)) = cov_Y(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_n)$ olarak ifade edilirse, eşdeğişinti matrisi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Sigma_Y = \begin{bmatrix} cov_Y(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \dots & cov_Y(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ cov_Y(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_1) & \dots & cov_Y(\mathbf{x}_N, \mathbf{x}_N) \end{bmatrix} \quad (\text{B-4})$$

\mathbf{y} rassal değişken vektörü, $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{u}$ şeklinde yazılabilir. Burada $\mathbf{u} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ rassal değişken vektörü rassal sayı üretici algoritmalarından elde edilebilir. \mathbf{I} birim matristir. Eşdeğişinti matrisi aşağıda verilmektedir.

$$\Sigma_Y = E\{\mathbf{A}\mathbf{u}\mathbf{u}^T\mathbf{A}^T\} \quad (\text{B-5})$$

$$= \mathbf{A}E\{\mathbf{u}\mathbf{u}^T\}\mathbf{A}^T \quad (\text{B-6})$$

Eş. B-6'de $E\{\mathbf{u}\mathbf{u}^T\} = \mathbf{I}$ olduğu için eşdeğişinti matrisi aşağıdaki şeklini alır.

$$\Sigma_Y = \mathbf{A}\mathbf{A}^T \quad (\text{B-7})$$

\mathbf{A} matrisi Σ_Y eşdeğişinti matrisinden Cholesky ayrıştırma yöntemi ile bulunabilir. Buradan, $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$ noktalarındaki $Z(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun gerçekleşmesi aşağıdaki gibi elde edilebilir.

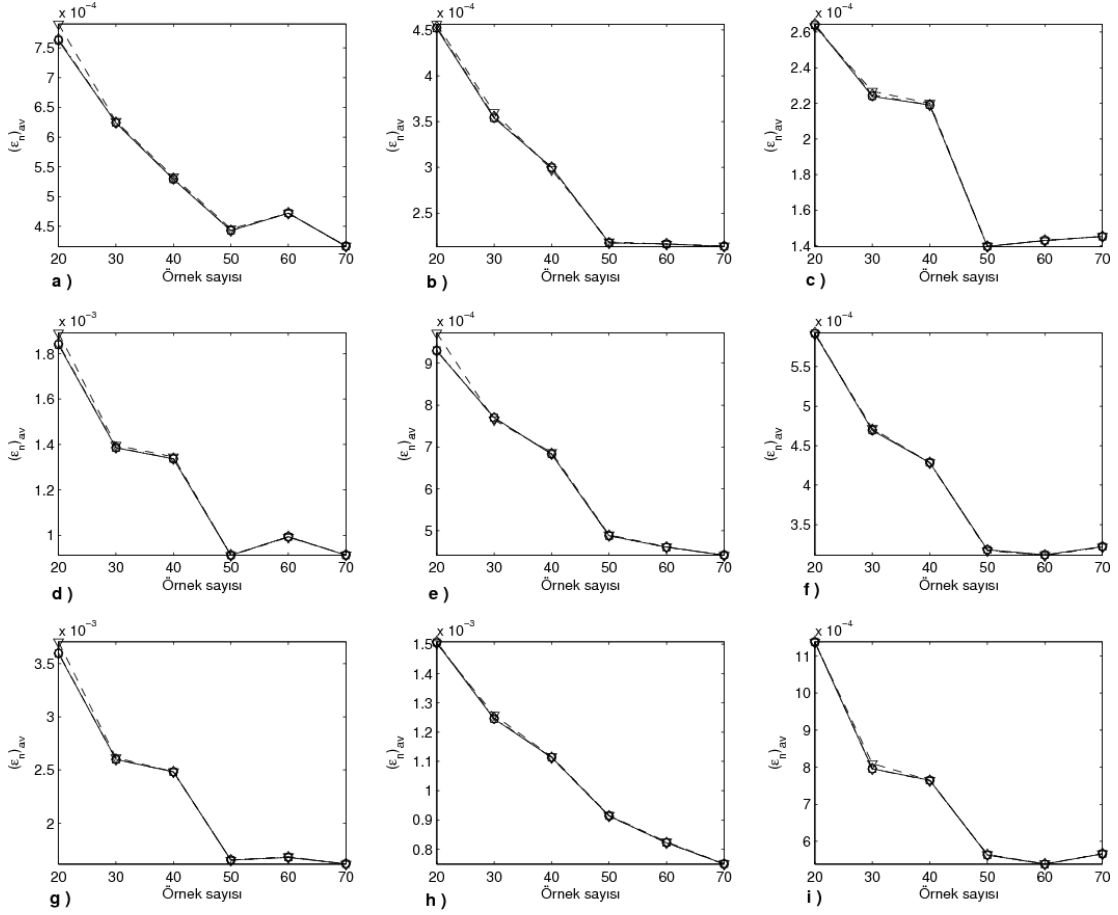
$$\mathbf{z} = \mathbf{y} + \underline{\mu} \quad (\text{B-8})$$

$$= \mathbf{A}\mathbf{u} + \underline{\mu} \quad (\text{B-9})$$

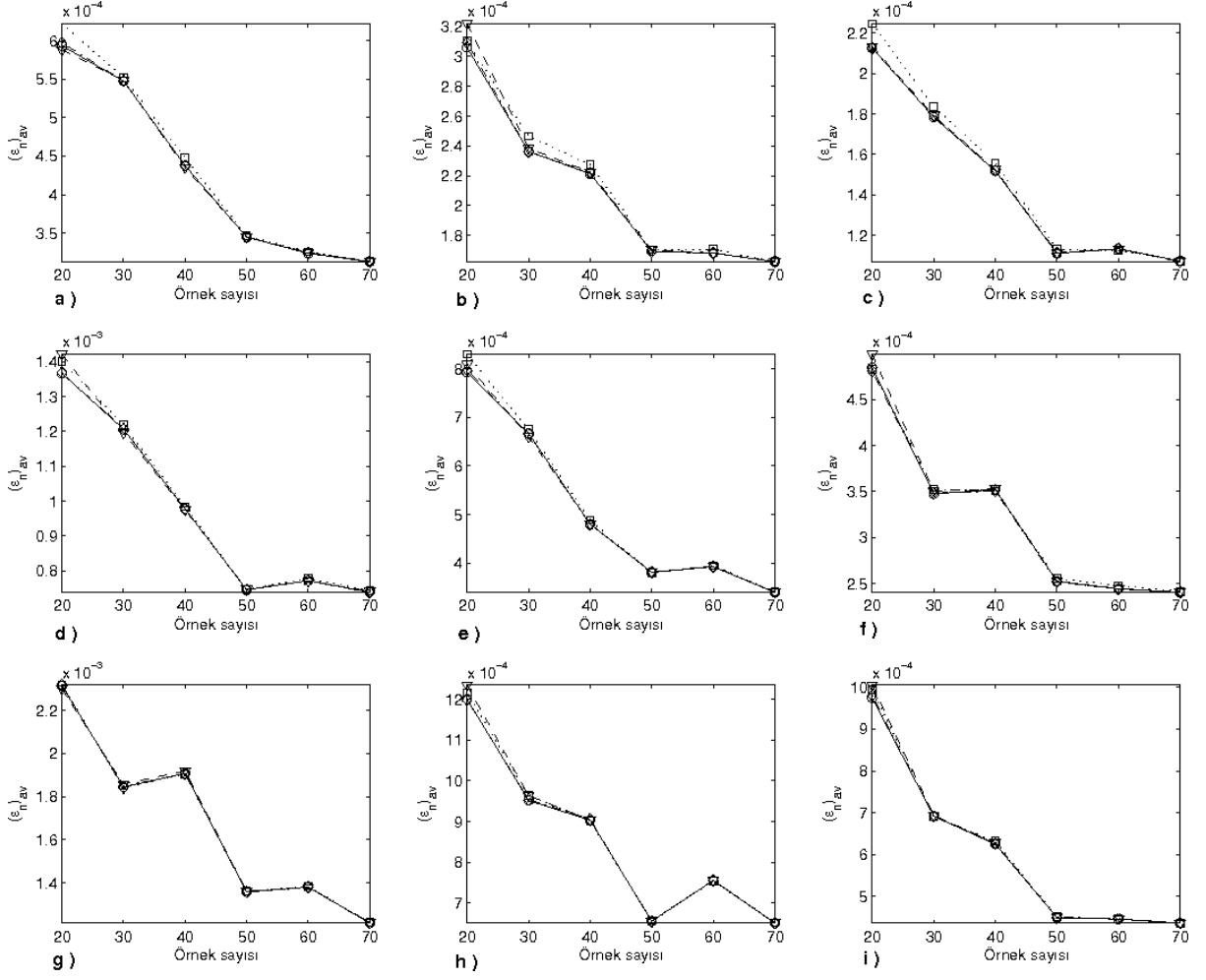
Yukarıdaki eşitlikte $\mathbf{y} = [y(\mathbf{x}_1) \dots y(\mathbf{x}_N)]^T$, $Y(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$ noktalarındaki gerçekleşmesi, $\underline{\mu} = [\mu(\mathbf{x}_1) \dots \mu(\mathbf{x}_N)]^T$ ise yönseme fonksiyonunun gerçekleşme noktalarındaki değerleridir.

EK C : Aradeğerleme Ortalama Normalize Hata Grafikleri

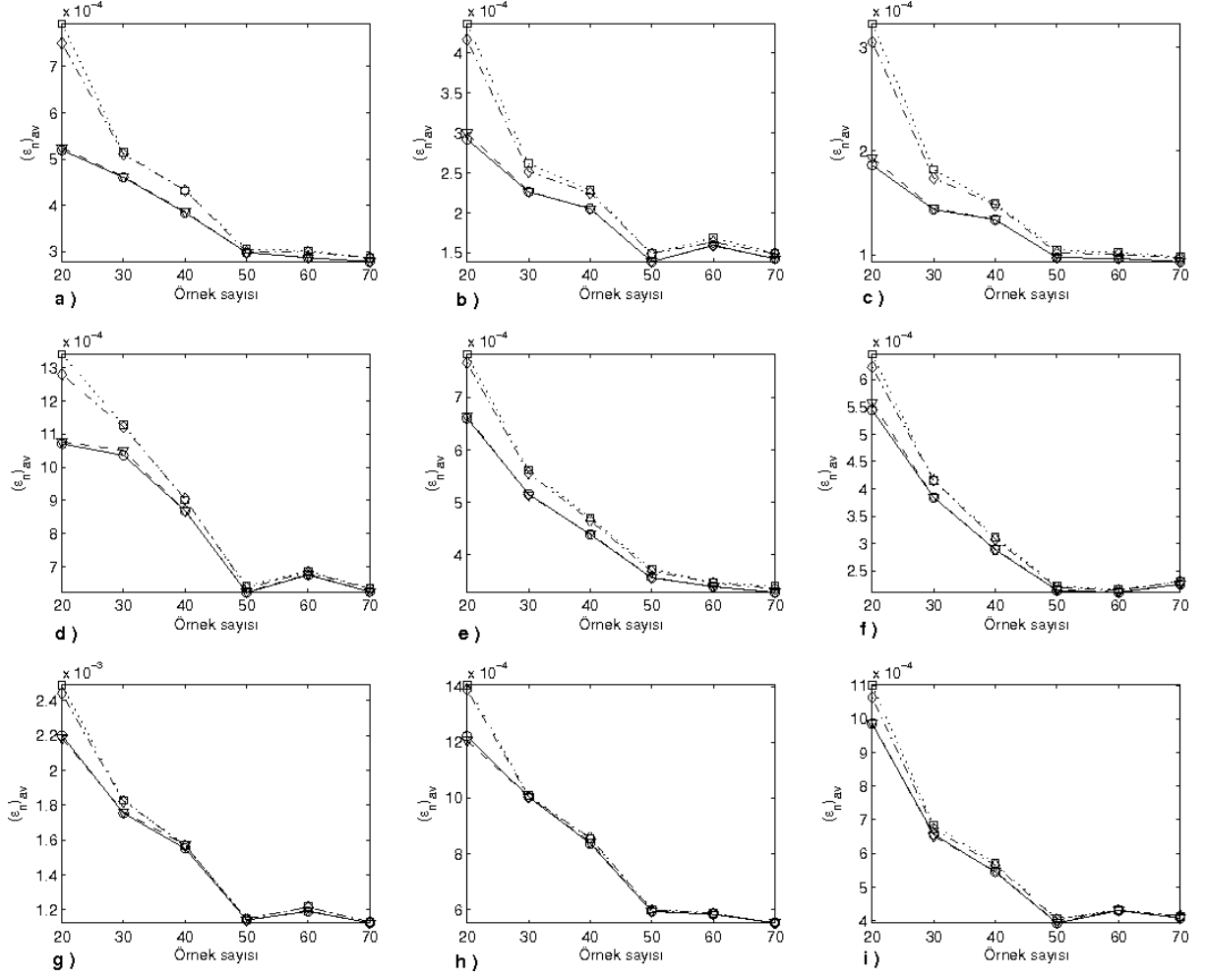
Yöntemlerin aradeğerleme başarımları örnekleme düzeni, örnek sayısı, yönseme fonksiyonu çeşidi, konumla ilintili değişkenin değışinti ve erim değeri için incelenmiştir. Grafikler örnek sayısına karşılık gelen Eş. 7.9'da verilen ortalama normalize hata değeri göstermektedir. Grafiklerde değışinti ve erimin a) ($\sigma^2 = 0,64, a = 5$), b) ($\sigma^2 = 0,64, a = 10$), c) ($\sigma^2 = 0,64, a = 15$), d) ($\sigma^2 = 1,44, a = 5$), e) ($\sigma^2 = 1,44, a = 10$), f) ($\sigma^2 = 1,44, a = 15$), g) ($\sigma^2 = 2,56, a = 5$), h) ($\sigma^2 = 2,56, a = 10$), i) ($\sigma^2 = 2,56, a = 15$) değeri; örnekleme düzenlerinden kare, üçgen, altıgen, birbiçimli, engelli ve kümeli olmak üzere 6 çeşit örnekleme düzeni; $N_a = 20, 30, 40, 50, 60, 70$ olmak üzere 6 örnekleme sayısı; sabit $\mu_1(\mathbf{x})$, doğrusal $\mu_2(\mathbf{x})$, ikinci dereceden polinom $\mu_3(\mathbf{x})$, güneyde ve merkezde bulunan Gauss fonksiyonları $\mu_4(\mathbf{x})$, $\mu_5(\mathbf{x})$ ve üssel-sinüsoidal $\mu_6(\mathbf{x})$ olmak üzere 6 yönseme fonksiyonu; RAÖ, NK, EK1 ve EK2 olmak üzere 4 aradeğerleme yöntemi ile toplam 7776 senaryo, $n_g = 10$ gerçekte için 77760 aradeğerleme hatası üzerinden incelenmektedir. Herbir örnekleme düzeni ve yönseme fonksiyonu çiftleri için toplam 36 şekil verilmektedir. Herbir şekilde rassal fonksiyonun değışinti ve erim değeri için toplam 9 grafik verilmektedir. Grafiklerde RAÖ hataları daire, NK hataları kare, EK1 hataları elmas, EK2 hata değeri üçgen biçiminde gösterilmektedir.



