

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**EOG VERİLERİNİ KULLANARAK GÖZ BAKIŞ
TAHMINİNDE EN İYİ ÖZNİTELİK VEKTÖR KÜMESİ
SEÇİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Alihan SUIÇMEZ

Danışman
Doç. Dr. Cengiz TEPE

SAMSUN
2023

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

15 /06 / 2023
Alihan SUIÇMEZ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : EOG VERİLERİNİ KULLANARAK GÖZ BAKIŞ TAHMİNİNDE EN İYİ ÖZNİTELİK VEKTÖR KÜMESİ SEÇİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 17/05/2023.tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 2

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

15 /06 / 2023
Doç.Dr. Cengiz TEPE

ÖZET

EOG VERİLERİNİ KULLANARAK GÖZ BAKIŞ TAHMİNİNDE EN İYİ ÖZNİTELİK VEKTÖR KÜMESİ SEÇİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Alihan SUIÇMEZ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Haziran/2023

Danışman: Doç. Dr. Cengiz TEPE

Engelli insanların hayat şartlarını kolaylaştırmak için elektrookülografi (EOG) kullanılarak makine öğrenmesi konusunda pek çok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada, EOG verilerindeki göz açısal yer değiştirmeleri tahmin edilirken çeşitli veri mühendisliği teknikleri kullanılarak, farklı öznitelik seçim yöntemlerinin uygulanması sonucu tahmin hatalarına etkisinin kıyaslanması amaçlanmıştır. Veri setindeki EOG sinyallerinin dikey ve yatay bileşenlerindeki göz kırpmalar çıkarılarak filtreleme işlemleri yapıldıktan sonra her iki kanalda ayrı ayrı işlenip zaman düzleminde 23 (ortalama karekök, ortalama, mutlak maksimum, basıklık, çarpılık, varyasyon katsayısı, geometrik ortalama, harmonik ortalama, varyans, ortanca değer, ortalama enerji, standart sapma, standart hata, şekil faktörü, çeyrekler açıklığı, %50 kırılmış ortalama, %25 kırılmış ortalama, maksimum, ortalama mutlak sapma, minimum, merkezi moment, tekil değer ayrıştırması ve crest), frekans düzleminde 10 (baskın güç, standart sapma, enerji, güç, enerji entropi, spektral entropi, basıklık, çarpılık, ortanca değer ve ortalama), zaman-frekans düzleminde ise 36 adet öznitelik (aktivite, mobilite, karmaşıklık, basıklık, çarpılık ve enerji) çıkarılmıştır. Frekans düzleminde ayrık fourier dönüşümü, zaman-frekans düzleminde ayrık dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Elde edilen veri holdout ve k-fold yöntemleri kullanılarak Fsrtest, Fsrnca, Fsrmmr, RRelief ve Sequential öznitelik yöntemleri ile öznitelikler seçilmiştir. Seçilen öznitelikler makine öğrenmesi algoritmaları olan Gaussian Process Regression(GPR), Support Vector Machine Regression(SVR), Regression Tree ve Regression Tree Ensembles algoritmalarına sokulmuştur. Elde edilen en düşük hata oranları, bireysel olarak, yatay EOG bileşeninde en iyi sonuç zaman-frekans düzleminde rrelieff öznitelik seçim yöntemiyle RTE algoritmasında RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 0.96, 0.77'dir. Dikey EOG bileşeninde ise en iyi sonuç zaman düzleminde fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle RTE algoritmasında RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.73, 1.35'tir. Ortalama değerlerde ise en iyi sonuçlar, yatay EOG bileşeninde zaman-frekans düzleminde RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.15 ± 0.73 , 1.39 ± 0.41 ile fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle, RTE algoritmasında elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise zaman-frekans düzleminde RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.67 ± 0.87 , 2.61 ± 0.64 ile fsrtest öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritmasında elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Bakış açısı tahmini, Dalgacık dönüşümü, EOG, Makine öğrenmesi, Öznitelik çıkartımı, Öznitelik seçimi

ABSTRACT

RESEARCHING THE BEST FEATURE VECTOR CLUSTER SELECTION FOR EYE GAZE PREDICTION USING EOG DATA

Alihan SUIÇMEZ

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical Electronics Engineering

Master, June/2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cengiz TEPE

Many studies have been carried out on machine learning using electrooculography (EOG) to facilitate the living conditions of people with disabilities.

In this study, it is aimed to compare the effect of different feature selection methods on estimation errors by using various data engineering techniques while estimating eye angular displacements in EOG data. After filtering by removing the blinks in the vertical and horizontal components of the EOG signals in the data set, both channels were processed separately and 23 (root mean square, mean, absolute maximum, kurtosis, skewness, coefficient of variation, geometric mean, harmonic mean, variance, median, average energy, standart deviation, standart error, shape factor, interquatile range, %50 trimmed mean, %25 trimmed mean, maximum, mean absolute deviation, minimum, central moment, singular value decomposition and crest) features were extracted in the time domain, 10 (dominant power, standart deviation, energy, power, energy entropy, kurtosis, skewness, median and mean) features in the frequency domain, and 36 features (activity, mobility, complexity, kurtosis, skewness and energy) in the time-frequency domain. Discrete fourier transform is used in the frequency domain and discrete wavelet transform is used in the time-frequency domain. By using the obtained data holdout and k-fold methods, features were selected with Fsrtest, Fsrnca, Fsrmmr, RReliefF and Sequential feature methods. The selected features were inserted into the machine learning algorithms Gaussian Process Regression(GPR), Support Vector Machine Regression(SVR), Regression Tree and Regression Tree Ensembles. The lowest error rates obtained, individually, in the horizontal EOG component, the RMSE and angular error values in the RTE algorithm with the rerelieff feature selection method in the time-frequency plane with the best results are 0.96, 0.77, respectively. In the vertical EOG component, on the other hand, the RMSE and angular error values in the RTE algorithm are 1.73 and 1.35, respectively, with the feature selection method fsrnca in the time domain. In the mean values, the best results were obtained in the RTE algorithm, with the RMSE and angular error values in the horizontal EOG component in the time-frequency plane with 2.15 ± 0.73 , 1.39 ± 0.41 fsrnca feature selection method, respectively. In the vertical EOG component, the RMSE and angular error values in the time-frequency plane were obtained with the fsrtest feature selection method, with 3.67 ± 0.87 , 2.61 ± 0.64 , respectively, in the GPR algorithm.

Keywords: EOG, Feature extraction, Feature selection, Gaze angle estimation, Machine learning, Wavelet transform

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisansüstü çalışmalarımı birlikte yürüttüğüm ve ihtiyacım olduğunda hep yanımda olan danışmanım Doç.Dr. Cengiz TEPE'ye, desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen ve hep yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Alihan SUIÇMEZ



İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	4
1.2. Tezin Kapsamı	5
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	11
3.1. Veri Setinin Elde Edilmesi ve Özellikleri	11
3.2. Eldeki Verilerin İşlenmesi	14
3.3. Öznitelik Çıkarımı	16
3.3.1. Zaman Düzleminde Öznitelik Çıkarımı	16
3.3.2. Frekans Düzleminde Öznitelik Çıkarımı	17
3.3.3. Zaman ve Frekans Düzleminde Öznitelik Çıkarımı	19
3.4. Veri Mühendisliği Teknikleri	23
3.4.1. F Testleri Kullanılarak Regresyon İçin Tek Değişkenli Özellik Sıralaması (Fsrftest)	23
3.4.2. Regresyon için Komşu Bileşen Analizi Kullanılarak Özellik Seçimi (Fsrnca)	25
3.4.3. Minimum Fazlalık Maksimum Alaka Düzeyi Kullanılarak Regresyon İçin Özellik Seçimi (Fsrnmrmr)	28
3.4.4. Regresyon için Tahmin Edici Önem Sıralaması (RReliefF)	31
3.4.5. Sıralı Özellik Seçimi (Sequentials)	33
3.4.6. Çapraz Doğruluk	36
3.4.6.1. Holdout Yöntemi	36
3.4.6.2. K-Fold Yöntemi	37
3.4.7. Kullanılan Algoritmalar	37
3.4.7.1. Gaussian Process Regression (GPR)	37
3.4.7.2. Support Vector Machine Regression (SVR)	38
3.4.7.3. Regression Tree	39
3.4.7.4. Regression Tree Ensembles	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	41
4.1. Zaman Düzleminde	41
4.2. Frekans Düzleminde	59
4.3. Zaman-Frekans Düzleminde	78
5. SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	102
ÖZ GEÇMİŞ	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