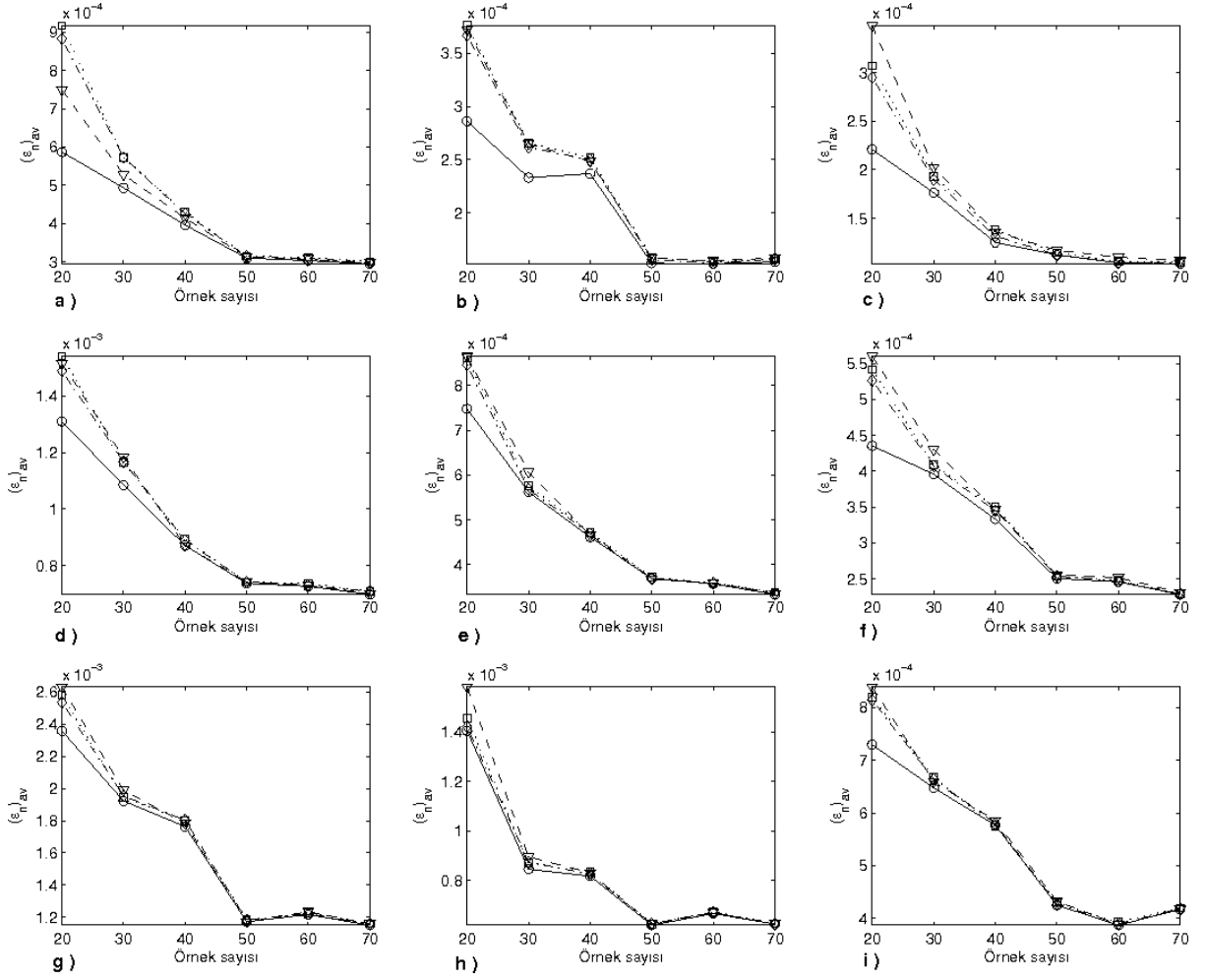
Şekil C.1: Kare örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



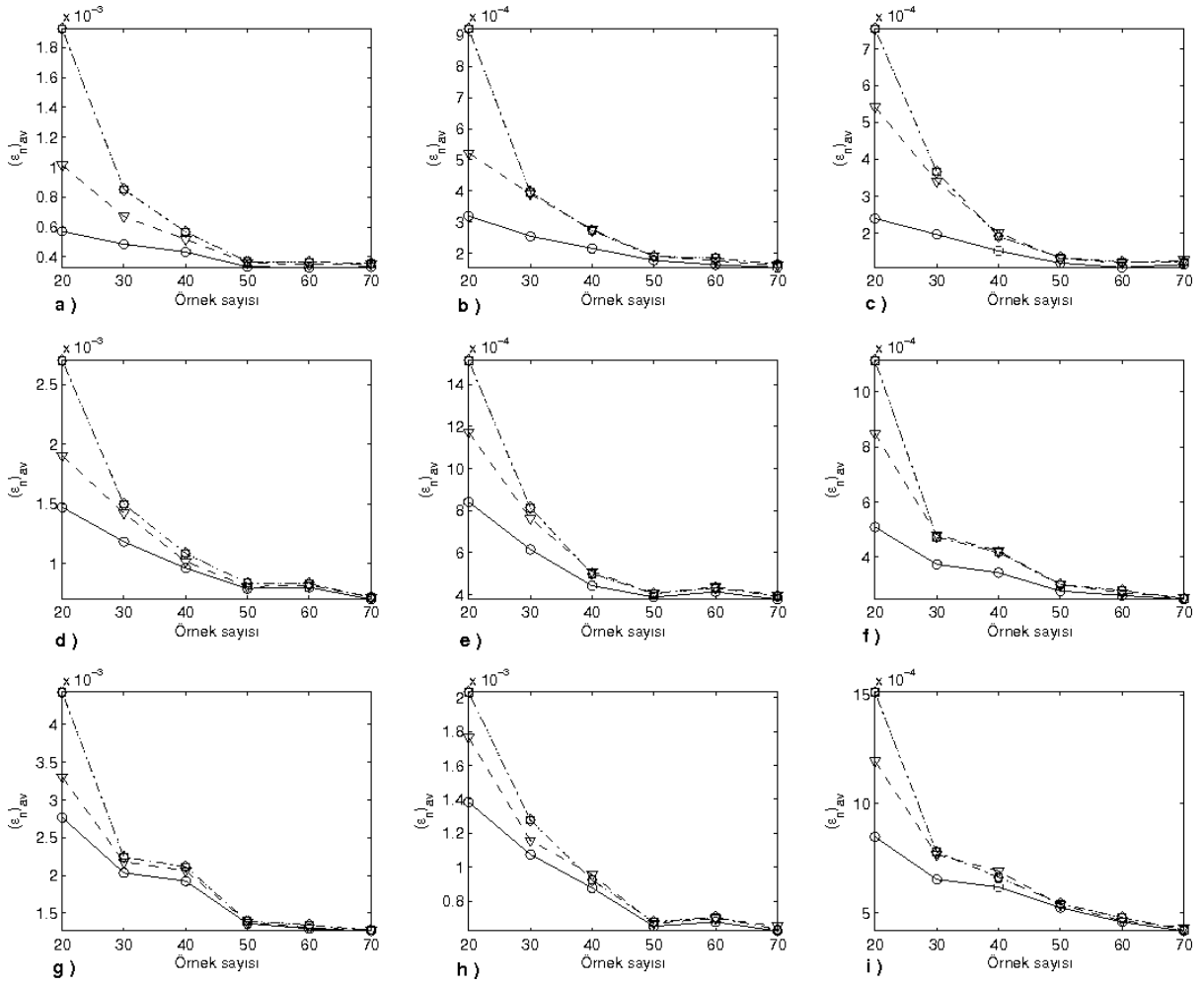
Şekil C.2: Kare örnekleme ve $\mu_2(x)$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



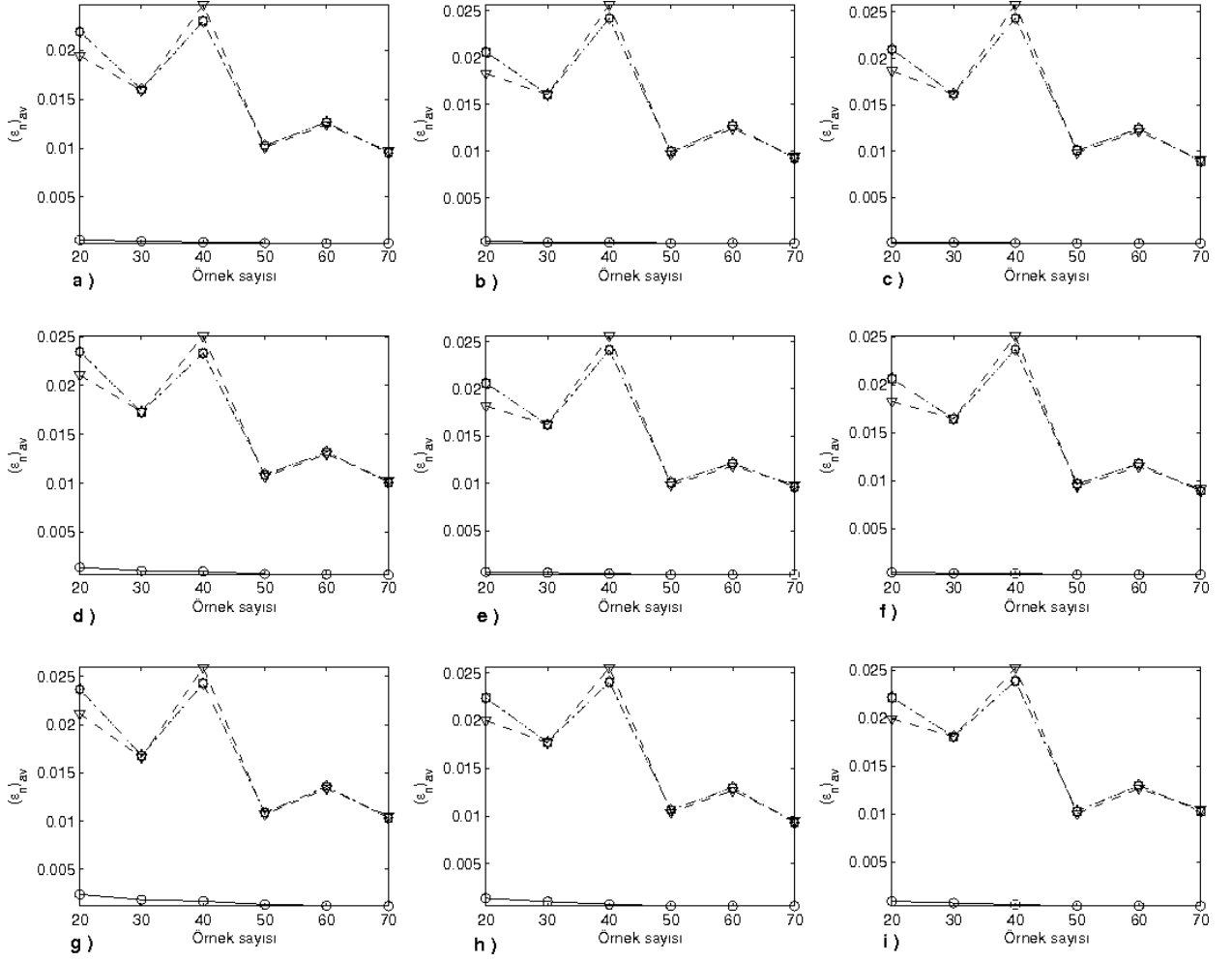
Şekil C.3: Kare örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



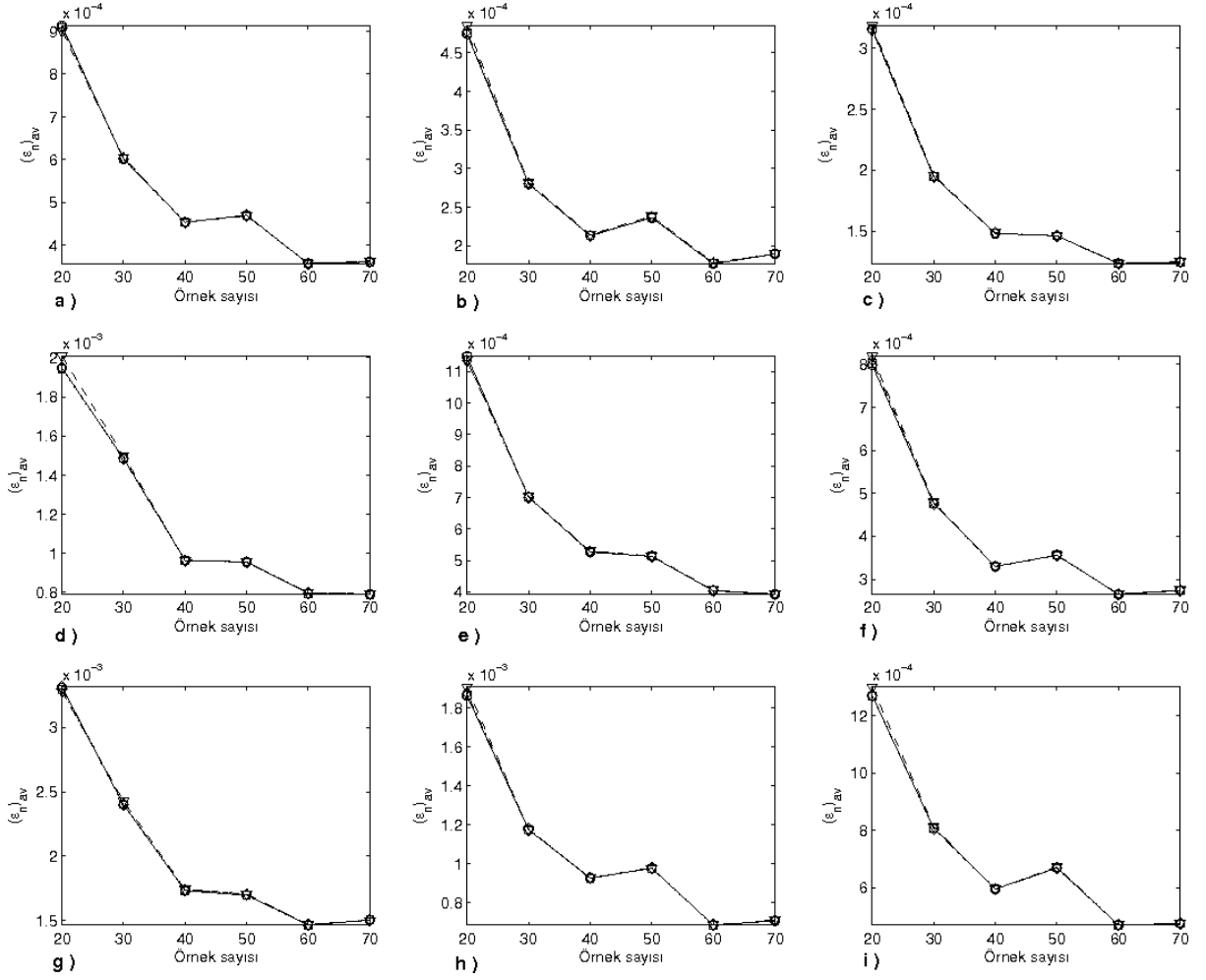
Şekil C.4: Kare örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



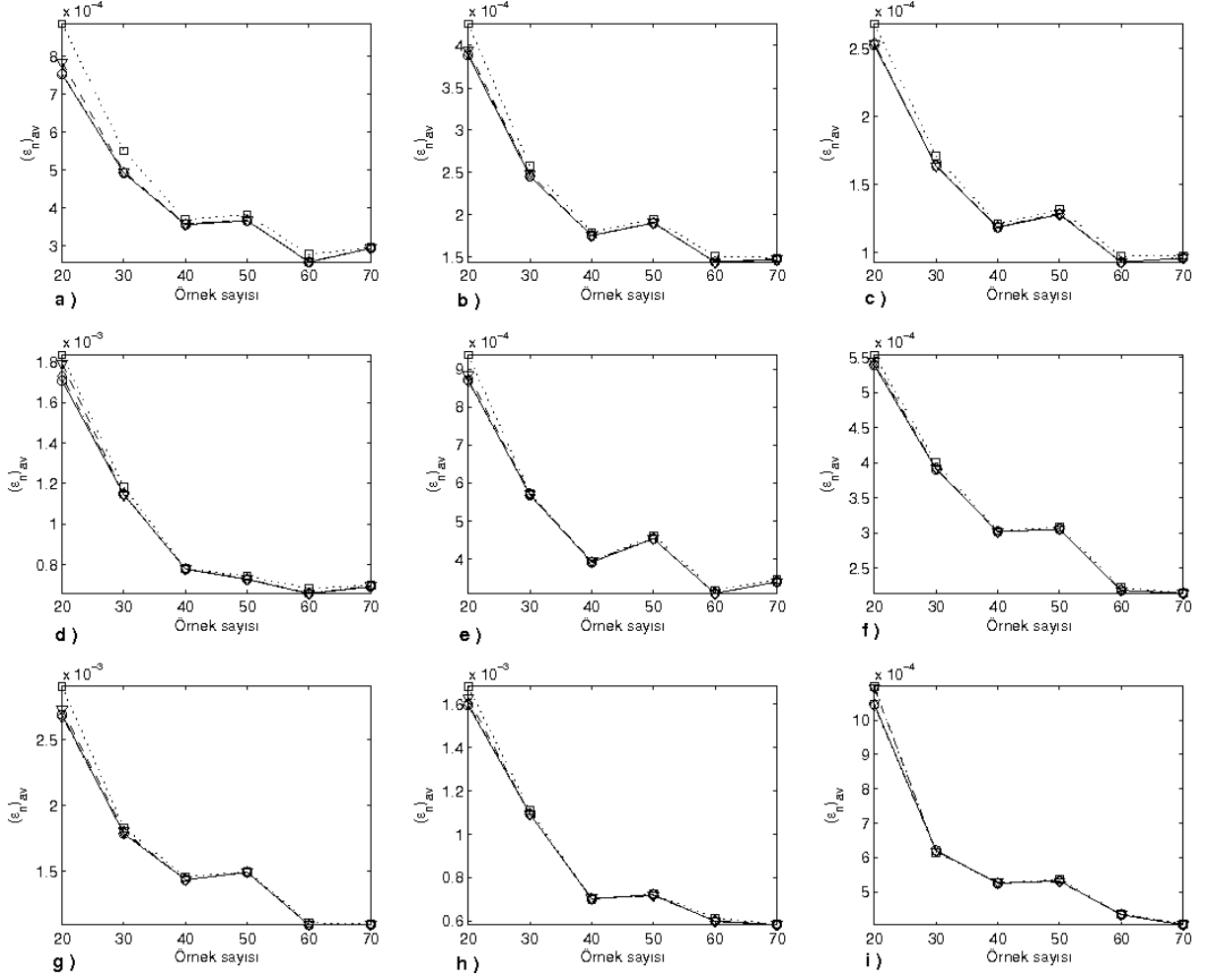
Şekil C.5: Kare örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



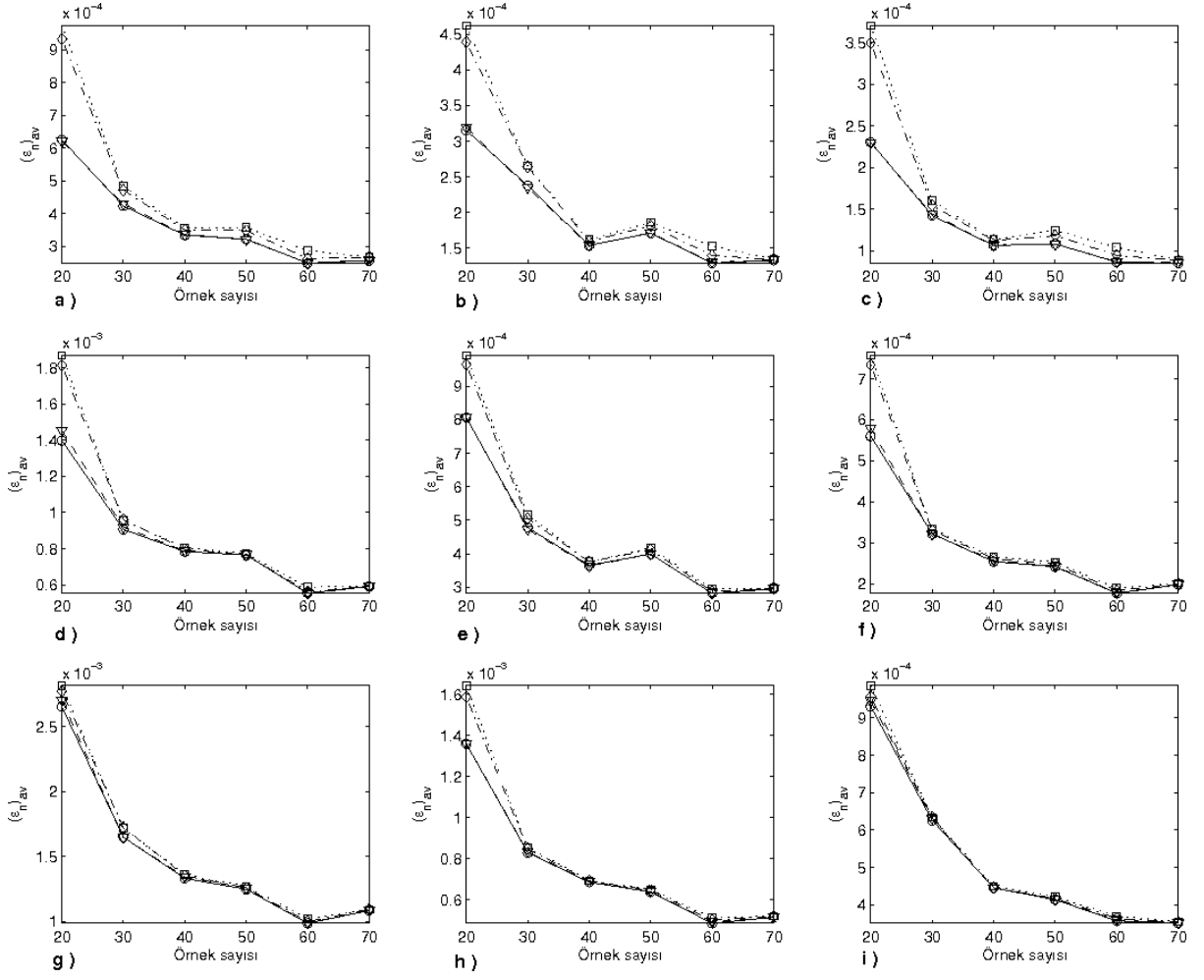
Şekil C.6: Kare örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



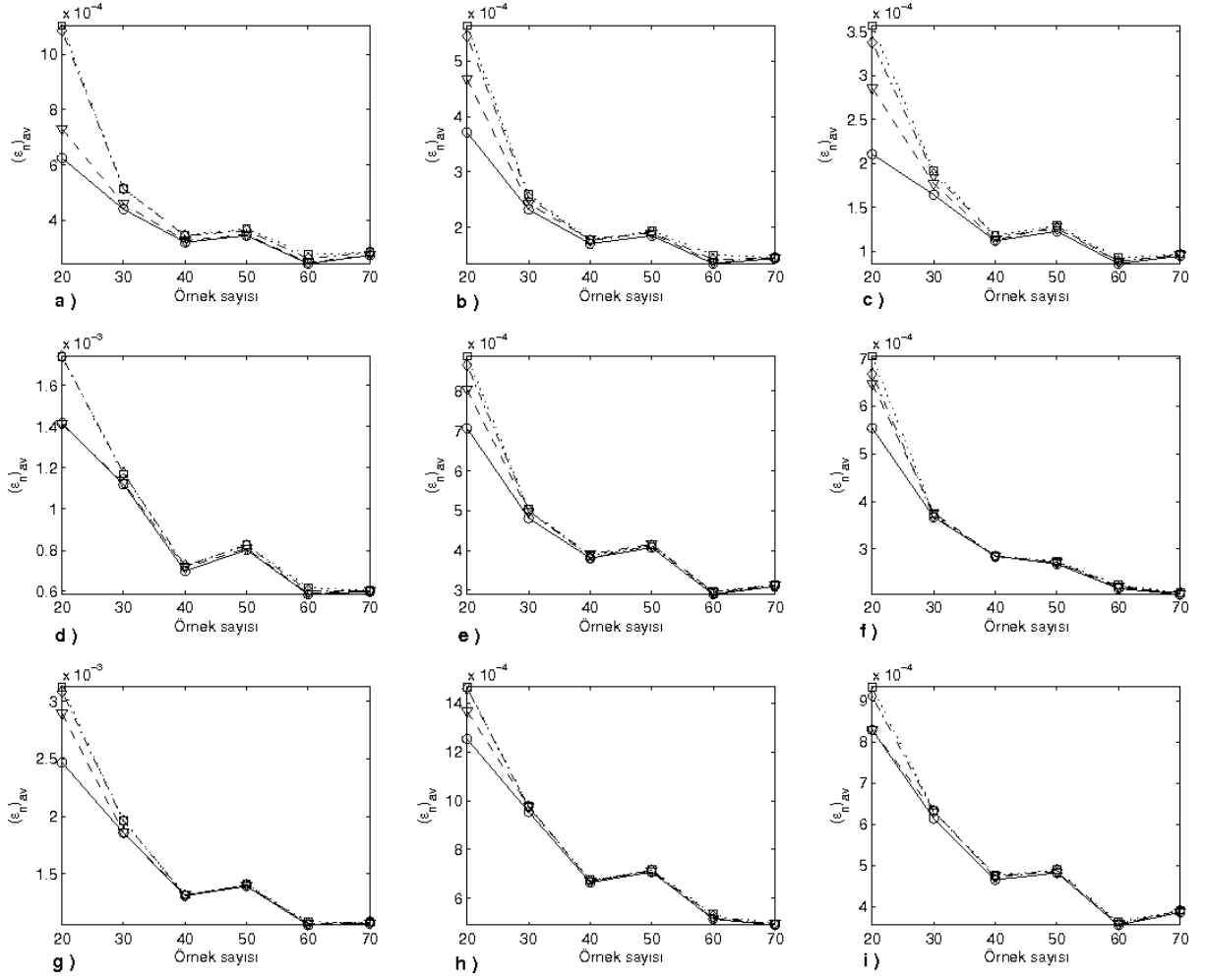
Şekil C.7: Üçgen örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



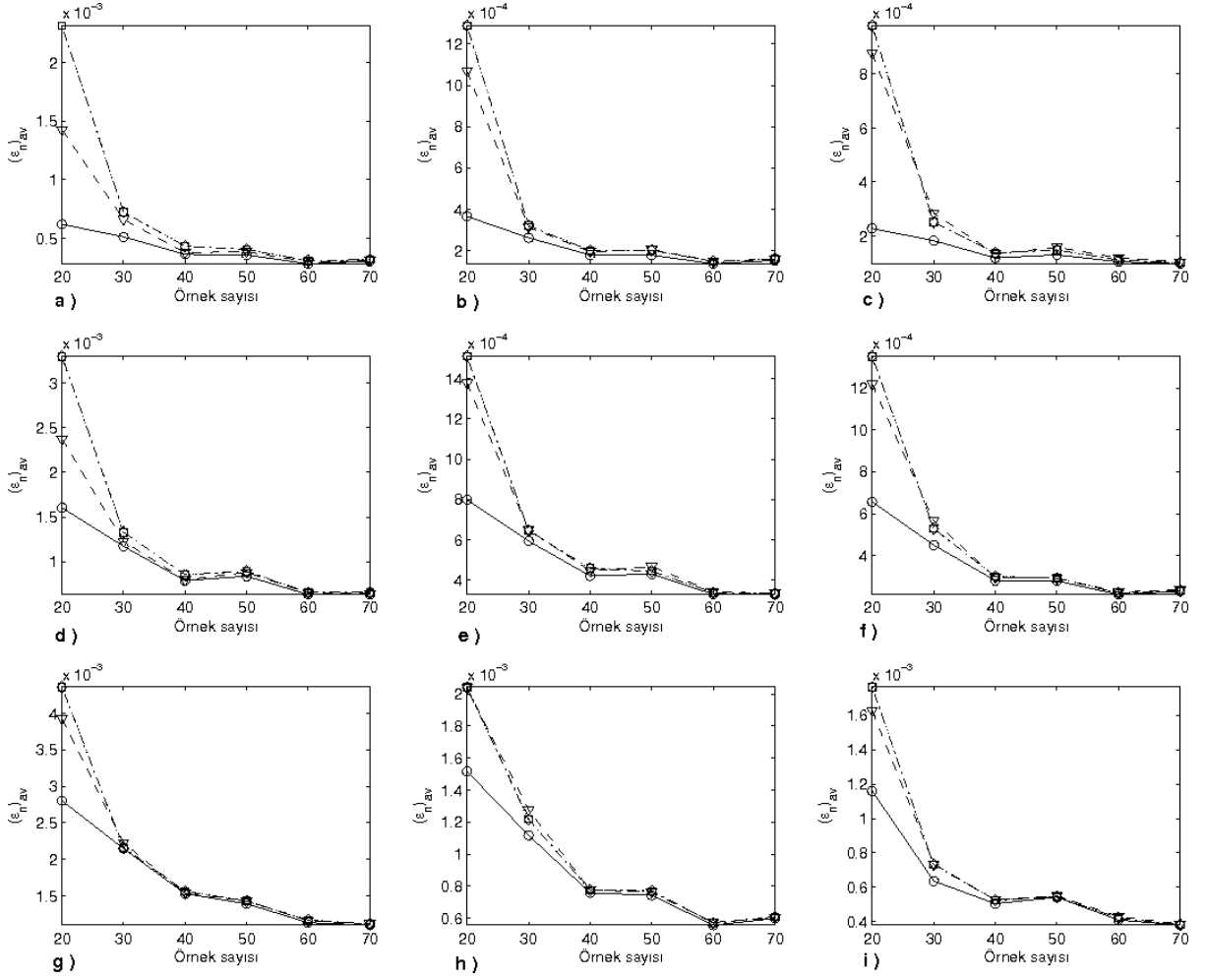
Şekil C.8: Üçgen örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



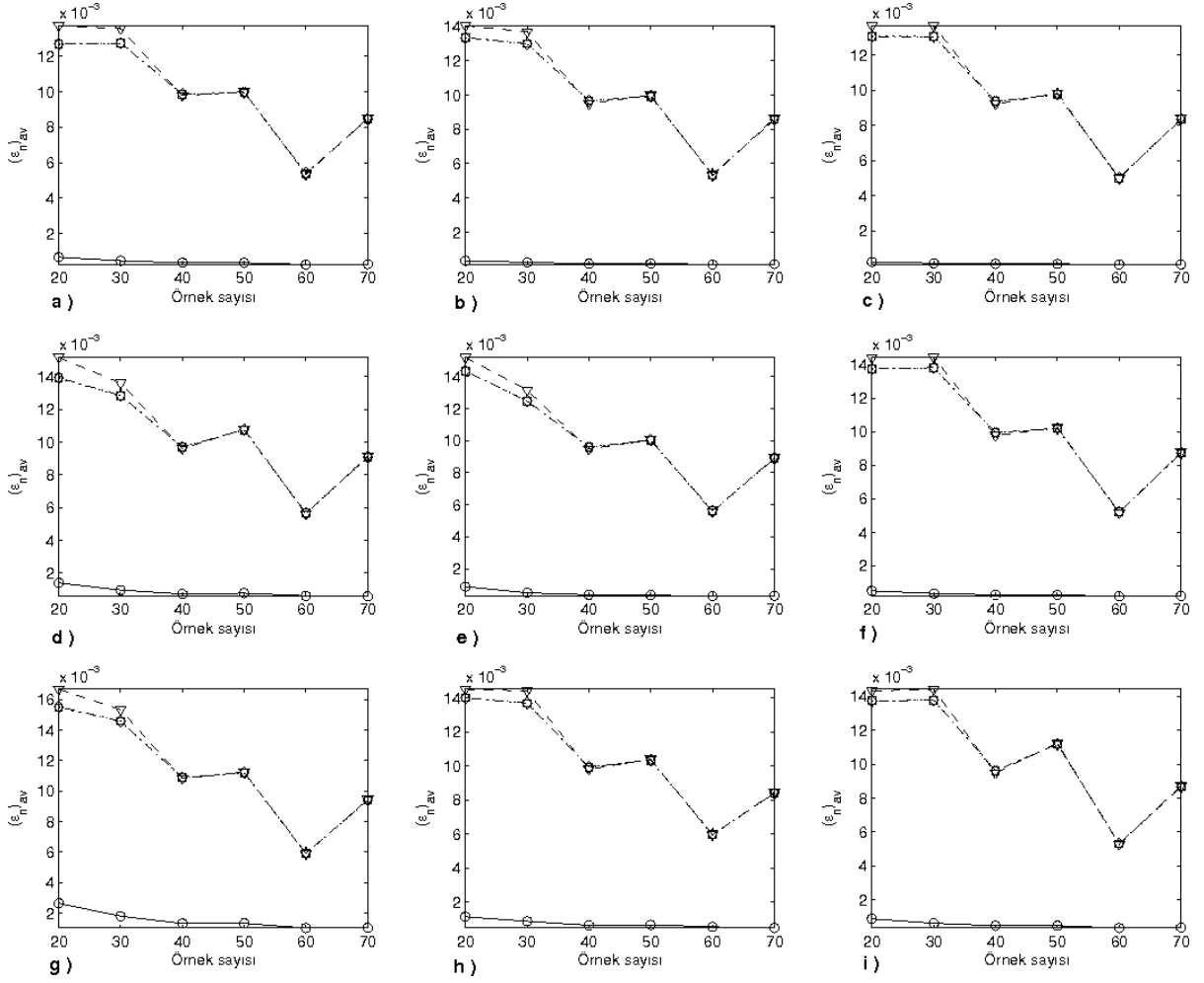
Şekil C.9: Üçgen örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