AI	: Yapay Zeka
CAE	: Konvolüsyonel Otokodlayıcı
CNN	: Evrimsel Sinir Ağı
COR	: Pearson Korelasyon Katsayısı
CTFT	: Sürekli Zamanlı Fourier Dönüşümü
CTFT	: Sürekli Zamanlı Fourier Dönüşümü
DFT	: Ayrık Fourier Dönüşümü
DWT	: Ayrık Dalgacık Dönüşümü
EEG	: Elektroensefalogram
EKG	: Elektrokardiyogram
EMG	: Elektromiyogram
EOG	: Elektrookülografi
fEMG	: Yüz Elektromiyogramı
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FT	: Fourier Dönüşümü
GDA	: Gauss Diskriminant Analizi
HCI	: İnsan Bilgisayar Arayüzü
IC	: Bağımsız Bileşen
ICA	: Bağımsız Bileşen Analizi
KNN	: K-en Yakın Komşu
LR	: Lojistik Regression
LSTM	: Uzun Kısa Süreli Bellek
MLP	: Çok Katmanlı Algılayıcı
MRMR	: Minimum Fazlalık Maksimum Alaka Düzeyi
NCA	: Komşu Bileşen Analizi
PCA	: Temel Bileşen Analizi
POG	: Mutlak Bakış Açısı
QDA	: Dörtlü Veri Analizi
RGB	: Kırmızı-Yeşil- Mavi Renk Sistemi
RMSE	: Karekök Ortalama Hata
RNN	: Tekrarlayan Sinir Ağı

SBS	: Sıralı Geri Seçim
SFS	: Sıralı İleri Seçim
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı
STD	: Standart Sapma
STFT	: Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
SVM	: Destek Vektör Makinesi
VOG	: Video Okülografi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. (a) EOG elektrot yerleşimi, (b) İnsan göz kasları	12
Şekil 3.2. Göz açısını ve ekrandaki hedefi koordinat konumlarıyla ilişkilendiren trigonometrik model.....	13
Şekil 3.3. Ham EOG bileşenleri	13
Şekil 3.4. Göz kırpmalarını içeren EOG yatay ve dikey bileşenin taban hattı kayması.....	15
Şekil 3.5. Göz kırpmaları çıkarılmış EOG yatay ve dikey bileşenin taban hattı kayması.....	15
Şekil 3.6. Göz kırpmalarını içeren EOG yatay ve dikey bileşenin taban hattı sorunu giderilmiş hali.....	15
Şekil 3.7. Göz kırpmalarını çıkarılmış EOG yatay ve dikey bileşenin taban hattı sorunu giderilmiş hali.....	16
Şekil 3.8. Kısa süreli fourier dönüşümü ile dalgacık dönüşümünün zaman ve frekans çözünürlükleri	20
Şekil 3.9. Daubechies-4 (db4) dalgacığı.....	21
Şekil 3.10. Filtreleme işleminin en temel seviyede gösterimi	21
Şekil 3.11. Beş seviyeli ayrıştırma	22
Şekil 3.12. Zaman düzleminde fsrttest ile S1 kişinin EOG yatay bileşen için özellik seçimi	25
Şekil 3.13. Zaman düzleminde fsrttest ile S1 kişinin EOG dikey bileşen için özellik seçimi	25
Şekil 3.14. Zaman düzleminde fsrnca ile S1 kişinin EOG yatay bileşen için özellik seçimi	27
Şekil 3.15. Zaman düzleminde fsrnca ile S1 kişinin EOG dikey bileşen için özellik seçimi	28
Şekil 3.16. Zaman düzleminde fsrmrmr ile S1 kişinin EOG yatay bileşen için özellik seçimi	30
Şekil 3.17. Zaman düzleminde fsrmrmr ile S1 kişinin EOG dikey bileşen için özellik seçimi	31
Şekil 3.18. Zaman düzleminde rrelieff ile S1 kişinin EOG yatay bileşen için özellik seçimi	33
Şekil 3.19. Zaman düzleminde rrelieff ile S1 kişinin EOG dikey bileşen için özellik seçimi	33
Şekil 3.20. Beş kat çapraz doğrulama	37
Şekil 4.1. Zaman düzleminde fsrfttest için GPR algoritmasıyla S1 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açı değerleri (b) hata değerleri.....	49
Şekil 4.2. Zaman düzleminde fsrfttest için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) Açı değerleri (b) Hata değerleri.....	50
Şekil 4.3. Zaman düzleminde fsrnca için RTE algoritmasıyla S1 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açı değerleri (b) hata değerleri.....	51
Şekil 4.4. Zaman düzleminde fsrnca için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) Açı değerleri (b) Hata değerleri.....	52

Şekil 4.5. Zaman düzleminde fsmrmr için GPR algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	53
Şekil 4.6. Zaman düzleminde fsmrmr için SVM algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	54
Şekil 4.7. Zaman düzleminde rrelieff için GPR algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	55
Şekil 4.8. Zaman düzleminde rrelieff için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	56
Şekil 4.9. Zaman düzleminde sequentials için RTE algoritmasıyla S1 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	57
Şekil 4.10. Zaman düzleminde sequentials için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	58
Şekil 4.11. Frekans düzleminde fsrftest için SVM algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	68
Şekil 4.12. Frekans düzleminde fsrftest için GPR algoritmasıyla S4 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	69
Şekil 4.13. Frekans düzleminde fsrnca için RTE algoritmasıyla S1 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	70
Şekil 4.14. Frekans düzleminde fsrnca için GPR algoritmasıyla S4 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	71
Şekil 4.15. Frekans düzleminde fsmrmr için RT algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	72
Şekil 4.16. Frekans düzleminde fsmrmr için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	73
Şekil 4.17. Frekans düzleminde rrelieff için SVM algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	74
Şekil 4.18. Frekans düzleminde rrelieff için SVM algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	75
Şekil 4.19. Frekans düzleminde sequentials için GPR algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	76
Şekil 4.20. Frekans düzleminde sequentials için GPR algoritmasıyla S4 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	77
Şekil 4.21. Zaman-frekans düzleminde fsrftest için RTE algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	87
Şekil 4.22. Zaman-frekans düzleminde fsrftest için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	88
Şekil 4.23. Zaman-frekans düzleminde fsrnca için RT algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	89
Şekil 4.24. Zaman-frekans düzleminde fsrnca için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	90
Şekil 4.25. Zaman-frekans düzleminde fsmrmr için SVM algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	91
Şekil 4.26. Zaman-frekans düzleminde fsmrmr için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	92

Şekil 4.27. Zaman-frekans düzleminde rrelieff için RTE algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	93
Şekil 4.28. Zaman-frekans düzleminde rrelieff için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri	94
Şekil 4.29. Zaman-frekans düzleminde sequentials için RTE algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	95
Şekil 4.30. Zaman-frekans düzleminde sequentials için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri.....	96



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Kullanılan özniteliklerin zaman düzleminde matematiksel ifadeleri ile ilgili tablo.....	16
Tablo 3.2. Kullanılan özniteliklerin frekans düzleminde matematiksel ifadeleri ile ilgili tablo.....	19
Tablo 3.3. Kullanılan özniteliklerin zaman-frekans düzleminde matematiksel ifadeleri ile ilgili tablo	23
Tablo 3.4. Fsrftest yöntemi ile seçilen öznitelikleri	24
Tablo 3.5. Fsrnca yöntemi ile seçilen öznitelikler.....	27
Tablo 3.6. Fsrmmr yöntemi ile seçilen öznitelikler	30
Tablo 3.7. RreliefF yöntemi ile seçilen öznitelikleri	32
Tablo 3.8. Sequentials yönteminin GPR makine öğrenmesiyle seçtiği öznitelikler.....	34
Tablo 3.9. Sequentials yönteminin SVM makine öğrenmesiyle seçtiği öznitelikler.....	35
Tablo 3.10. Sequentials yönteminin RT makine öğrenmesiyle seçtiği öznitelikler	35
Tablo 3.11. Sequentials yönteminin RTE makine öğrenmesiyle seçtiği öznitelikler.....	36
Tablo 4.1. Zaman düzleminde fsrftest öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları.....	42
Tablo 4.2. Zaman düzleminde fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları.....	43
Tablo 4.3. Zaman düzleminde fsrmmr öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları.....	44
Tablo 4.4. Zaman düzleminde rrelieff öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları.....	46
Tablo 4.5. Zaman düzleminde sequentials öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları	47
Tablo 4.6. Zaman düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde bireyler için en düşük RMSE hata metriği ve açısal hatası.....	48
Tablo 4.7. Zaman düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde ortalama RMSE hata metriği ve açısal hatası	59
Tablo 4.8. Frekans düzleminde fsrftest öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları.....	61
Tablo 4.9. Frekans düzleminde fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları.....	62
Tablo 4.10. Frekans düzleminde fsrmmr öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları	63
Tablo 4.11. Frekans düzleminde rrelieff öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları.....	65
Tablo 4.12. Frekans düzleminde sequentials öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları	66
Tablo 4.13. Frekans düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde bireyler için en düşük RMSE hata metriği ve açısal hatası.....	67

Tablo 4.14. Frekans düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde ortalama RMSE hata metriği ve açısal hatası	78
Tablo 4.15. Zaman-frekans düzleminde fsrftest öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları	80
Tablo 4.16. Zaman-frekans düzleminde fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları	81
Tablo 4.17. Zaman-frekans düzleminde fsmrmr öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları	82
Tablo 4.18. Zaman-frekans düzleminde rrelieff öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları	84
Tablo 4.19. Zaman-frekans düzleminde sequentials öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları.....	85
Tablo 4.20. Zaman-frekans düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde bireyler için en düşük RMSE hata metriği ve açısal hatası	86
Tablo 4.21. Zaman-frekans düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde ortalama RMSE hata metriği ve açısal hatası.....	97
Tablo 4.22. Bu çalışmanın literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması.....	98

1. GİRİŞ

İnsanlar çeşitli kazalar sonucunda farklı organ ya da sistemlerinde meydana gelen deformasyonlar sonucunda engelli duruma düşmektedirler. Bir başka insana ihtiyaç duymadan hayatsal fonksiyonlarını yerine getirebilmek için çeşitli teknikler ve aletlerle ihtiyaçları karşılanabilmektedir (Usaklı & Gurkan, 2010).