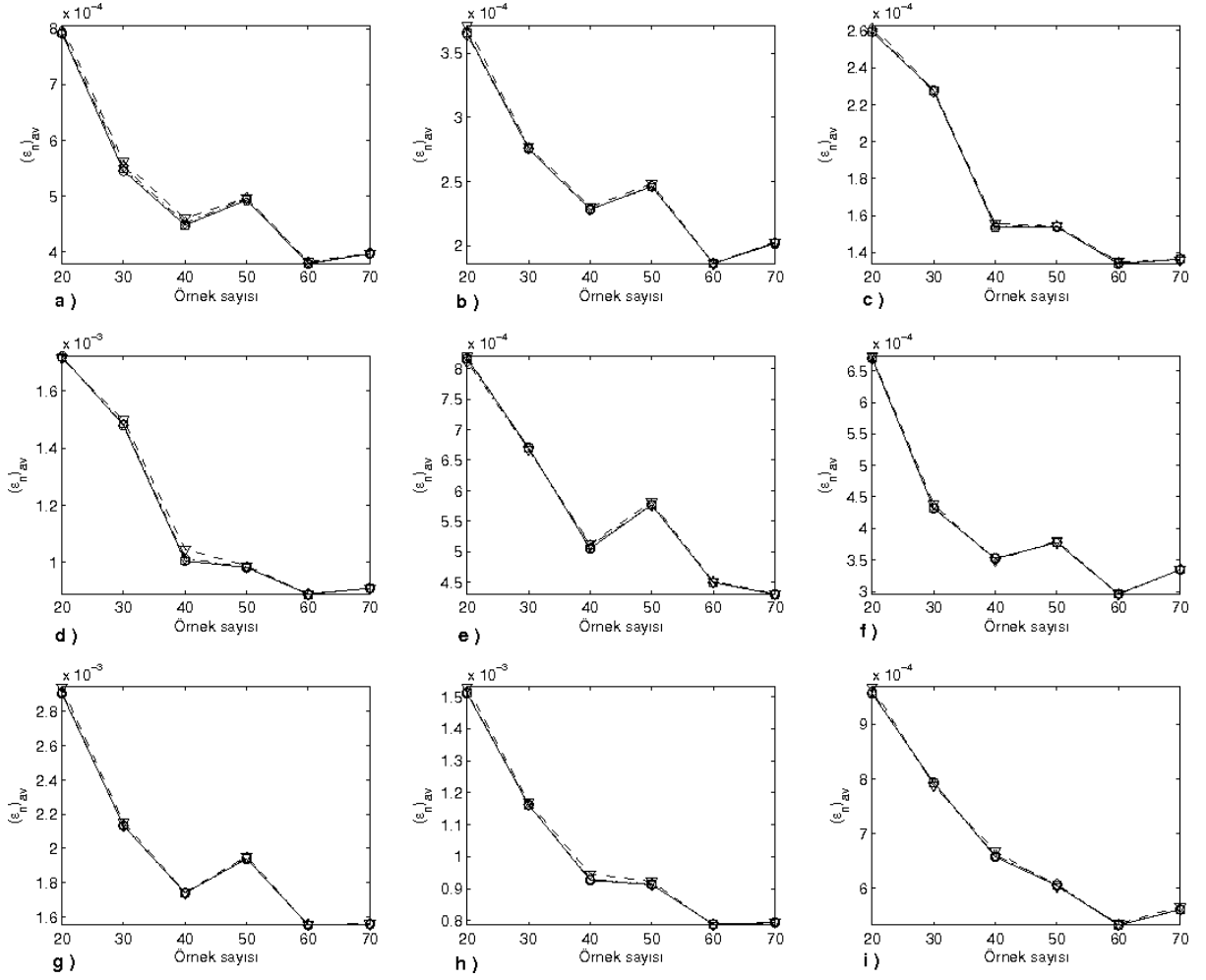
Şekil C.10: Üçgen örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



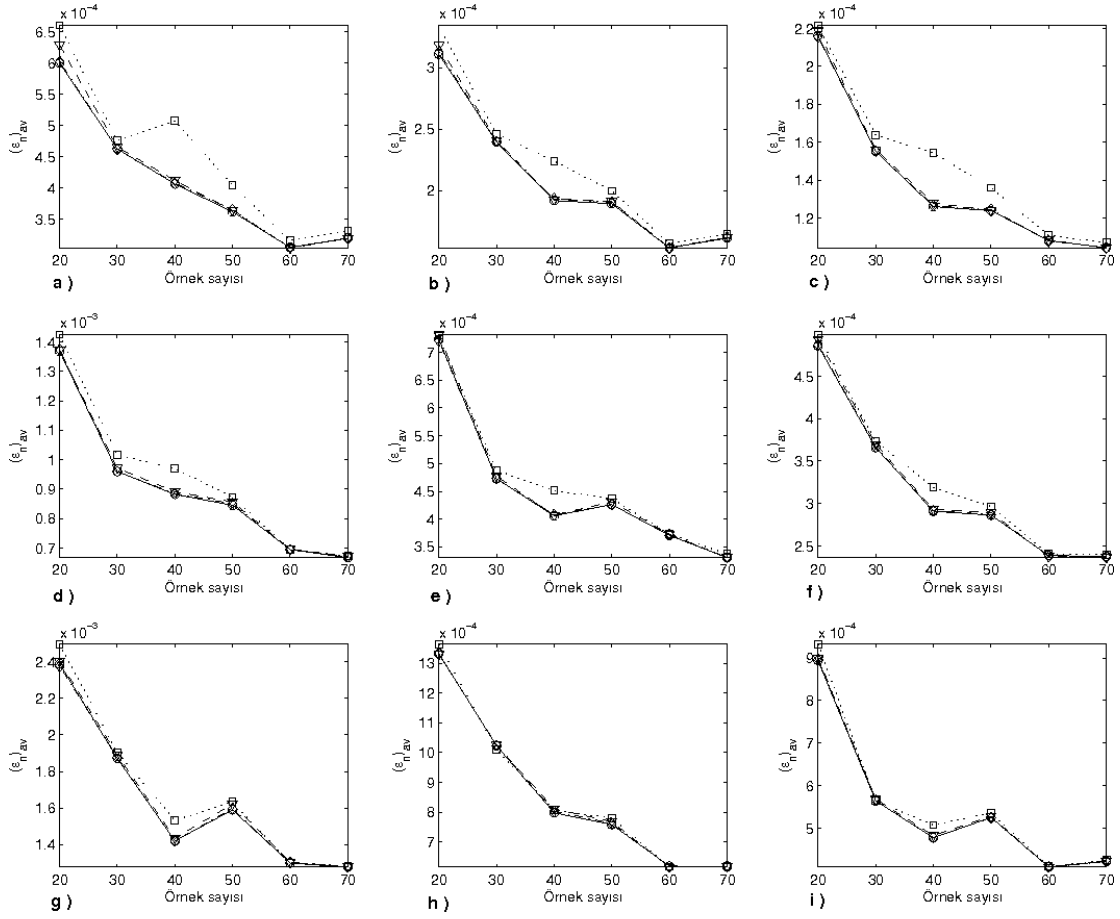
Şekil C.11: Üçgen örnekleme ve $\mu_5(x)$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



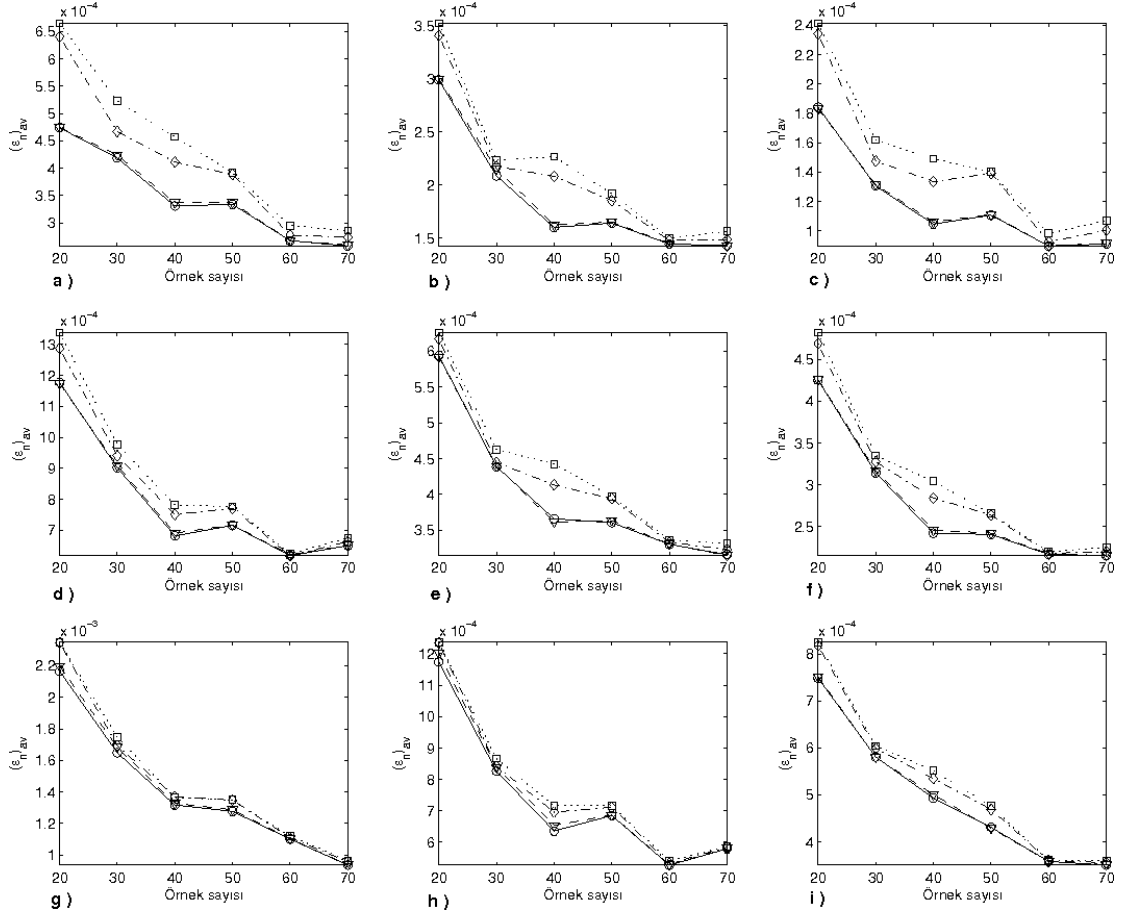
Şekil C.12: Üçgen örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



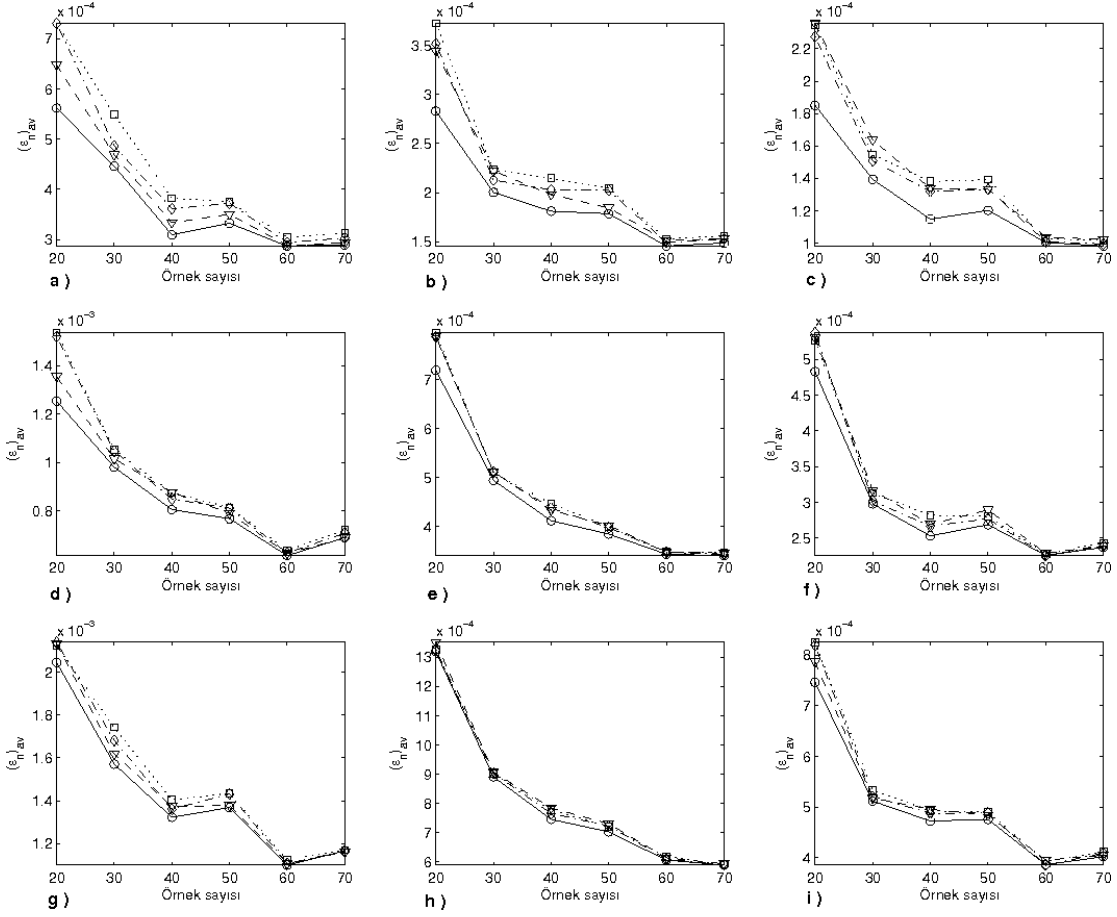
Şekil C.13: Altıgen örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



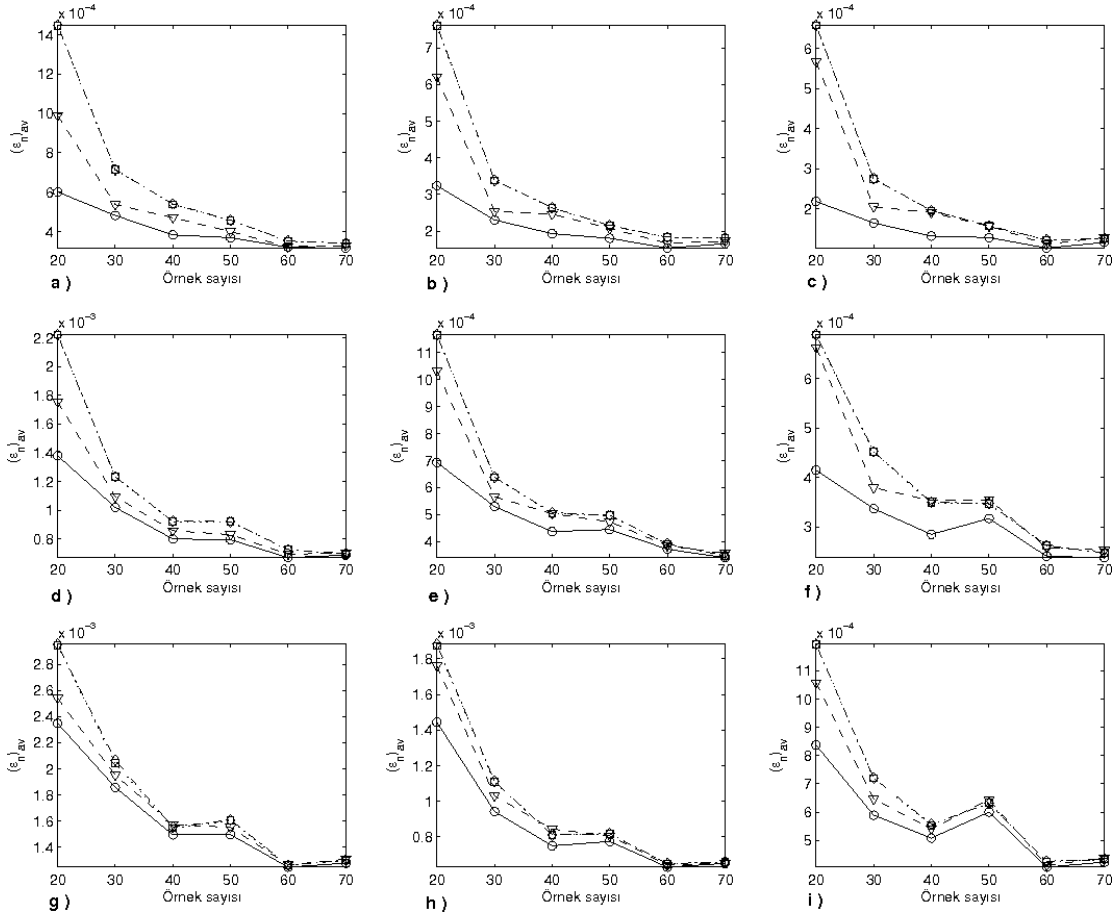
Şekil C.14: Altıgen örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



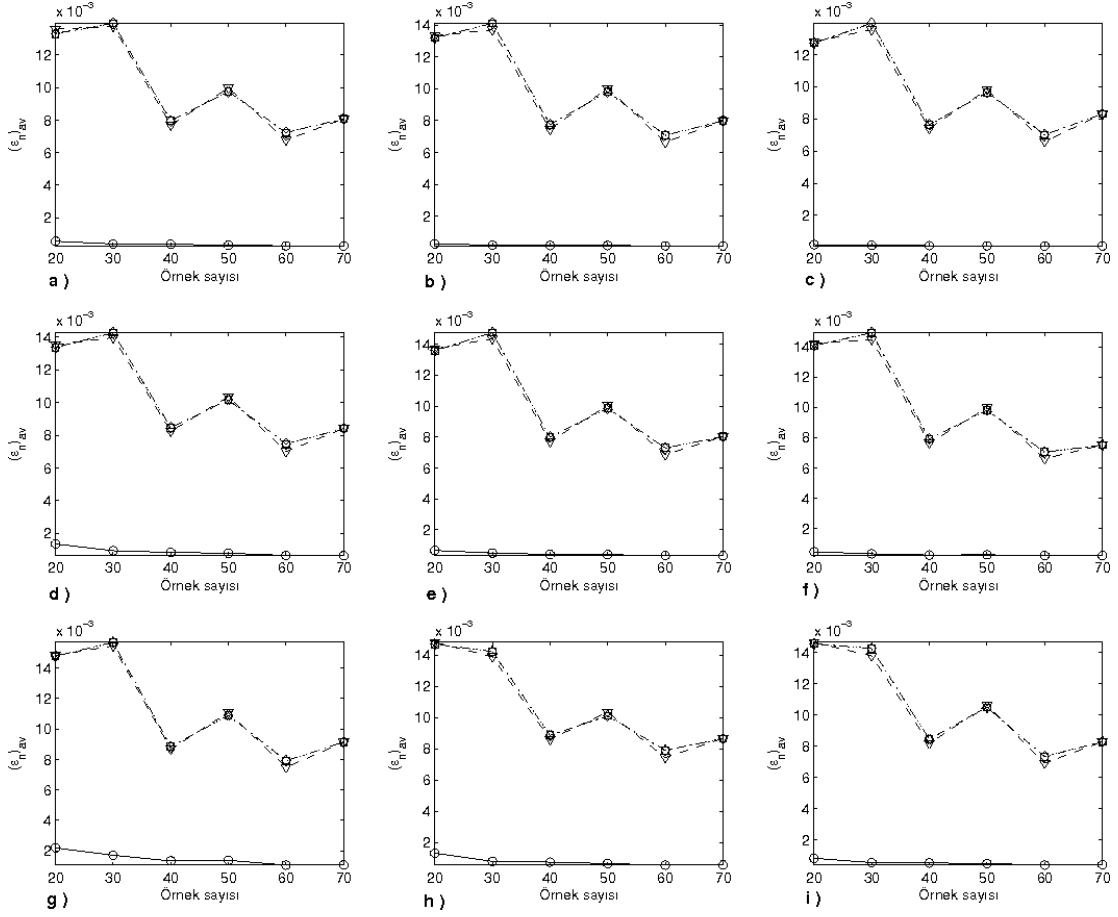
Şekil C.15: Altıgen örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



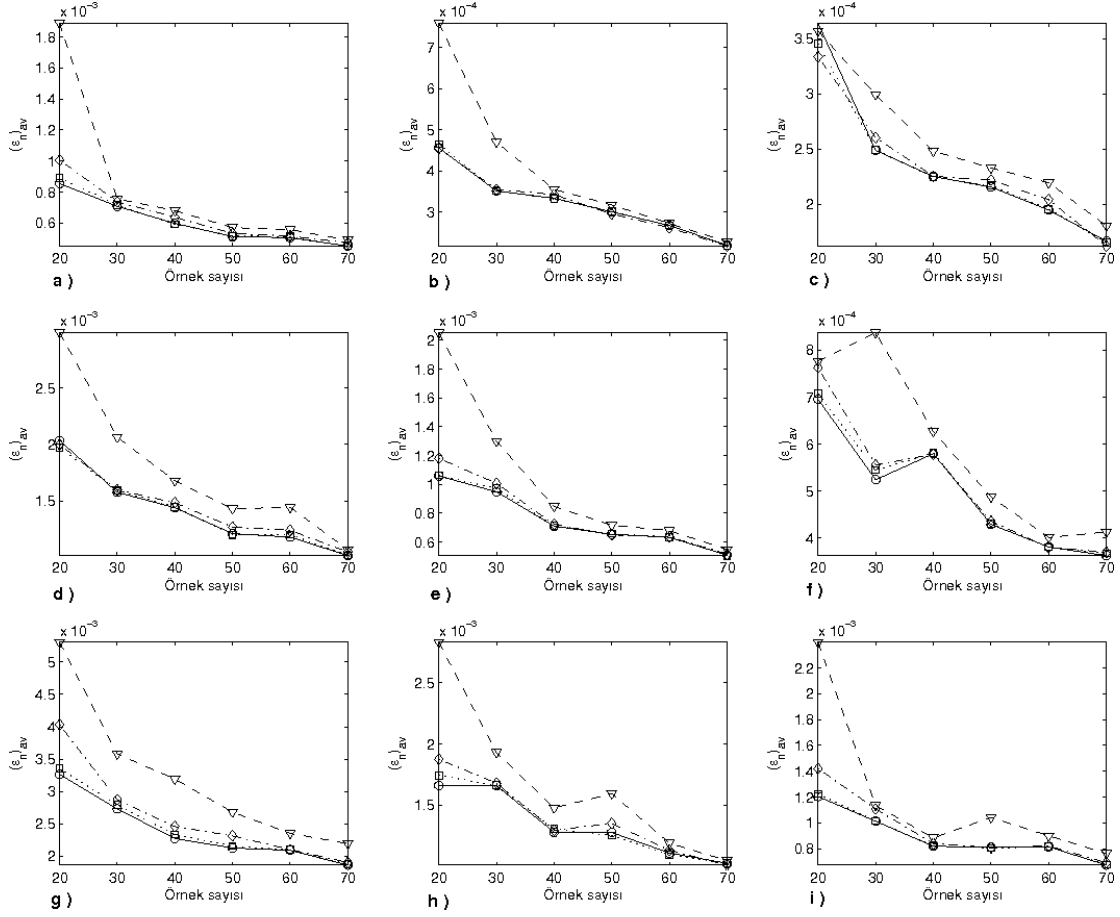
Şekil C.16: Altıgen örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



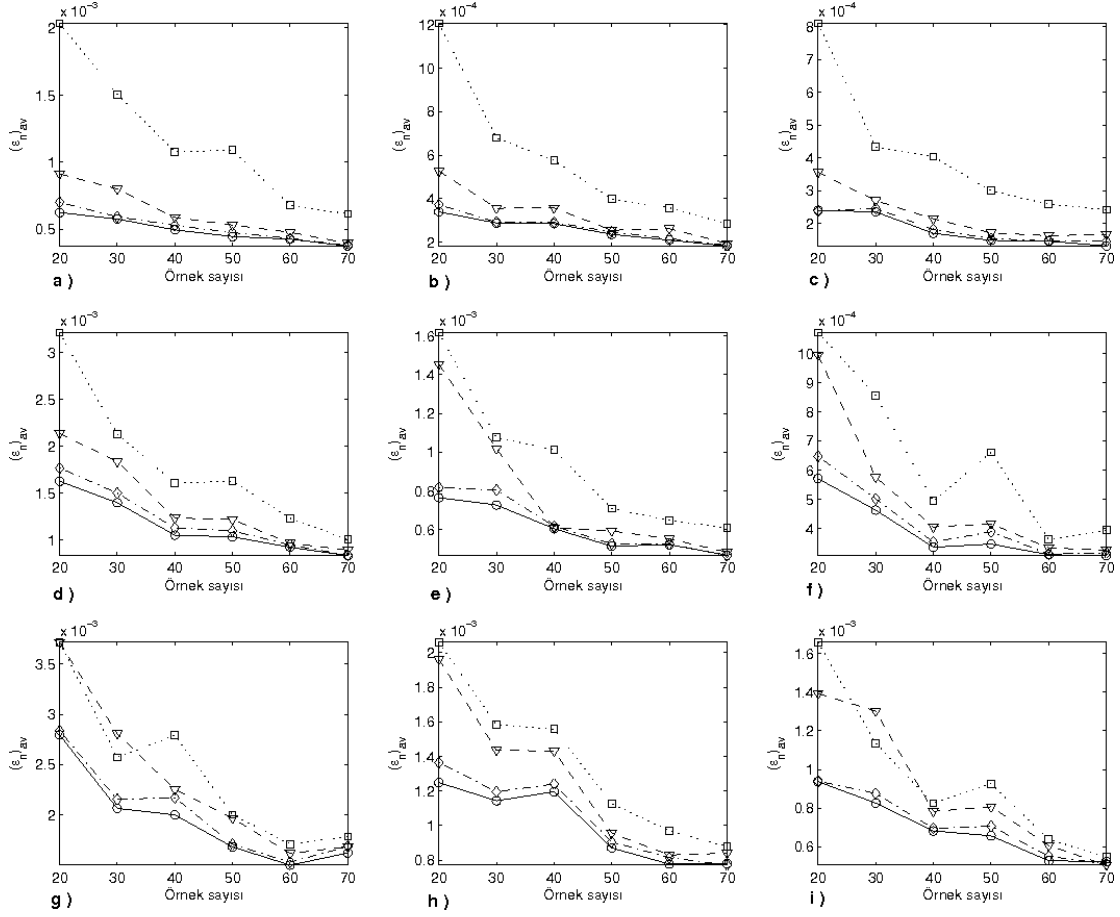
Şekil C.17: Altıgen örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



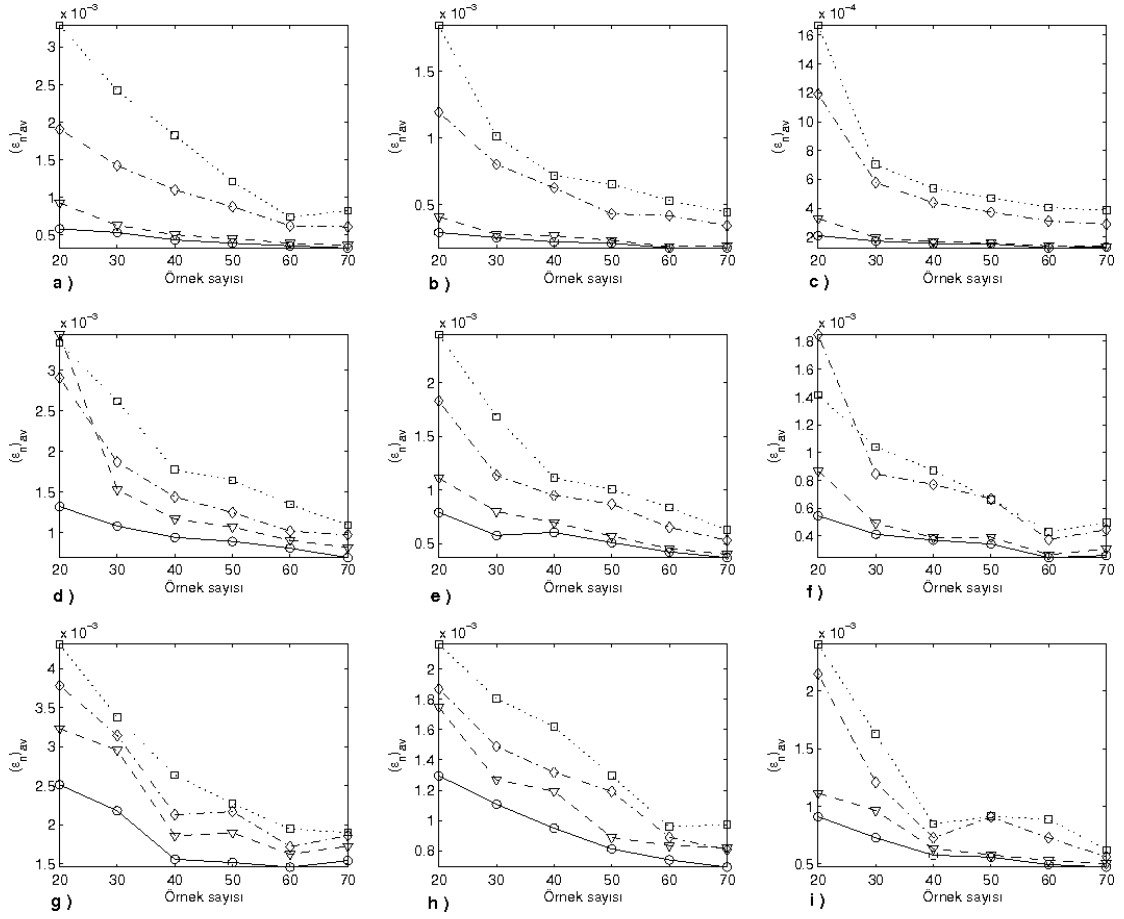
Şekil C.18: Altıgen örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



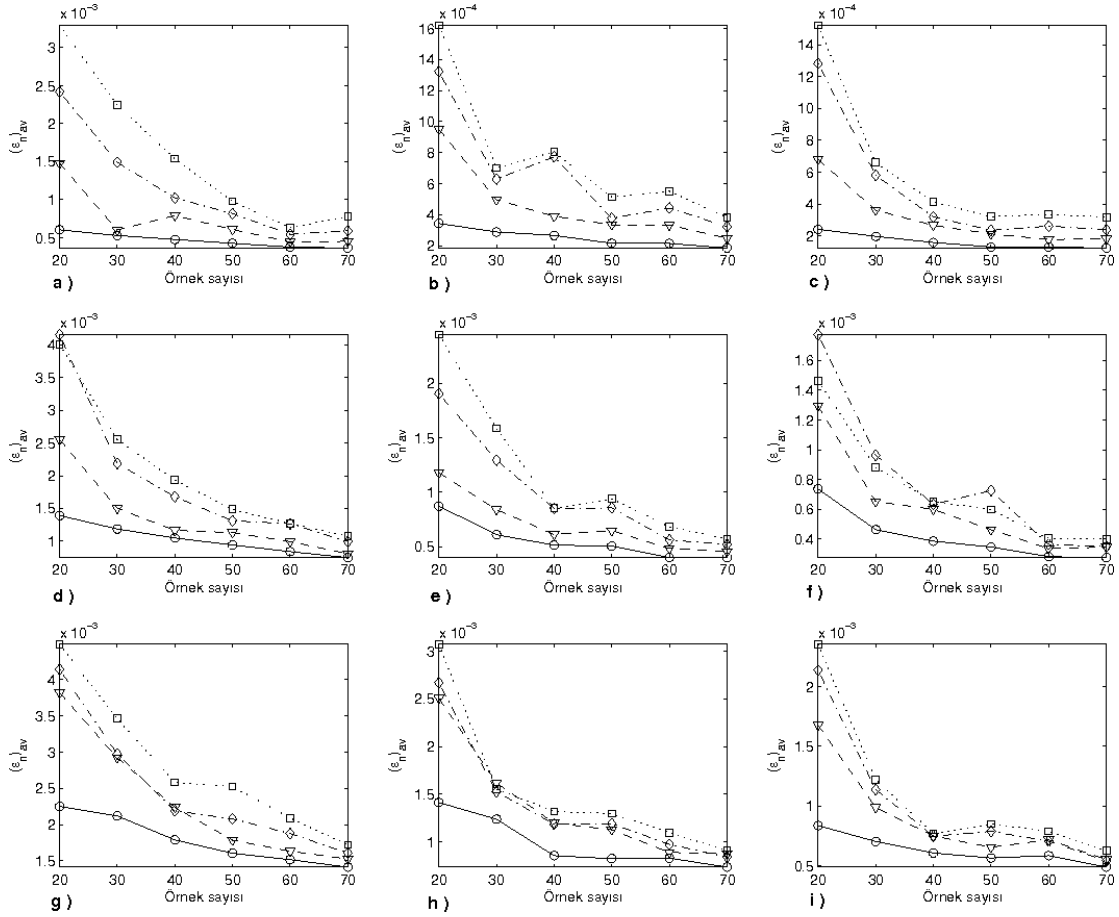
Şekil C.19: Birbiçimli örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