Günümüzde üretilen cihazların kontrolü (Dokunmatik ekrana fare tıklaması, basit dokunuşlar ve düğmeye basılması gibi) basitleştirilmiştir. Buna ek olarak, günümüzdeki bazı hastalıklarda (Amyotrophic Lateral Skleroz (ALS) veya İnme hastalığı gibi) yukardaki işlemleri gerçekleştirmek bile imkansız hale gelebilmektedir. Okülomotor sistem, bu rahatsızlıklardan etkilenmemektedir. Bu olumsuzlukları azaltmak için insan bilgisayar arayüzlü (HCI) sistemler kullanılmaktadır.

İnsan bakışlarının bilgisayar sistemlerine girdi olarak iletilmesini sağlayan teknoloji ürünleri günümüzde oldukça yükseliştir. Literatürde insanların bakışlarını izleme ve değerlendirme hatta tahmin etme tekniklerinin örnekleri oldukça yaygındır. Psikoloji alanında okülogram sistemler oldukça revaçtadır (Henderson, 2003; Hutton, 2008; Liversedge & Findlay, 2000). Araç sürücülerinin yorgunluklarının tespit edilmesinde de kullanılmaktadırlar (Wen-Bing et al., 2004). Bunlara ek olarak web sayfa tasarımında (Goldberg et al., 2002) ve reklamcılıkta da (Berger et al., 2012) yer edinmektedirler. İnsan-bilgisayar ara yüzlerinde bakışlarla etkileşiminin fare kullanımından daha efektif ve hızlı olduğu da kanıtlanmıştır (Sibert & Jacob, 2000).

Göze dayalı HCI'ler genel olarak, kullanıcının hareketlerini kaydetmektedir. Bu sistem kullanıcının oküler pozunu tahmininde görüntü işleme algoritmalarını kullanırken göz hareketi kayıt tekniği olan video okülografiye (VOG) başvurulmaktadır (Barbara et al., 2019). Bu teknik hesaplama bakımından çok maliyetli olduğu gibi, aynı zamanda aydınlatma şartları ve kullanıcı hareketleri de çok efektif bir rol oynamaktadır. Göz takibi ile ilgili güncel teknikler arasında kızılötesi kamera(lar) kornea yansıma takibi (Ohno et al., 2002) ve pupilla takibi yer almaktadır (Ishiguro & Rekimoto, 2012). RGB kameralar sayesinde göz izleme teknikleri uygulanabilmektedir (Holland & Komogortsev, 2012; Wen-Bing et al., 2004). Bu kameralı teknikler, göz takibi sabit bir sistemle (Ohno et al., 2002), taşınabilir bir sistemle (Holland & Komogortsev, 2012) ya da giyilebilir bir şekilde kullanılabilmektedir (Ishiguro & Rekimoto, 2012).

Elektrookülografi (EOG) hesaplama açısından az maliyetli ve gözün ürettiği elektriksel aktiviteyi kaydedebilen bir kayıtlama tekniğidir (Miyashita et al., 2008). Bu yöntem yukarıda bahsedildiği gibi, maliyeti düşük, hızlı ve görüş alanını sınırlamayan bir yöntemdir. Elektrookülogramın, geniş göz izleme kabiliyeti vardır; örneğin, çok büyük veya çok hızlı göz hareketlerini algılamada başarılıdır. Ayrıca gözlerin açıklık veya kapalılık durumundan etkilenmemektedir. Bu özelliklerden dolayı, giyilebilir bir cihaz ile alınan EOG'ler kişinin günlük aktivitelerinde kişiye engel teşkil etmemektedir. Bu faydaları göz önüne alındığında göz hareketleri dizilerini tespit etmek için EOG'ler kullanılmıştır (Bulling et al., 2009; Bulling et al., 2011; Estrany et al., 2008; Manabe & Fukumoto, 2006).

Retinanın dinlenme potansiyeli, göz çevresine elektrotlar takılarak ölçülür ve göz hareketleri saptanmaya çalışılmaktadır (Bulling et al., 2009; Bulling et al., 2011; Estrany et al., 2008; Manabe & Fukumoto, 2006). İnsan gözünün pozitif ve negatif kutuplarını oluşturan kornea ve retinanın elektriksel bir dipol olarak işlev gördüğü bilinmektedir. Yukarıda bahsedilen dipollerin eksenleri, gözün optik eksenleri ile yönlendirilir ve gözle birlikte dönmektedirler. Gözün ön ve arka bölgesi arasında, korneo-retina potansiyeli şeklinde bilinmektedir. Büyüklüğü ise 0.4-1.0 mV aralığındadır. Bu fark sayesinde bir elektrik alan meydana gelir ve bunlar tarafından üretilen elektriksel alan, yüze, gözlere çok yakın yerleştirilen elektrotlar ile zararlı (invazif) olmayan bir şekilde kayıt altına alınabilmektedir (Bulling et al., 2011).

EOG tabanlı bir ara yüzde, izleme doğruluk oranını azaltması sebebi ile kayma oluşturmamasından dolayı uygulamada bir takım problemler meydana getirmektedir. EOG değerlerinin temel kayması drifttir. Amplifikatör göz hareketi bileşenlerinin yanı sıra elektrot potansiyeli ve farklı gürültüleri de yansıtır ve bu nedenle taban çizgisi zamanla kademeli olarak bozulmaktadır. Kullanıcı baktığı hedefi değiştirmese bile, EOG'nin genliği değişebilmektedir. Bu durum, gözler hareket etmese bile tahmini göz açısının ilk duruma göre bozulduğunu göstermektedir. Sürüklenme, taban çizgisini bozması sebebiyle ve uzun olmayan sürelerde ihmal edilebildiğinden, EOG kayıtlarında sakkad genliği gibi göz hareketini takip etmede ve kaydetmede kullanılmaktadır. Ancak sürüklenme, daha uzun süreler için göz önüne alındığında ihmal edilmemektedir. Genellikle EOG'nin yanlış mutlak göz açısı vermesine neden olmaktadır (Manabe et al., 2015).

EOG sinyallerindeki taban çizgisi gezinme etkisi büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorun çözüme ulaştırılmazsa, deneğin mutlak bakış açısı (POG) tahminini hatalı bir şekilde sonuçlanmaktadır. Bunun nedeni, taban çizgisi kaymasının, hatalı bir şekilde gözlerin yavaş hareketi olarak değerlendirilmesi ve kendisini, gerçek ve tahmini POG arasında bir hata olarak belli etmesidir. EOG'deki temel gezinme etkisine çeşitli teknikler uygulanarak elimine edilebileceği literatürde karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, kullanılan teknikler ve parametreleri çoğunlukla keyfi olarak belirlenmektedir. Literatürde kullanılan bu tekniklerin uygunluk derecesine rastlanılmamaktadır. Yapılan araştırma, kullanılan teknikler için optimum parametre seçimi üzerine titiz bir şekilde eğilmektedir. Bu tekniklerin performansını değerlendirmek için gerçek denekler kullanılarak elde edilen EOG verileri kullanılmaktadır (Barbara et al., 2020a). Bu veriler diğer çalışmalara kaynak teşkil etmesi ve diğer çalışmalarla değerlendirebilmesi için açık erişimli veri seti haline getirilmiştir.

Sürüklenme problemini elimine etmek için birçok strateji denenmiştir. Bunların ilk olanı, sürüklenme probleminin olumsuzluklarını çözüm bulabilmek için dalgacık dönüşümü tekniğinden faydalanmak (Bulling et al., 2011) ve birçok(multiple) EOG kullanmaktır (Manabe & Fukumoto, 2006). Bu strateji, kayma problemini dikkate alınmama süresini uzatabilir fakat uzun süreler boyunca tahmin doğruluğunu garantileyemez. Birleştirilmiş EOG'ler sürüklenmenin üstesinden kolayca gelebilir (Yamagishi et al., 2006) ve mutlak göz açısını kolayca tahmin edebilir (Itakura & Sakamoto, 2010). Ancak, yavaş göz hareketlerinde başarısızdır, tahminlerinde hatalı açı okumaları çıkabilmektedir.

EOG tabanlı bakış tahminlerinde iki kalibrasyon vardır, bunlar; başlangıç ve ofset kalibrasyonlarıdır. Bunlardan ilki, bir kez gerçekleştirilmek koşuluyla bakış tahmininden önce yapılır, ardından bu işlemin ölçümleri elektrot konumları ve kullanıcılar arasındaki farklılıkları temel alan ayarlamalar yapmak için kullanılır. diğeri, genellikle sapmayı dengelemek için kullanılır. Basit olan Ofset kalibrasyonunu açıklamak gerekirse; kullanıcılar sabit bir noktaya baktırılır (Yagi et al., 2006). Ofset kalibrasyonu uyarılmış potansiyel kullansa da, kullanılan ışık kaynaklarından dolayı pratik uygulamalarda tercih edilmemektedir. Literatürde sakkad'a dayalı etkileşim şemasından çokça bahsedilmiştir (Bulling et al., 2009; Bulling et al., 2011; Estrany et al., 2008). Bunların etkili olduğu uygulamalar mevcuttur; fakat tasarım konusunda katı

kısıtlamalara sahiptir. Kısıtlanmaların önlenmesi için göz hareketlerinin peşi sıra kullanılması ofset kalibrasyonu için oldukça önemlidir. Fakat bu, ilave göz hareketine ihtiyaç duyulmasının nedeni gerekli sürenin yeteri kadar uzun olmadığıdır. Sürüklenme problemi geleneksel stratejiler ile çözülemez. Buna ek olarak, pratik uygulamalarda, sürüklenme problemi EOG tabanlı etkileşim için büyük bir engel teşkil etmektedir.