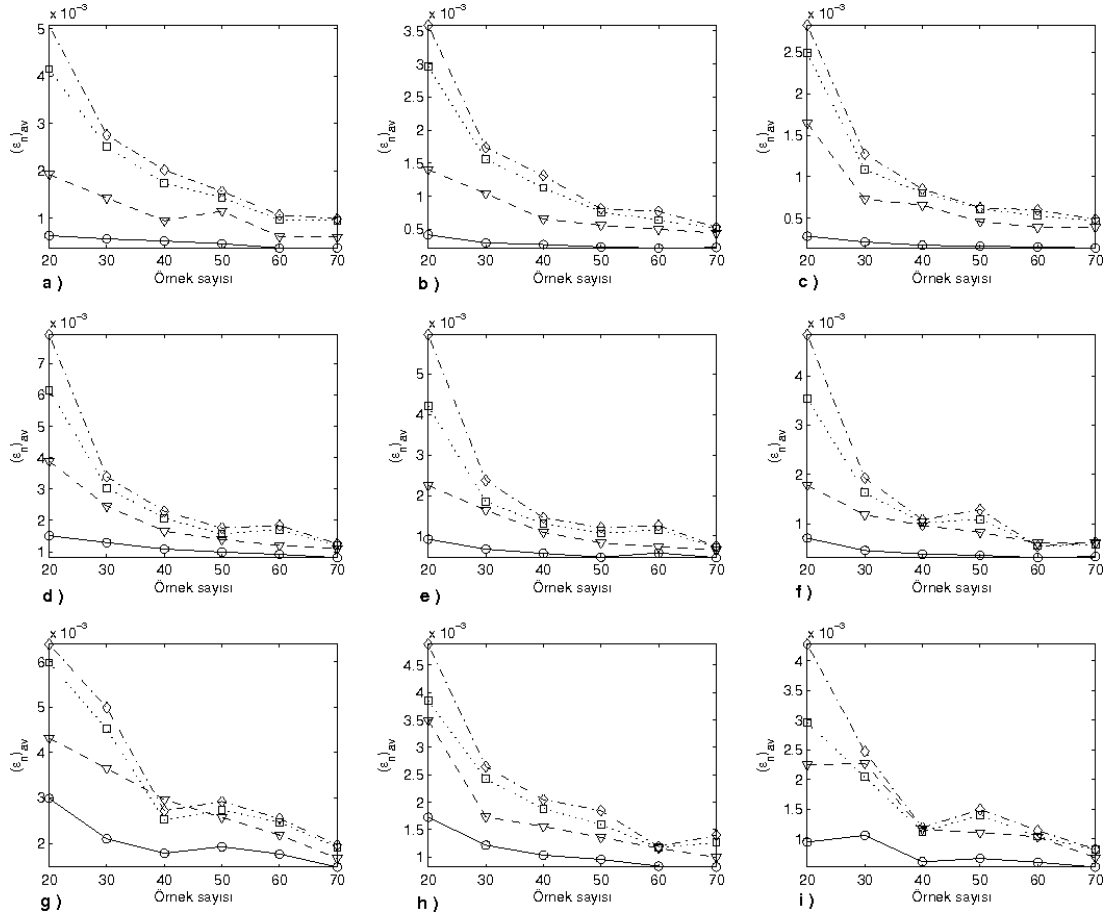
Şekil C.20: Birbiçimli örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



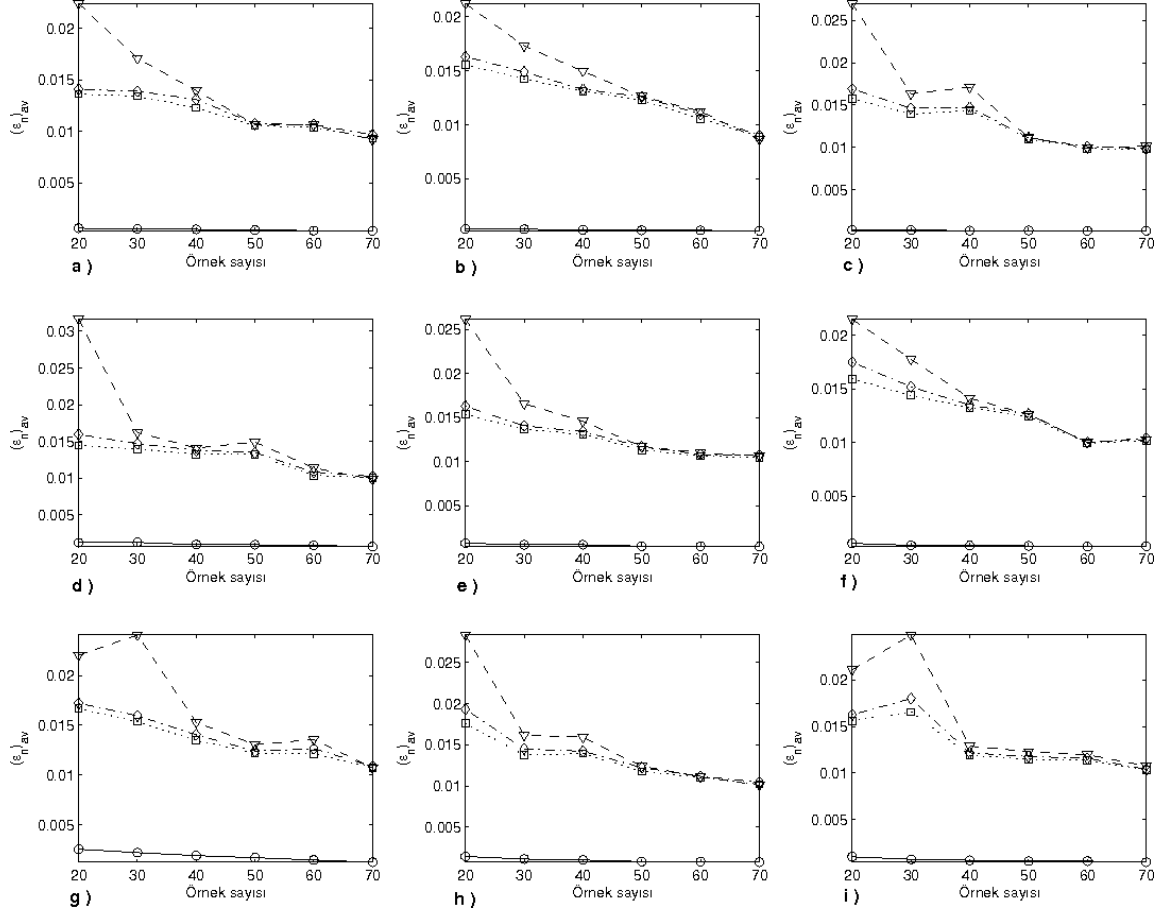
Şekil C.21: Birbiçimli örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



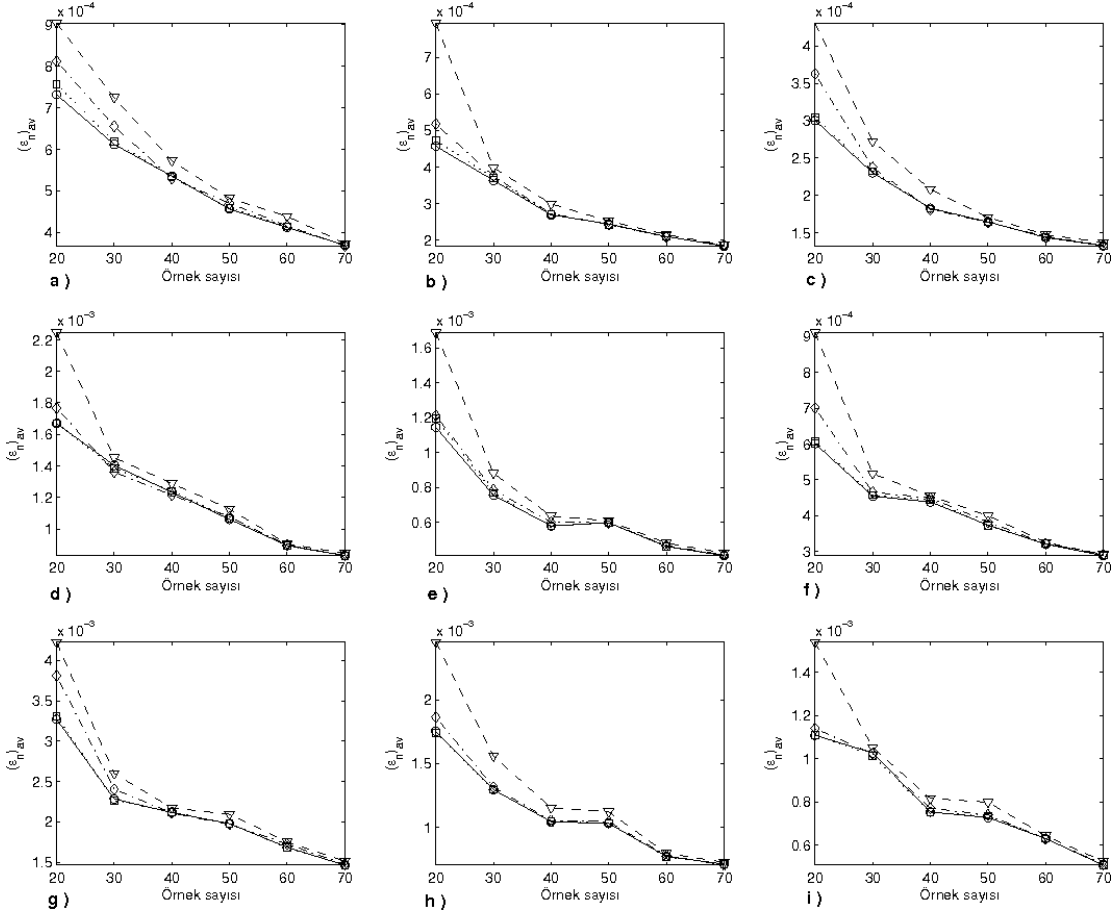
Şekil C.22: Birbiçimli örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



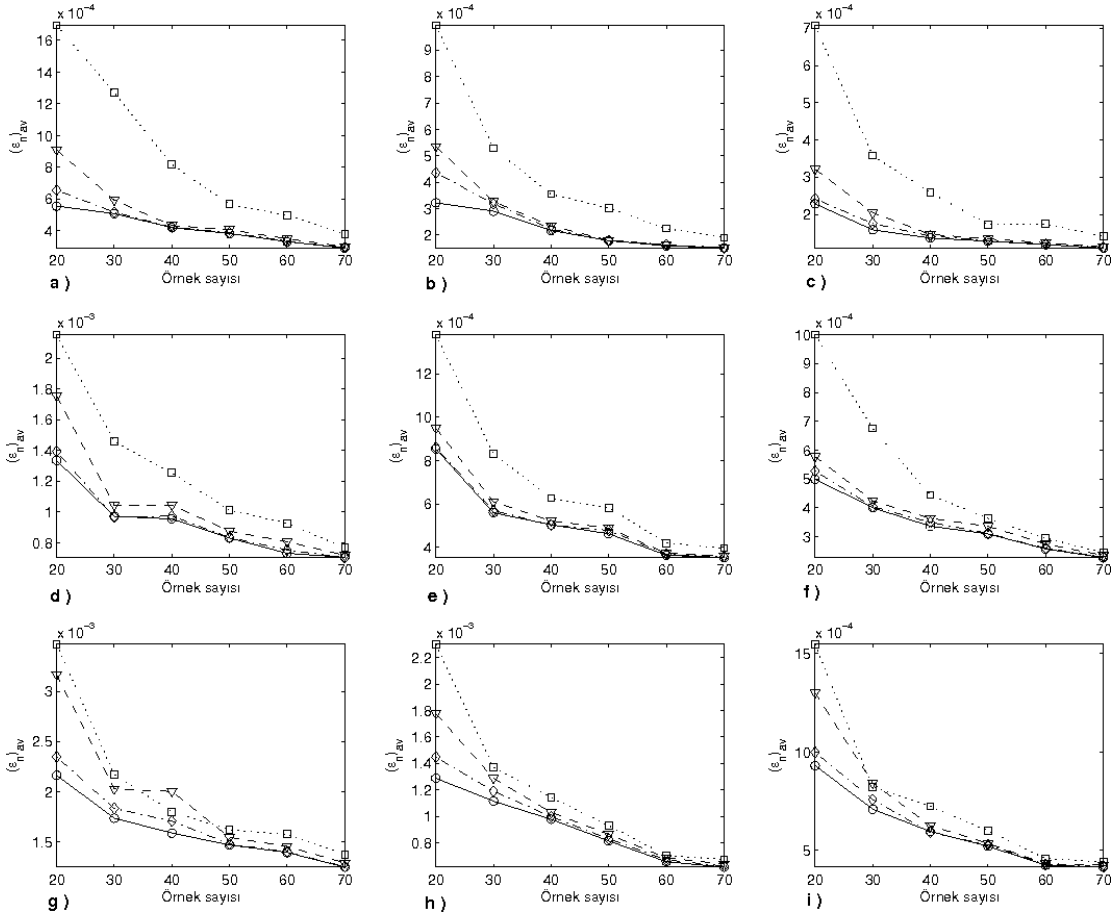
Şekil C.23: Birbiçimli örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, **(a)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, **(b)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, **(c)** $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, **(d)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, **(e)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, **(f)** $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, **(g)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, **(h)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, **(i)** $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



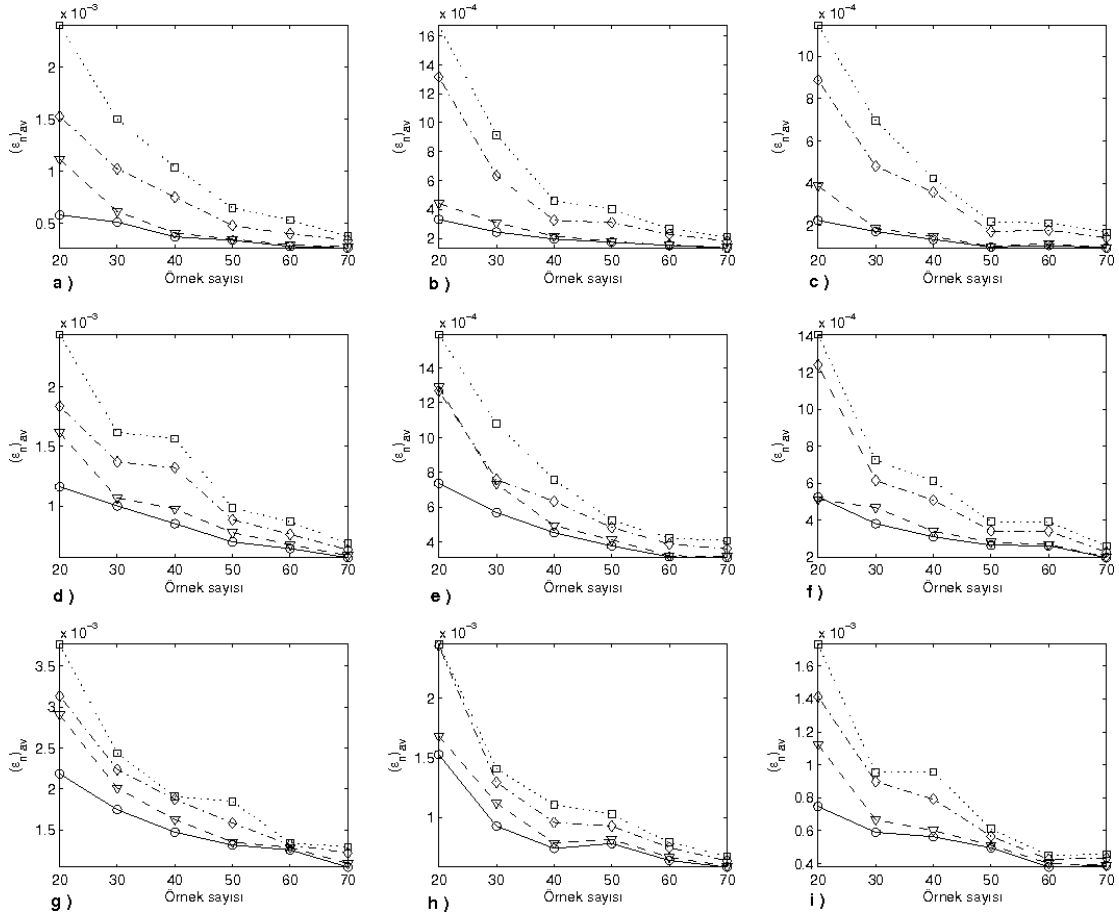
Şekil C.24: Birbiçimli örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



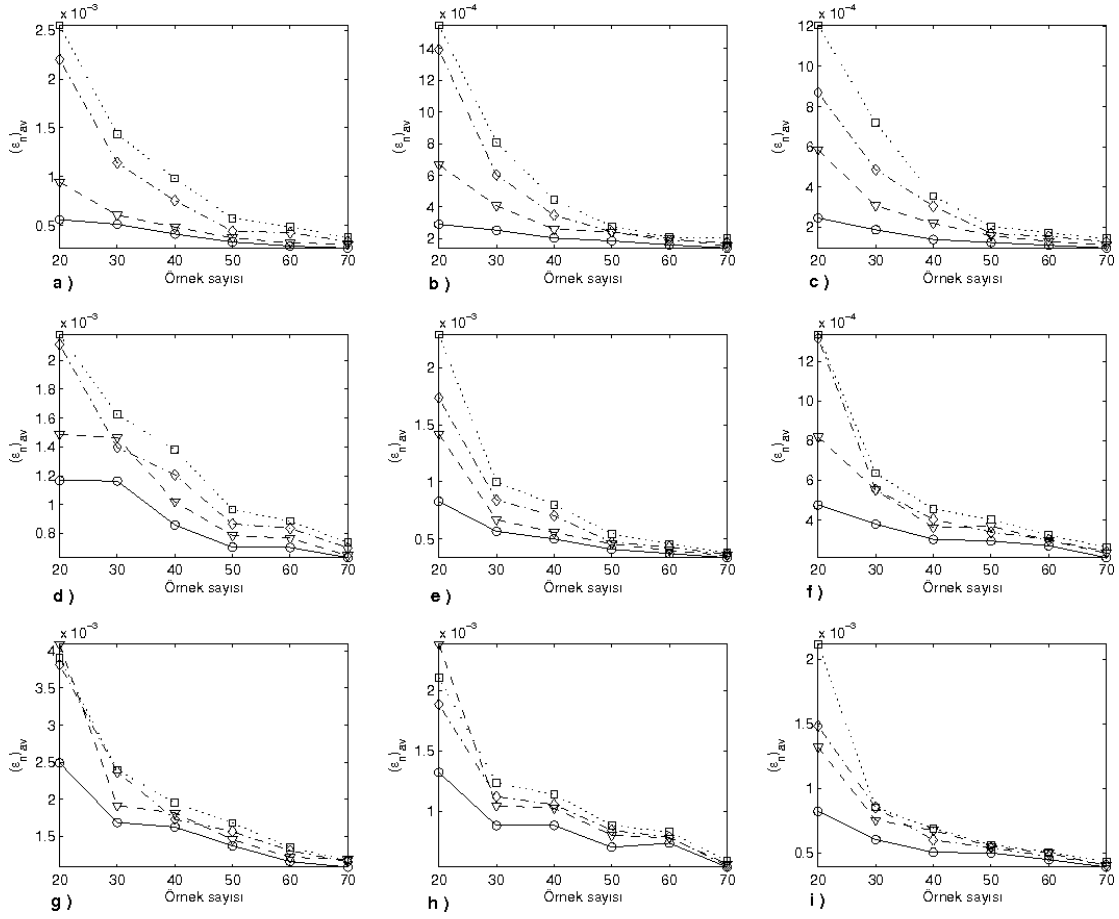
Şekil C.25: Engelli örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



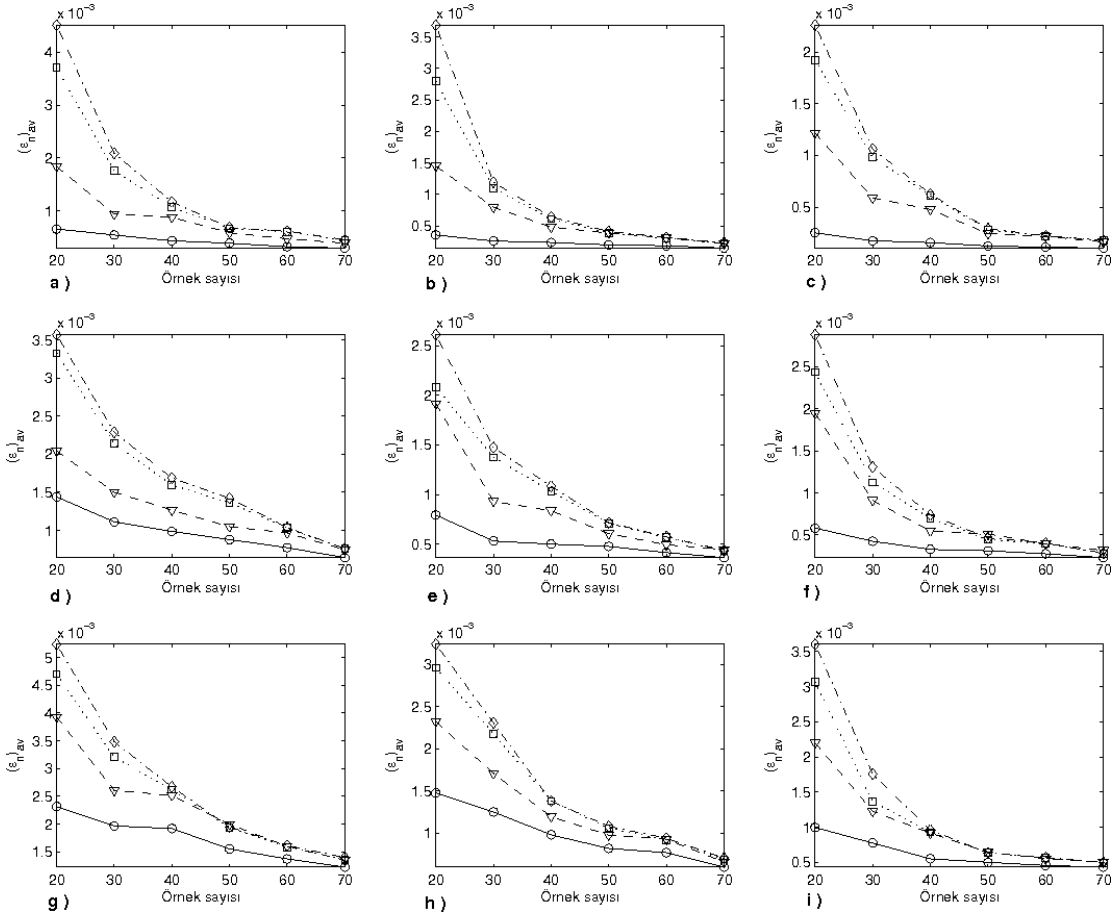
Şekil C.26: Engelli örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



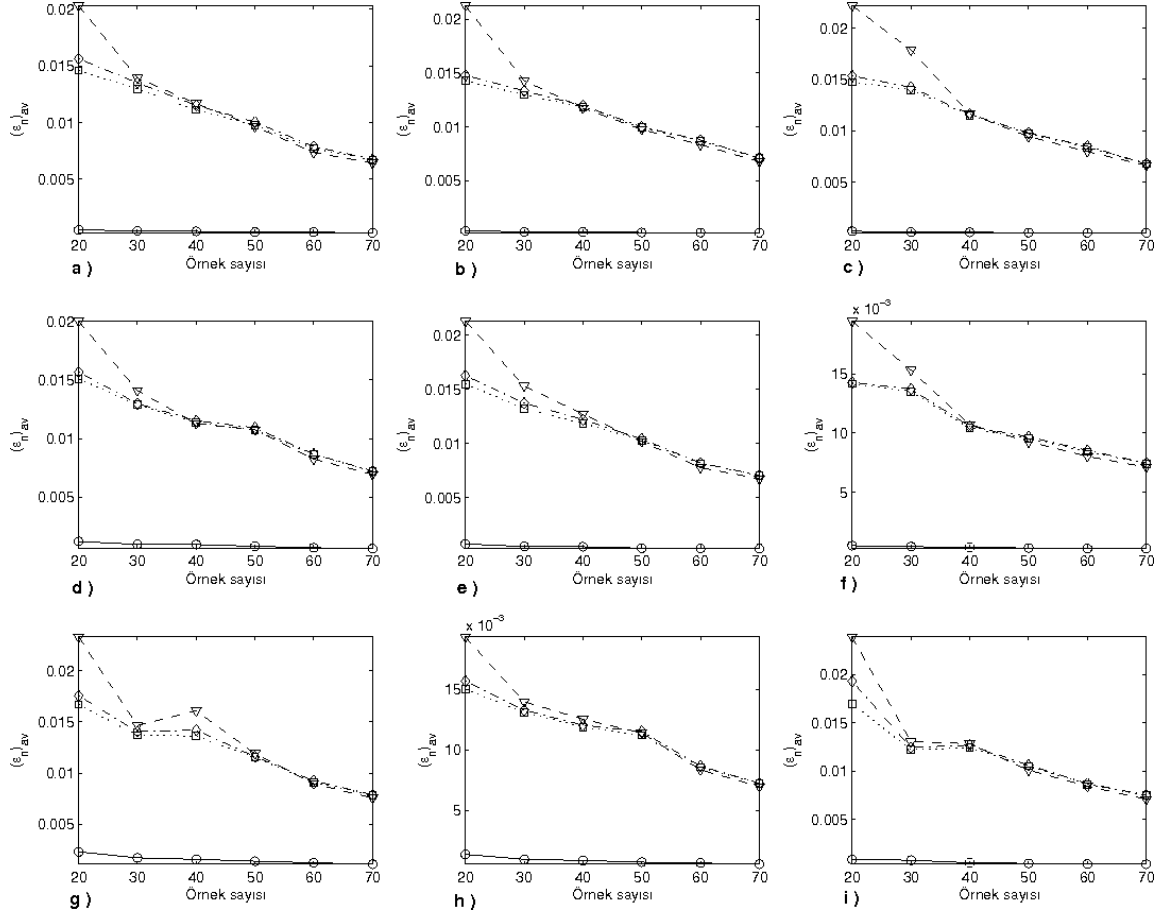
Şekil C.27: Engelli örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



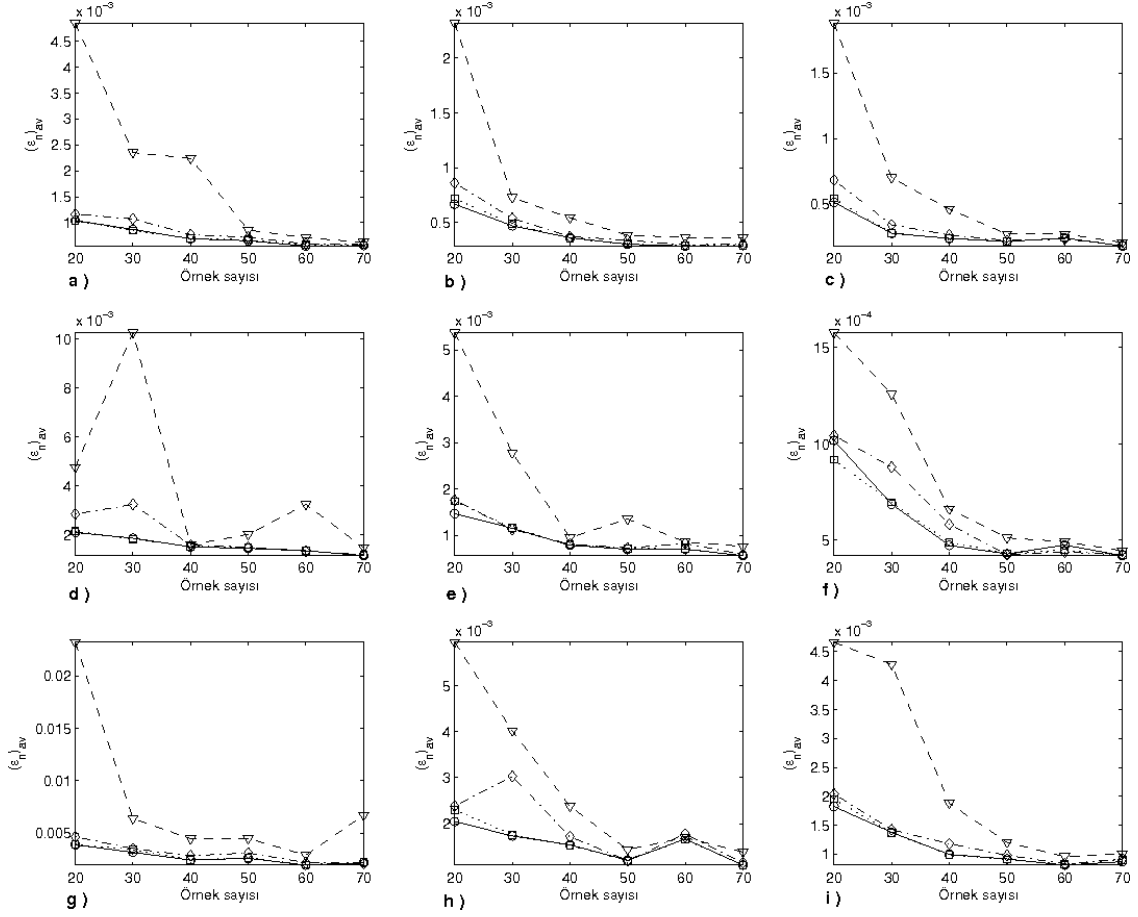
Şekil C.28: Engelli örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