Literatüre bakıldığında EOG işaretlerindeki göz hareketlerinin voltaj ve açı arasındaki ilişki dikey ve yatay olarak ikiye ayrılmaktadır. EOG'nin yatay ve dikey sinyal bileşenleri ayrı ayrı analiz edilerek, bakış açıları ile EOG potansiyelleri arasındaki ilişki tahmininde bulunulabilir (Acuña et al., 2014; Itakura & Sakamoto, 2010; Miyashita et al., 2008). Literatürde EOG bileşen sinyalleri olan yatay ve dikey sinyaller birlikte işlenerek bir model vasıtası ile sunulmuştur (Lee et al., 2017). Bahsedilen çalışmada bu bileşenlerin oküler yer değiştirmelerle olan ilgisi detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Bunun yanında, EOG sinyallerindeki senkron olmayan göz hareketi tespiti ile yapılan çalışmalarda veri setlerinde, göz kırpmalarının belirlenmesi sadece dört (Tangsuksant et al., 2012; Usakli & Gurkan, 2010) veya sekiz yönde yer değiştirmenin ayrı sarkadik hareketlerine sahiptir (Bulling et al., 2011; Yamagishi et al., 2006).

Literatürdeki gelişmiş göz kırpma ve seğirme hareketleri, süre ve genlik sınırları kullanılarak tespit edilir (Bulling et al., 2011; Tangsuksant et al., 2012; Yamagishi et al., 2006).

Bu çalışma kapsamında bölümler şu şekilde oluşturulmuştur. Bölüm 2'de kaynak özetleri verilmiştir. Bölüm 3'de EOG sinyallerinin işlenmesi, zaman, frekans ve zaman-frekans düzleminde öznitelik çıkartılması, veri mühendisliği teknikleri, makine öğrenimi algoritmaları verilmiştir. Bölüm 4'de bulgular ve tartışma, son bölüm ise sonuçlar bölümünden oluşmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada kullanılan veri seti sayesinde veri setine katkıda bulunan deneklerin oküler pozlarına bağlı göz açısı yer değiştirmelerini düşük hata oranlarında tespit etmek amacıyla en iyi öznitelik vektör kümesinin araştırılması yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda EOG sinyallerinin yatay ve dikey bileşenlerinin ön işleme sürecinin yapılmasının ardından zaman, frekans, zaman-frekans düzlemlerinde

öznitelikleri çıkarılmıştır. Çıkarılan özniteliklerin fsrtest, fsrnca, fsmrmr, rrelieff ve sequentials öznitelik seçim yöntemi olmak üzere beş adet yöntem ile en iyi özniteliklerin seçimi yapılmıştır. Seçilen en iyi öznitelikler gauss process regression (gauss süreci regresyonu), destek vektör makine regresyonu, regresyon ağacı ve regresyon ağacı toplulukları olmak üzere dört adet makine öğrenim algoritmasında eğitilerek tahminler yaptırılmıştır ve göz açısı hataları ve ortalama karekök hatalarının hesaplanmasıyla performanslarının karşılaştırılması sağlanmıştır.

Bu çalışma, daha sonra bu konuda yapılacak çalışmalara temel kaynak oluşturacaktır.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu çalışmada, EOG sinyallerinin yatay ve dikey bileşenleri ayrı ayrı işlenip, öznitelik çıkartımı yapılarak, veri mühendisliği teknikleri kullanılarak, etkili yöntemler ile öznitelik seçimi yapıp makine öğrenimi algoritmalarından faydalanılarak göz açısı tahminlerinde düşük hata oranı verecek veri kümesinin araştırılması çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürü incelediğimizde biyolojik sinyalleri kullanarak birçok çalışma yapılmıştır. Bu biyolojik sinyaller arasında EOG sinyalleri bunlardan biridir. EOG sinyallerini kullanarak biyomedikal sinyal işleme ve yapay zeka ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar incelenerek özetlenmiştir.

Lopez ve Ferrero yaptıkları çalışmada EOG verilerine dayalı bir sistemde doğru komutları üretmek için sinyal gürültüsünün giderilmesi, özellik çıkarımı, sinyalin sınıflandırılması ve karar verme yapılması gerekmektedir. Sistemde karar verme, farklı göz hareketlerinin ayırt edilmesi ile gerçekleşmektedir. Ayırt etme işlemi seçirmelerin, fiksasyonların ve göz kırpmaların saptanmasına dayalı olarak yapay zeka (AI) algoritmalarının kombinasyonları kullanılarak gerçekleştirilir (López & Ferrero, 2023).

Murugan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kazalarda oluşabilecek ölüm, yaralanma ve maddi kayıpları engellemek için sürücünün EOG sinyallerinden faydalanılmıştır. Yorgunluk, uyuşukluk, görsel ve bilişsel dikkatsizlik tespit etmek için 10 sürücünden toplanan veriler ön işlemeden geçirildikten sonra 17 adet özellik çıkarımı yapılmıştır. ANOVA (varyans analizi) istatistiksel olarak anlamlı özellikleri seçmek için kullanılmıştır. Temel bileşen analizi (PCA) ile azaltılarak, destek vektör makinesi, k-en yakın komşu ve topluluk (ensemble) kullanılmıştır. Normal ve bilişsel sınıfların sınıflandırılmasında %98.7 doğruluk elde edilmiştir. Yorgunluk, uyuşukluk, görsel ve bilişsel dikkatsizlik tespitinde %90.9 doğruluk tespit edilmiştir (Murugan et al., 2023).

Shi ve Wang yaptıkları çalışmada, sürücülerin yorgunluk tespiti için, derin öğrenmeye dayalı uzun kısa süreli bellek (LSTM) kullanılmıştır. LSTM sinir ağı, biyomedikal sinyal işlemede kullanılan bir tür tekrarlayan sinir ağıdır (RNN). 23 kişinin katıldığı veri seti EOG ve EEG verilerinden oluşmaktadır. EOG verilerinden özellik çıkartımı için dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. EEG ve EOG sinyallerinin özelliklerini konvolüsyonel otokodlayıcı (CAE) ile birleştirilmiştir. CAE ağı ile LSTM ağının kayıp fonksiyonu olarak kök ortalama kare hatası (RMSE) ve Pearson korelasyon katsayısı (COR) kullanılmıştır. EEG ve EOG sinyallerinin tamamlayıcı yorgunluk bilgisi sebebiyle Ortalama RMSE/COR 0.08/0.96 elde edilmiştir (Shi & Wang, 2023).

Sedik ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sürücü yorgunluk tespiti için DROZY veri seti gibi sürücü aktivitelerini tespit etmek için elektroensefalogram (EEG), elektrookülogram (EOG), elektrokardiyogram (EKG) ve elektromiyogram (EMG) verilerini içeren veri seti kullanıldı. Makine öğrenimi ve derin öğrenme sınıflandırıcıları ile hızlı fourier dönüşümü (FFT) ve ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) tabanlı bir yorgunluk tespit sistemi önerilmektedir. FFT ve DWT, özellik çıkartımı ve gürültü giderilmesi için önerilmektedir. 1D evrişimsel sinir ağları (CNN), k-en yakın komşu (KNN), lojistik regresyon (LR), çok katmanlı algılayıcı (MLP) ve dörtlü veri analizi (quadrature data analysis) (QDA) kullanılmıştır. Yorgunluk tespitinde ikili ve çoklu sınıf başarıları sırasıyla %90 ve %96 olarak elde edilmiştir (Sedik et al., 2023).

Hossieny ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ağır hareket engeli olan hastaların dış çevreyle etkileşime girmelerini ve iletişim sağlamalarını sağlamak için EOG sinyallerinden faydalanmaktadır. Altı göz hareketini (yukarı, aşağı, sağ, sol ve göz kırpması) algılamak için yatay ve dikey göz sinyallerini evrişimsel sinir ağı (CNN), görsel geometri grubu (VGG) ve başlangıç (inception) olmak üzere 3 adet derin öğrenme modeli kullanılmıştır. Başlangıç modelinin %96.4 ile en iyi sonucu vermektedir (Hossieny et al., 2023).

Kuo ve Chen yaptıkları çalışmada, uyku sorununu tespit etmek için tek kanallı uyku EOG'sine dayalı uykusuzluk tespit sistemi önerilmektedir. Veri setindeki 32 katılımcının 16 tanesi sağlıklı bireylerden geri kalanı ise uykusuzluk hastası olan bireylerden oluşmaktadır. SVM sınıflandırıcısını eğitmek için 16 deneğin yarısı sağlıklı diğer yarısı uykusuzluk hastalarından seçilmiştir. Sistemin ortalama doğruluk başarımı %89.31'dir (Kuo & Chen, 2020).