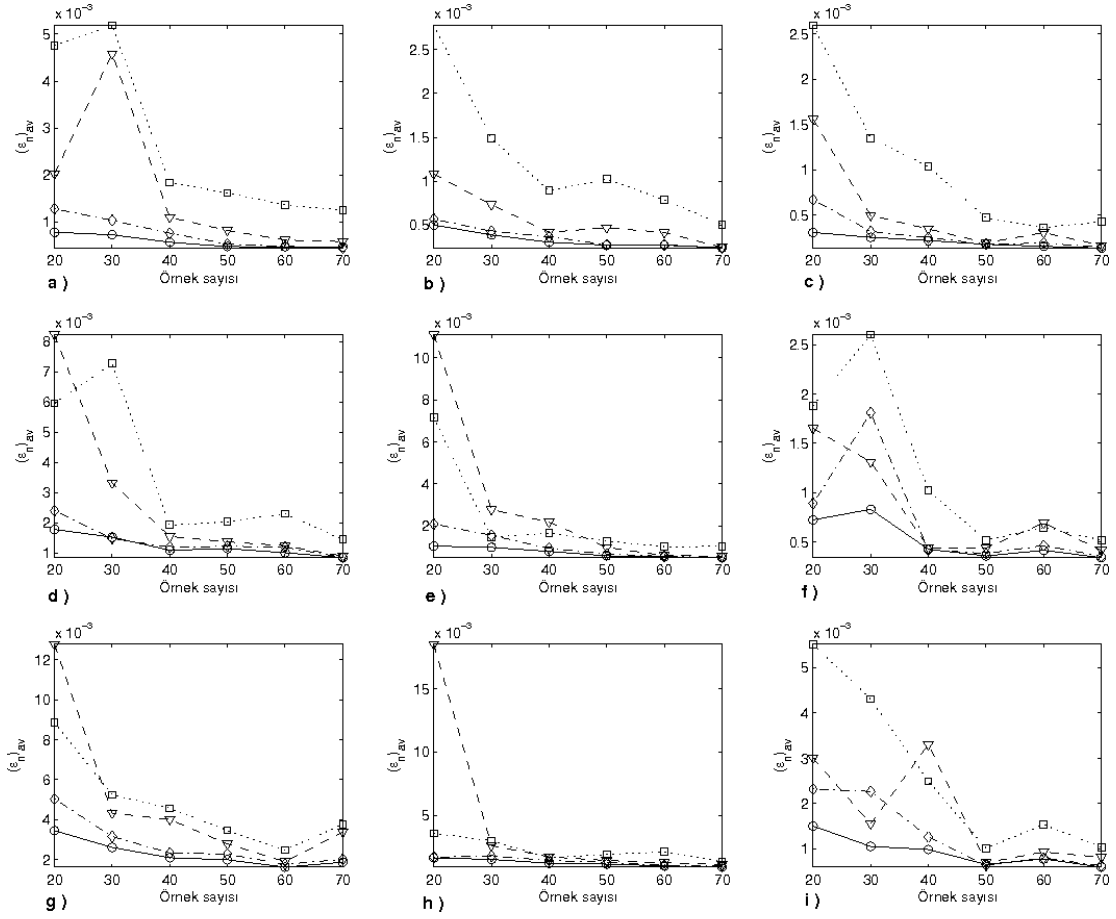
Şekil C.29: Engelli örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



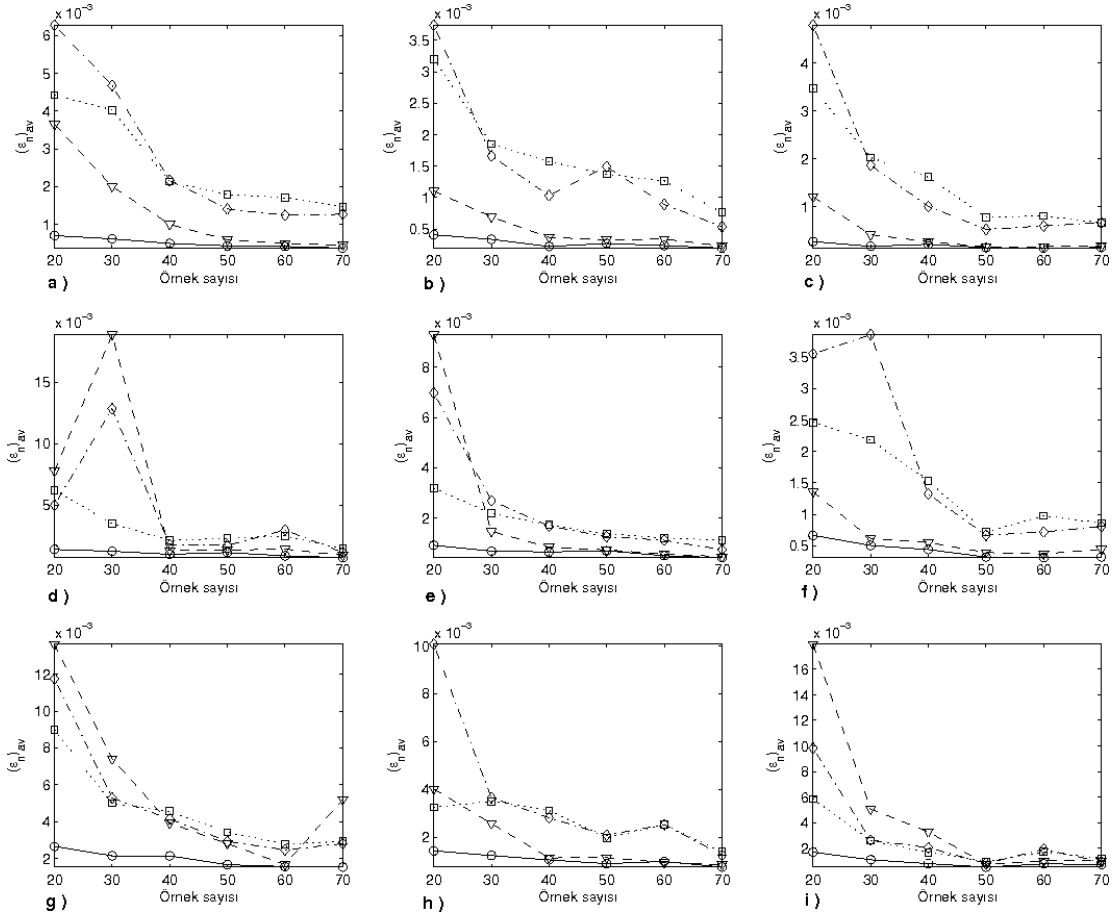
Şekil C.30: Engelli örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



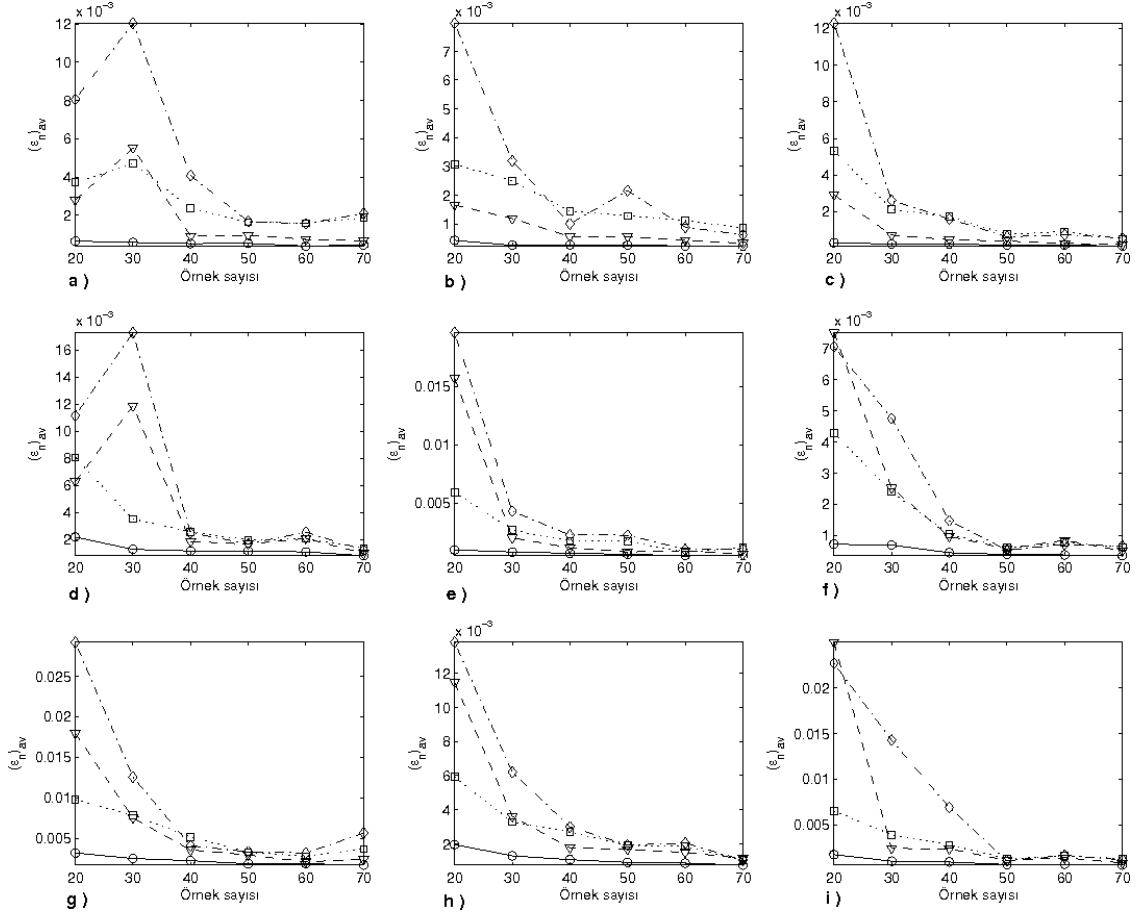
Şekil C.31: Kümeli örnekleme ve $\mu_1(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



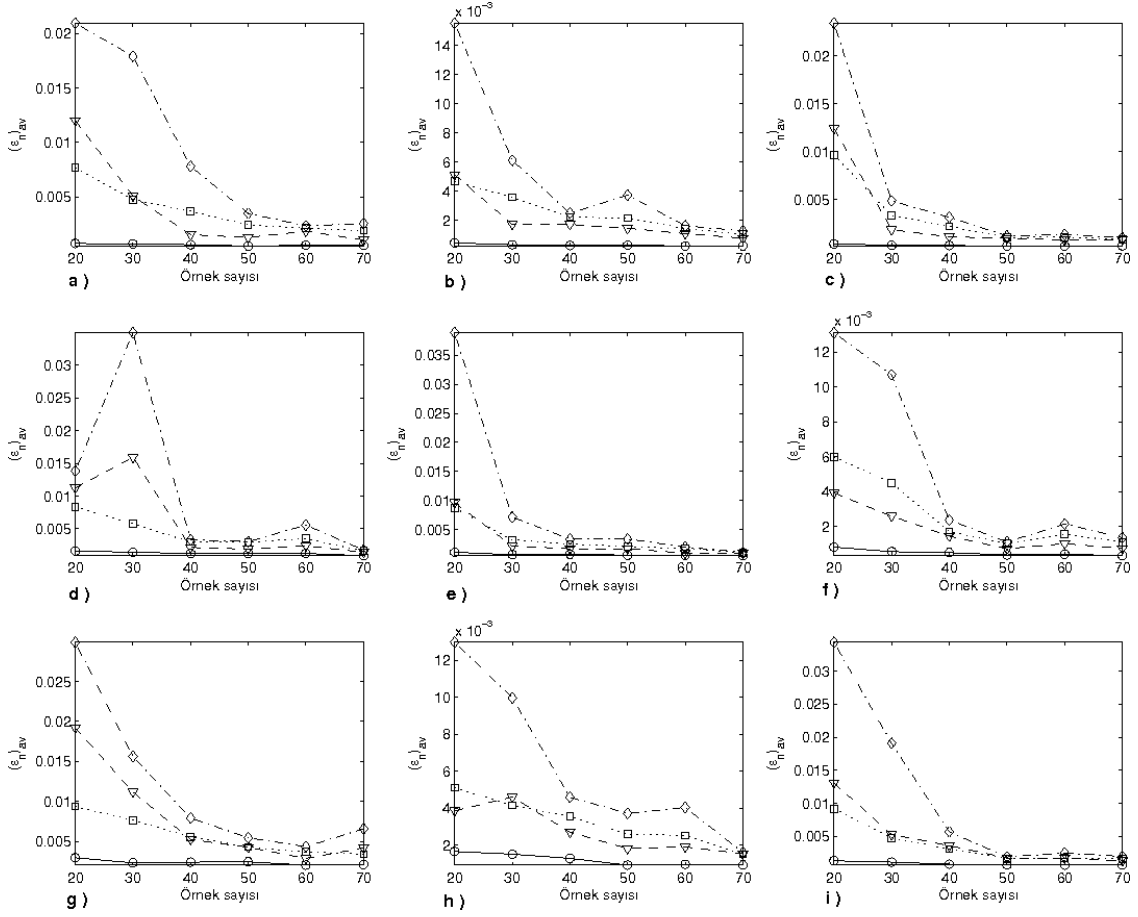
Şekil C.32: Kümeli örnekleme ve $\mu_2(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



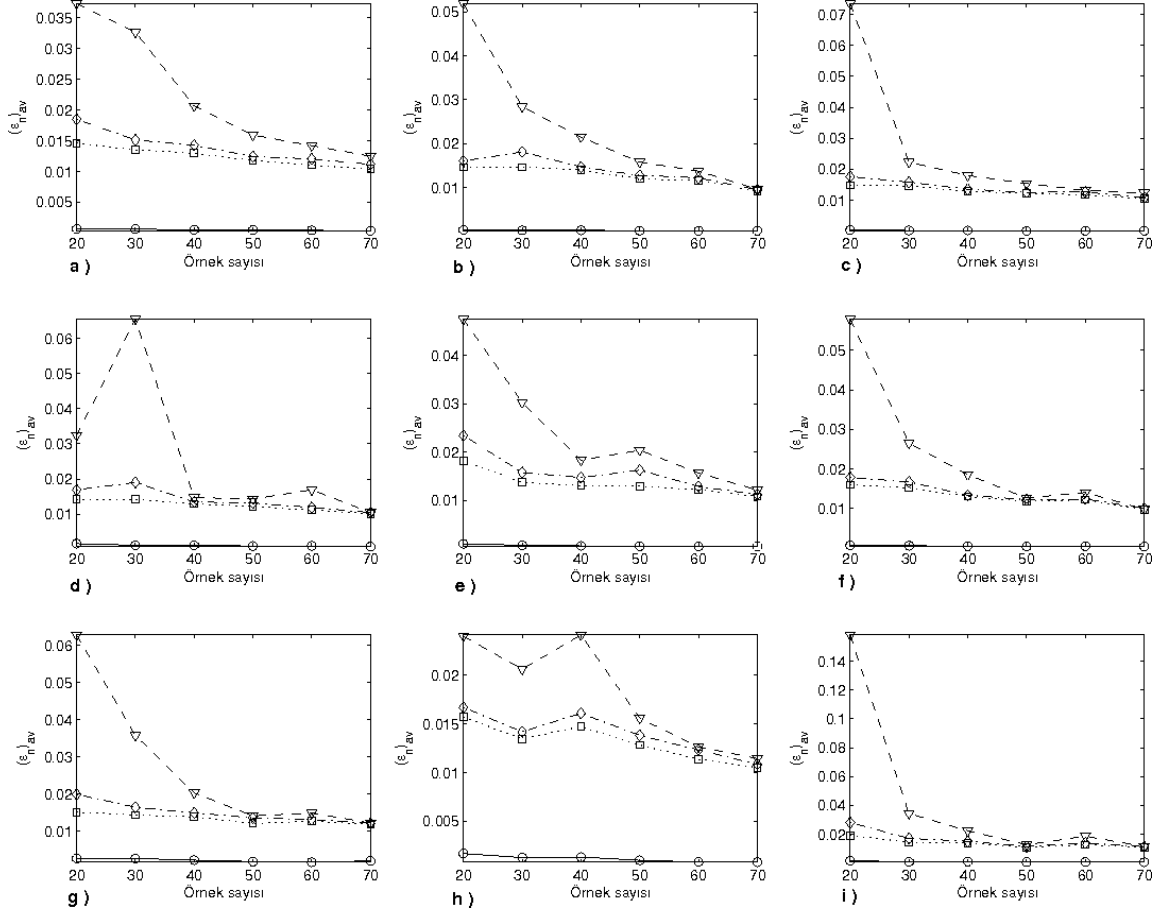
Şekil C.33: Kümeli örnekleme ve $\mu_3(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



Şekil C.34: Kümeli örnekleme ve $\mu_4(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



Şekil C.35: Kümeli örnekleme ve $\mu_5(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$



Şekil C.36: Kümeli örnekleme ve $\mu_6(\mathbf{x})$ ile elde edilmiş $(\epsilon_n)_{av}$ değerleri, (a) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 5$, (b) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 10$, (c) $\sigma^2 = 0.64$, $a = 15$, (d) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 5$, (e) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 10$, (f) $\sigma^2 = 1.44$, $a = 15$, (g) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 5$, (h) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 10$, (i) $\sigma^2 = 2.56$, $a = 15$

ÖZGEÇMİŞ

135

Adı Soyadı : İŞILTAN SAYIN
Doğum Yeri : ANKARA
Doğum Yılı : 06.05.1983
Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise 1994-2001 : M.E.R Anadolu Lisesi, ANKARA
Lisans 2001-2005 : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,
ANKARA

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi

2005-... : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,
ANKARA
Araştırma Görevlisi