Panigrahi ve Bisoy yaptıkları çalışmada, göz hareketlerini analiz ederek kullanıcının niyetini anlamak amacıyla EOG tabanlı insan bilgisayar ara yüzü sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler sola, sağa, yukarı veya aşağı bakma gibi sınırlı sayıda göz hareketlerini kullanmaktadır. Doğrusal regresyon ve dalga biçiminin algılanmasıyla tespit edilen göz kırpmalar ile 24-bulmacayı çözmek için HCI sistem önermektedir. 18 ile 65 yaş arası değişen katılımcılar ile çevrimiçi olarak gerçekleştirilen deneyde ortalama doğruluk %79 olarak elde edilmiştir (Panigrahi & Bisoy, 2023).

Lopez ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sakkadik göz hareketlerini modellemek için gauss karışım modeli algoritması kullanılmıştır. Veri setindeki yatay

sakkadlar, 34 yaşındaki erkek katılımcıdan elde edilmiştir. Modelin RMSE başarımı 6.45’dir (López et al., 2022).

Shah ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sürücünün bakış bilgilerini elde etmek ve iletmek için bakış izleme sistemi kullanmıştır. Yatay ve dikey yönlü bakışlardan oluşan 25-40 yaş arası 30 kişi ile veri seti oluşturulmuştur. Çalışmada (YOLO-V4) yüz dedektörü ve inception ResNet-v2 CNN modeli kullanılmıştır. Bakış tahminleri dikey için 2.68 ve yatay bakış için ise 3.61 RMSE’ye ulaşılmıştır (Shah et al., 2022).

Zhu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, EOG sinyallerinin göz hareketi açılarını tahmin edilmesi için bir yaklaşım önerilmektedir. Doğrusal olmayan bir polinom yöntemi kullanan çalışma, 18 denek üzerinden deneysel sonuçlar almıştır. Bu sonuçlarda, açıda yatay tahmin hatası 3.5° az olduğu bulunmuştur. Önerilen model sayesinde geniş alanlı göz açısı değişimlerini düşük maliyetlerle karşılanabilmektedir (Zhu et al., 2022).

Ileri ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, disleksinin tespit ve teşhisi için EOG sinyalleri kullanan bu çalışmada 1D CNN önerilmiştir. Bu çalışmada farklı yazı karakterlerine sahip metinlerin okuma esnasında kaydedilen EOG sinyallerinin disleksi tanısında kullanılması amaçlanmaktadır. Kaydedilen EOG sinyalleri hem yatay hem de dikey bileşenlerde kaydedildi ve böylece bu bileşenlerin disleksi saptamadaki başarısı karşılaştırıldı. 1D CNN sayesinde herhangi bir manuel özellik çıkarımı olmadan, kullanılan 1D CNN’nin özellik çıkarımı sayesinde yatayda %98.70 ve dikeyde %80.94 ile etkili bir sınıflandırma performansı sağlanmıştır (Ileri et al., 2022).

Lopez ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, EOG tabanlı insan-bilgisayar ara yüzlerinin (HCI) kontrolü için literatürde kullanılan sınıflandırma teknikleri karşılaştırılmaktadır. Statik eşik, k-en yakın komşular (KNN), yapay sinir ağı (ANN) ve destek vektör makinesi (SVM) teknikleri, iki yeni sınıflandırıcı topluluğu ile birlikte. Biri bir oylama şemasına dayanırken, diğeri KNN, SVM ve ANN sınıflandırıcılarından gelen sonuçları kodlamak için iki aşama kullanır. Tüm sınıflandırıcılar, gerçek zamanlı olarak en uygun yaklaşımı seçmek için dört parametreye (kesinlik, özgüllük, duyarlılık ve doğruluk) dayalı olarak karşılaştırılmaktadır. Makine öğrenimi tabanlı modellerin, EOG tabanlı bir HCI’nın sürekli kullanımı için daha sağlam olduğu kanıtlanmaktadır (López et al., 2023).

Meeravali ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, elektrookülografi (EOG) sinyallerinin parazitini gidermek için kullanılabilecek verimli bir dalgacık tabanlı mimari tasarlanmış ve sunulmuştur. Hem sinyal hem de gürültü için aynı bant genişliğinin paylaşılması nedeniyle, EOG sinyallerinde yer alan gürültülerin azaltılması zordur. Bu çalışmada, MATLAB yazılımındaki db4 gibi dalgacık mimarisi yöntemlerinin yanı sıra değerlendirme için nitelikleri de gösteren ve ayrıca db3 gibi mevcut önerilen yöntemlerle karşılaştıran sinyal gürültü oranı (SNR) ve ortalama kare hata (MSE) gibi dalgacık mimarisi yöntemlerinin tasarlanmasını kapsamaktadır (Meeravali et al., 2022).

Al-Zubaidi ve Aras yaptıkları çalışmada, yedi farklı istemli göz hareketinden elde edilen elektrookülografi işaretlerinin insan-bilgisayar arayüzünde kullanılabilmesi için uygun öznelik ve sınıflandırma yöntemleri araştırılmıştır. Sıralı ileri öznelik seçim yöntemi kullanılarak birçok öznelikten en iyi sonucu veren kombinasyon belirlenerek sistemin başarısı artırılmaktadır. Geliştirilen yöntem yedi sınıflı veri setinde %93,9 başarı oranına ulaşmıştır. Sonuçlar insan-bilgisayar arayüzü kontrolünün istemli göz hareketleri ile yüksek doğrulukta yapılabileceğini göstermektedir (Al-Zubaidi & Aras, 2022).

Do ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, makine öğrenme tekniklerini uygulayarak EOG kontaminasyonunu ortadan kaldırmak için bir yöntem önerdiler. 12 elektrottan gelen sinyalleri kaydetmek için Alice 5 Polisomnografi sistemini kullanarak 20 sağlıklı denekten oluşan bir EEG veri tabanı elde ettiler. EEG kanallarından rastgele seçilen 15 saniyelik veri segmentleri, 10 bağımsız bileşen (IC) ile sonuçlanan bağımsız bileşen analizi (ICA)'yı çalıştırmak için kullanarak her bir IC için topografya haritasını çizip bu IC'nin "EOG" veya "EOG olmayan" olup olmadığını etiketlediler. IC'ler, topografya haritaları ve etiketlerin toplam 612 etiketli veri noktası toplandı. Çapraz doğrulama kullanarak model eğitimi ve değerlendirmesi için birkaç sınıflandırıcı uyguladıktan sonra, en iyi sınıflandırıcı olan son derece rastgele ağaç (extremely randomized tree)'de ortalama doğruluğu %92 elde ettiler (Do et al., 2022).

Kim ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ticari bir VR HMD cihazıyla, gözlerin etrafına yerleştirilmiş on elektrot kullanarak facial electromyogram (fEMG) ve EOG tabanlı bir FER sistemi uyguladılar. FER sistemi, fEMG sinyallerinden beş farklı dudak hareketi ve iki farklı kaş hareketi dahil olmak üzere çeşitli yüz hareketlerini sürekli olarak yakalayabilir. Aynı elektrotlar kullanılarak göz kırpmalarının ve göz

bakış yönlerinin tespiti için EOG tabanlı bir göz izleme sistemi de uygulandı. Bu iki teknoloji, kullanıcının yüz ifadelerini gerçek zamanlı olarak gerçekçi bir avatar yüzüne başarılı bir şekilde kopyalayabilen gerçek zamanlı bir yüz hareketi yakalama sistemi uygulamak için aynı anda kullanıldı (Kim et al., 2023).

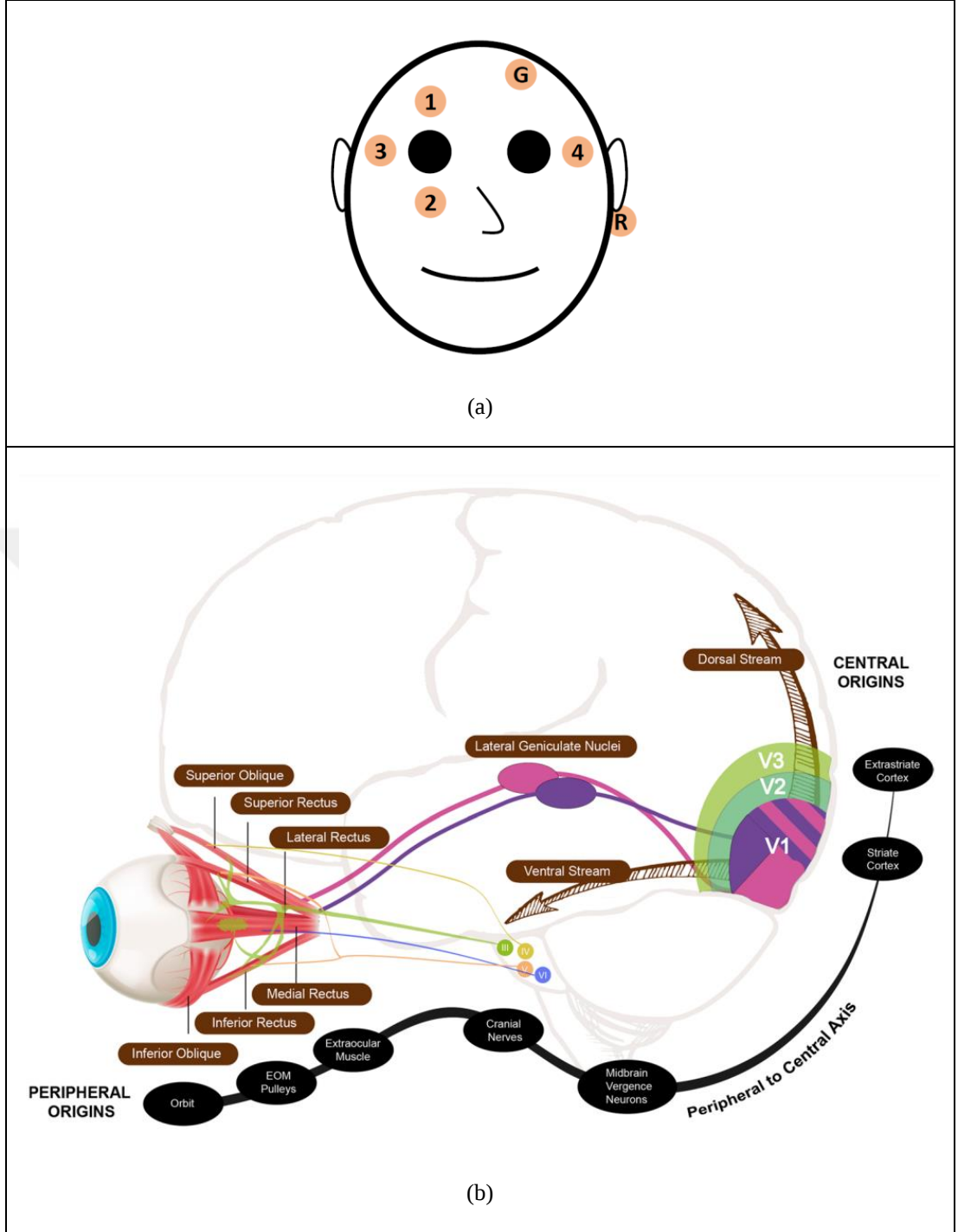
Borchardt ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, minimal invaziv bir bilgisayar/oyun ara yüzü için göz hareketlerini izlemek üzere elektrookülogram (EOG) sinyalleri elde etmek için bir kurulum geliştirmişlerdir. Bu çalışma, bir veri setinin kurulmasını ve oluşturulmasını, toplanan sinyallerin öznitelik çıkarımını ve sınıflandırma algoritmalarının uygulanmasını içerir. EOG sinyallerini özelliklerine göre sınıflandırmak için üç makine öğrenimi algoritması tasarlandı: Softmax regresyonu, gauss diskriminant analizi (GDA) ve k-en yakın komşular (KNN). Algoritmaların sınıflandırma performanslarını karşılaştırıldığında KNN, %88,9 genel doğrulukla en iyi sonuçları sundu (Borchardt et al., 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

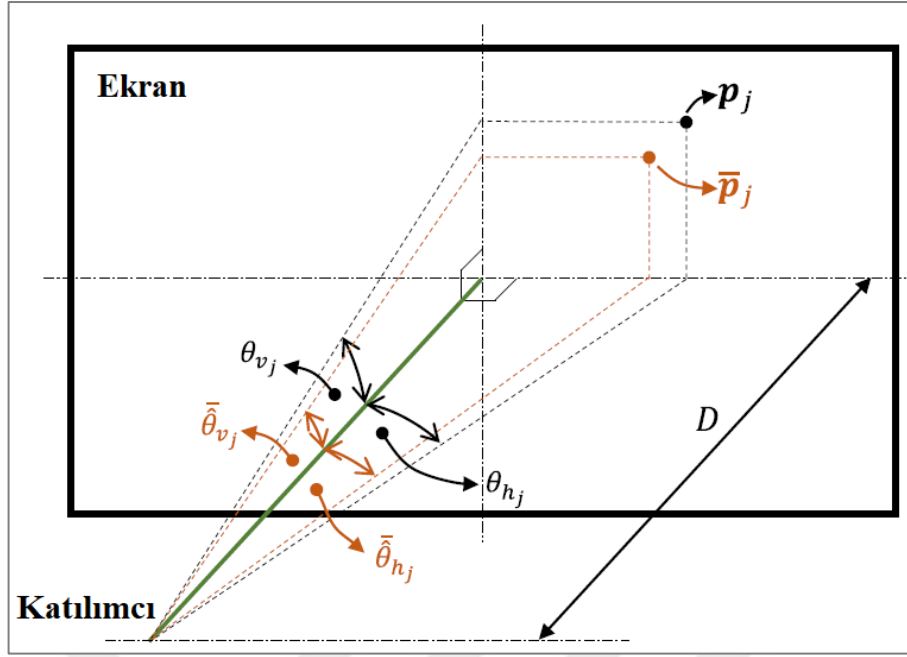
3.1. Veri Setinin Elde Edilmesi ve Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan veri seti barbara ve arkadaşlarının (Barbara et al., 2020a) çalışmasında kullanılan veri setidir. Veri setinde 6 sağlıklı katılımcı (2 erkek, 4 kadın), katılımcıların yaş ortalaması ise 24.7 ± 3.1 olup göz hareketleri verilerini içermektedir. Bu veri seti oluşturulurken 3 ve 4 numaralı elektrotlar lateral kanti'ye bitişik olarak, 1 ve 2 numaralı elektrotlar sağ gözün üstüne ve altına, geriye kalan toprak(G) elektrotu altına, referans (R) elektrotu sol kulağın arkasındaki mastoide şekil 3.1. (a)'daki gibi yerleştirilmiştir. Şekil 3.1. (b)'de gözü hareket ettiren kas yapıları görülmektedir. İnsan gözünün yapısı gereği ön ve arka bölgesi arasında korneo-retinal potansiyel olarak adlandırılan EOG işareti büyüklüğü 0,4–1,0 mV (Barbara et al., 2020a) ve frekansı ise 0-50 Hz (López et al., 2017) bant aralığında değişmektedir.

EOG verilerinin elde edilmesi sırasında, katılımcıların başları sabit tutularak 24 inçlik bir monitörden 60 cm uzaklığa konumlandırılmaktadır. Ardından katılımcıların bakış noktaları (POG) ekranda belirtilen bir işarete odaklanarak bakışlarının sabitlenmesi istenmektedir. 4s'lik denemeler kaydedilmiştir. İlk bir saniyede katılımcılardan sakkad gerçekleştirilmesi istenilmektedir. Sonraki 1s'de hedeften ekranın ortasına geri dönüş, son iki saniyede ise göz kırpma hareketi kaydedilmiştir. Her seansta 100 deneme kaydedilerek toplam 300 adet bu tür deneme kaydedilmiştir. Bu kayıtlar yüksek kalite elektrot kullanarak kaydedilmiştir. Bu EOG sinyallerinin örnekleme frekansı 256Hz'dir. 0-30 Hz arasında bir bant geçiren filtre ve 50 Hz'lik bir çentik filtresi kullanılarak süzülmüştür. Veri setindeki açı hesaplaması, $(\bar{\theta}_{h_j}, \bar{\theta}_{v_j})$ ve $(\theta_{h_j}, \theta_{v_j})$ şekil 3.2.'deki trigonometrik model kullanılarak ekranda karşılık gelen tahmini ve gerçek POG koordinatlarına, $(\bar{p}_j)$ ve (p_j) 'ye eşlenmektedir. Ardından $e_j = \|\bar{p}_j - p_j\|$ ile belirlenmektedir. D, katılımcı ile ekran arasındaki mesafedir. $\bar{p}_j = (D \tan \bar{\theta}_{h_j}, D \tan \bar{\theta}_{v_j})$ ve $p_j = (D \tan \theta_{h_j}, D \tan \theta_{v_j})$ 'dir.

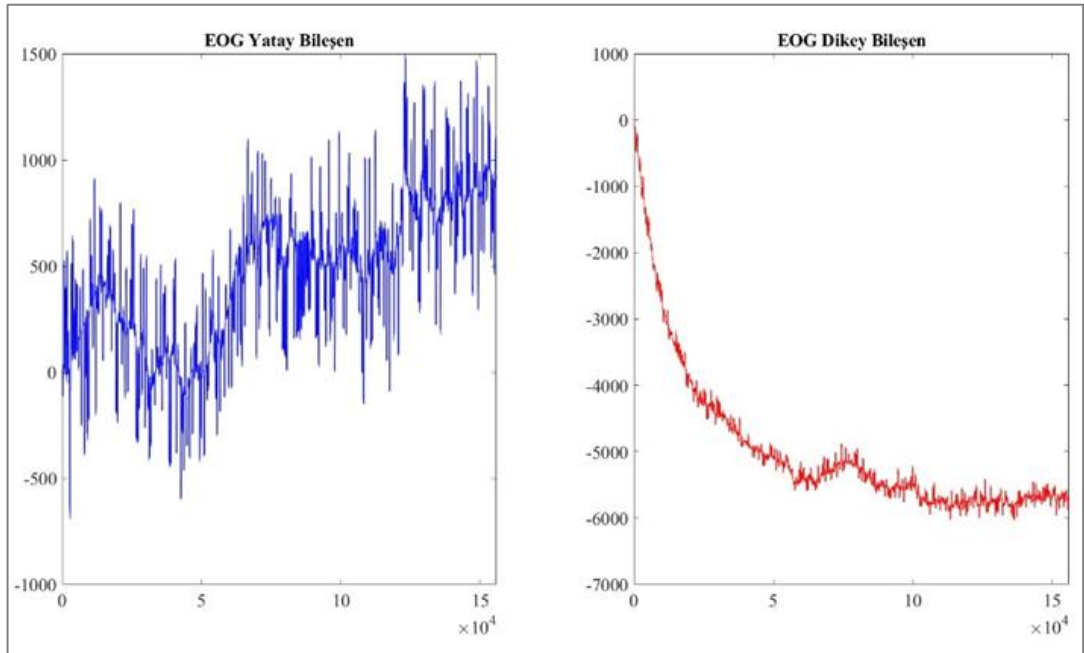


Şekil 3.1. (a) EOG elektrot yerleşimi (Barbara et al., 2020a), (b) İnsan göz kasları (Sunyer-Grau et al., 2023)



Şekil 3.2. Göz açısını ve ekrandaki hedefi koordinat konumlarıyla ilişkilendiren trigonometrik model (Barbara et al., 2020a)

Kullanılan veri setinin formatı ise (.mat) formatındadır ve üç bileşenden oluşmaktadır. Birincisi “EOG.mat” olup işaretin yatay ve dikey bileşenlerini içermektedir. İkincisi “ControlSignal.mat” , “EOG.mat” ile aynı boyutta bir kontrol sinyali içermektedir. Sonuncusu ise “TargetAngles.mat” olup mutlak bakış açılarından oluşmaktadır (Barbara et al., 2020a). Şekil 3.3.’de ham EOG bileşenleri verilmektedir.

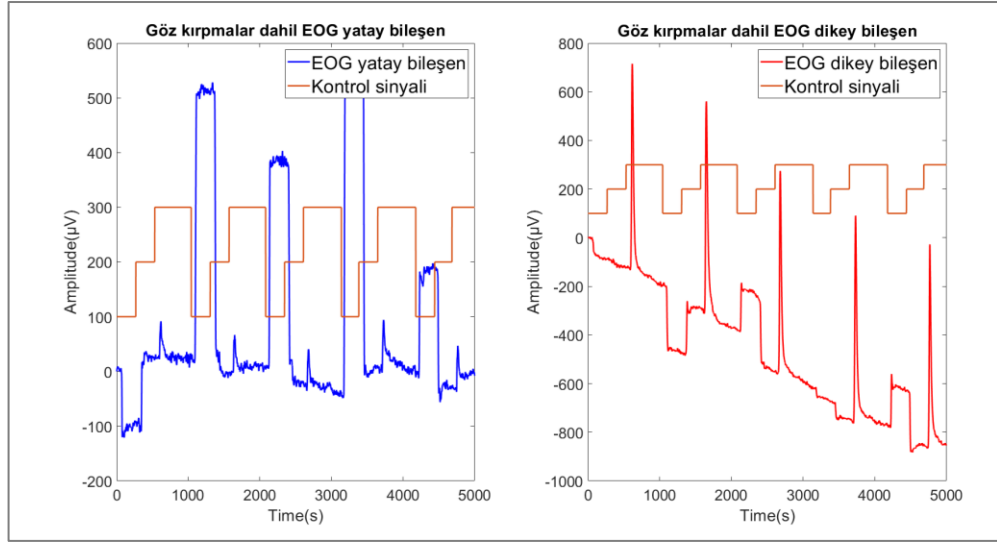


Şekil 3.3. Ham EOG bileşenleri

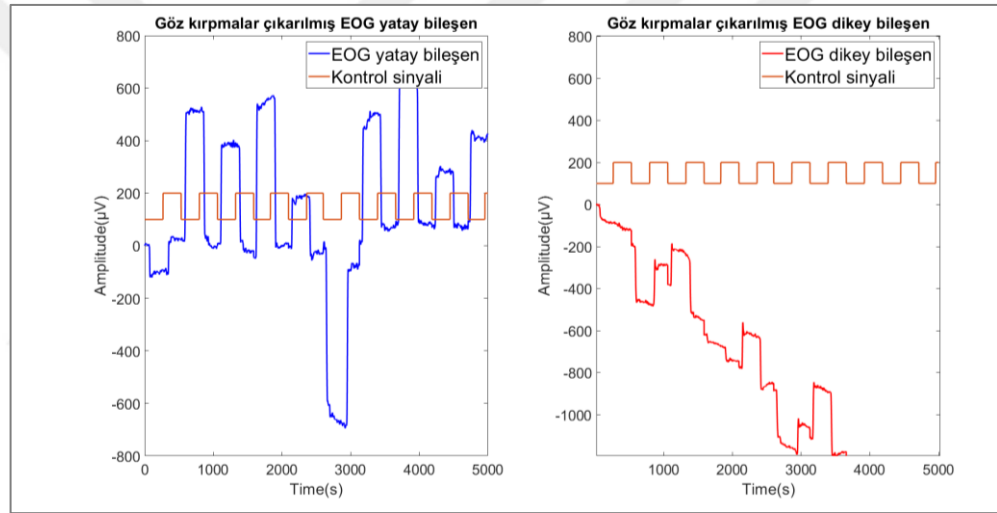
3.2. Eldeki Verilerin İşlenmesi

Veri seti incelendiğinde taban hattı kayması sorununun sinyali etkilediği görülmüştür. Taban hattı kaymasına elektrot polarizasyonu, değişen elektrot temas basıncı ve terleme sonucu cilt direncindeki değişiklikler sebep olmaktadır ve düşük frekanslı bir sinyal olarak ortaya çıkmaktadır (Barbara et al., 2020a). Dikey EOG bileşeninde taban hattı kaymasının, yatay EOG bileşenine göre daha fazla olmasının sebebi refleks olarak gözün kırpma hareketinin olması ve bu kırpma hareketinin dikey bileşende daha fazla ortaya çıkması olarak ifade edilebilir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için yüksek geçiren filtre uygulanmıştır. Bu filtrenin kesim frekansı 0.03 Hz, örnekleme frekansı olarak da 256 Hz uygulanmıştır (Barbara et al., 2020b).

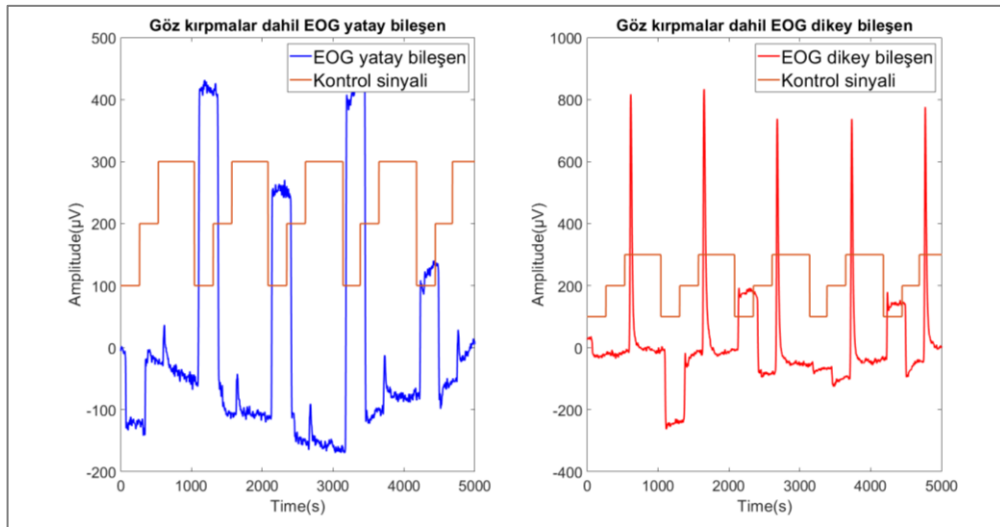
Bu çalışmada göz açısı değeri tahmini yapılacağından dolayı kullanılmakta olan veri setindeki göz kırpmaları “ControlSignal.mat” vasıtasıyla atılarak veriler işlenmeye başlanmıştır. Bu sayede tahmin edilecek açı değerleri ve gözün hareketi sırasında oluşturduğu voltaj değerleri elde edilmiştir. Sonrasında her hareket sırasında oluşan EOG sinyaline karşılık gelen açısal değeri eşleştirmesinin yapılması için “ControlSignal.mat” sinyalinin türevi alınmıştır. Bu işlemin amacı her bir hareketin başlangıç ve bitiş indislerinin belirlenmesi ve veri kaybının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.4.’de EOG sinyalinin göz kırpmalarını içeren ve taban hattı kayma sorununu gösteren hali verilmiştir. Şekil 3.5.’de EOG sinyalinin göz kırpmaları çıkarılmış ve taban hattı kayma sorununu gösteren hali verilmiştir. Şekil 3.6.’da EOG sinyalinin göz kırpmalarını içeren ve taban hattı kayma sorununu giderilmiş hali verilmiştir. Şekil 3.7.’de EOG sinyalinin göz kırpmaları çıkarılmış ve taban hattı kayma sorununu giderilmiş hali verilmiştir.



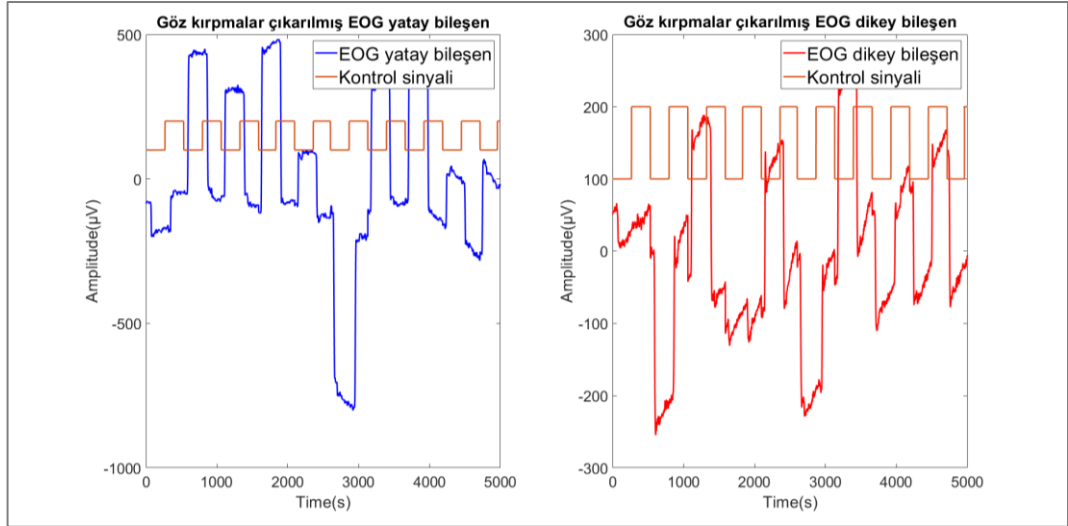
Şekil 3.4. Göz kırpmalarını içeren EOG yatay ve dikey bileşenin taban hattı kayması



Şekil 3.5. Göz kırpmaları çıkarılmış EOG yatay ve dikey bileşenin taban hattı kayması



Şekil 3.6. Göz kırpmalarını içeren EOG yatay ve dikey bileşenin taban hattı sorunu giderilmiş hali



Şekil 3.7. Göz kırpmalarını çıkarılmış EOG yatay ve dikey bileşenin taban hattı sorunu giderilmiş hali

3.3. Öznitelik Çıkarımı

Bu bölümde veri setinden özniteliklerin çıkarılması anlatılacaktır. Bu çalışmada zaman, frekans ve zaman-frekans öznitelikleri kullanılmıştır. Öznitelikler MATLAB ortamında çıkarılmıştır.

3.3.1. Zaman Düzleminde Öznitelik Çıkarımı

Zaman düzlemindeki özniteliklerin çıkarım yöntemleri ve denklemleri aşağıdaki tablo 3.1.'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Kullanılan özniteliklerin zaman düzleminde matematiksel ifadeleri ile ilgili tablo

NO	Yapılan işlem	Denklem
1	Ortalama Karekök (Zengin et al., 2019)	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n ^2}$
2	Ortalama (Zengin et al., 2019)	$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$
3	Mutlak Maksimum (Cruz et al., 2015)	$x_{\max} = \max(x) $
4	Basıklık (Deeb et al., 2017)	$x_{\text{kur}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2}$
5	Çarpıklık (Deeb et al., 2017)	$x_{\text{skw}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}}$
6	Varyasyon Katsayısı (Zengin et al., 2019)	$DK = (S/\bar{x}) * 100$
7	Geometrik Ortalama (Zengin et al., 2019)	$G = \sqrt[n]{x_1 + \dots + x_n}$

Tablo 3.1. (devam)

NO	Yapılan işlem	Denklem
8	Harmonik Ortalama (Zengin et al., 2019)	$H = \frac{n}{(1/x_1) + \dots + (1/x_n)}$
9	Varyans (Zengin et al., 2019)	$V = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N A_i - \mu ^2$
10	Ortanca Değer (Zengin et al., 2019)	$\tilde{x} = \begin{cases} \frac{x_{n+1}}{2}, \text{ tek} \\ \frac{x_n + x_{n+1}}{2}, \text{ çift} \end{cases}$
11	Ortalama Enerji (Zengin et al., 2019)	$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$
12	Standart Sapma (Zengin et al., 2019)	$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N A_i - \mu ^2}$
13	Standart Hata(std hata) (Zengin et al., 2019)	$S_{\bar{x}} = S/\sqrt{n}$
14	Şekil Faktörü (Zengin et al., 2019)	$SF = \frac{x_{rms}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i }$
15	Çeyrekler Açıklığı (Zengin et al., 2019)	$IQR = iqr_x$
16	%50 Kırılmış Ortalama (Zengin et al., 2019)	$T50 = \text{trimmean}(x, 50)$
17	%25 Kırılmış Ortalama (Zengin et al., 2019)	$T25 = \text{trimmean}(x, 25)$
18	Maksimum (Zengin et al., 2019)	$x_{\max} = \max(x)$
19	Ortalama Mutlak Sapma (Zengin et al., 2019)	$MAD = \text{mad}(x)$
20	Minimum (Zengin et al., 2019)	$x_{\min} = \min(x)$
21	Merkezi Moment (Zengin et al., 2019)	$m_k = E(x - \mu)^k$
22	Tekil Değer Ayrıştırması (Zengin et al., 2019)	$SVD = \text{svd}(x)$
23	Crest (Deeb et al., 2017)	$x_{\text{crest}} = \frac{x_p}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}}$

3.3.2. Frekans Düzleminde Öznitelik Çıkarımı

Fourier dönüşümü Jean-Baptiste Joseph Fourier isimli Fransız matematikçi tarafından geliştirilmiştir. Biyolojik sinyaller tıpkı diğer matematiksel sinyaller gibi birçok şekilde ifade edilir. İfade edilme şekilleri arasında zaman ve frekans çok büyük öneme sahiptir. Fourier dönüşümünde zaman içinde tekrar eden bir fonksiyonun

sonsuz sayıdaki karmaşık üstel hesaplamaların toplamıyla gösterilmesi mümkündür (Tepe, 2009).

Bir zaman düzlemindeki sinyal için sürekli zamanlı bir fourier dönüşümü (CTFT) ileri ve ters zaman düzlemindeki $x(t)$, (3.1) ve (3.2) nolu denklemlerde tanımlanmıştır.

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

Burada $e^{-j\omega t}$ CTFT'nin temel fonksiyonu olarak isimlendirilir. İşleme kolaylığı için sürekli zaman sinyali, ayırık zamanlı sinyale dönüştürülebilir. Ardından ayırık bir zaman sinyali için ayırık fourier dönüşümü olan (DFT) elde edilmiş olur. DFT'nin ileri ve ters dönüşümleri $x(n)$ için aşağıdaki (3.3) ve (3.4) nolu denklemlerde verilmiştir.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}; k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.3)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j\frac{2\pi nk}{N}}; n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.4)$$

Burada $e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}$ DFT'nin temel fonksiyonu olarak adlandırılır. Fourier dönüşümü (FT) biyomedikal sinyallerin frekans düzlemindeki davranışlarını analiz etmek için etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Ette & Komalla Ashoka, 2021).

n orijinal sinyal olmak üzere, hann penceresi uygulanmakta aşağıda denklem (3.5)'de verilmektedir,

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{n}{M} \right) \right), 0 < n < M. \quad (3.5)$$

Pencere uzunluğu ise $L = M + 1$ olarak alınmaktadır. $fft(w(n)) = y$ sinyalin hızlı fourier dönüşümünü temsil etmektedir. Frekans düzlemindeki özniteliklerin çıkarım yöntemleri ve denklemleri aşağıdaki tablo 3.2.'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Kullanılan özniteliklerin frekans düzleminde matematiksel ifadeleri ile ilgili tablo

NO	Yapılan işlem	Denklem
1	Baskın Güç (Kose et al., 2021)	$\max (abs(y)^2)$
2	Standart Sapma (Özşen et al., 2010)	$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N abs(y_i) - \mu ^2}$
3	Enerji (Deeb et al., 2017)	$E_x = \sum_{i=-\infty}^{\infty} abs(y(i)) ^2$
4	Güç (Khan & Rasool, 2022)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N abs(y_i^2)$
5	Enerji Entropi (Malaekah et al., 2014)	$P(m) = \frac{S(m)}{\sum_i S(i)}, S(m) = y ^2$ $H(t) = -\sum_{m=1}^N P(t, m) \log_2 P(t, m)$, “t” zamanındaki olasılık dağılımı $P(t, m)$ ’dir. Spektral Entropi $H(t)$ ise; Enerji Entropi $= \sum_{i=-\infty}^{\infty} H(t) ^2$
6	Spektral Entropi (Kose et al., 2021)	$P(m) = \frac{S(m)}{\sum_i S(i)}, S(m) = y ^2$ $H(t) = -\sum_{m=1}^N P(t, m) \log_2 P(t, m)$, “t” zamanındaki olasılık dağılımı $P(t, m)$ ’dir.
7	Basıklık (Özşen et al., 2010)	$x_{kur} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (abs(y_i) - \overline{abs(y)})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (abs(y_i) - \overline{abs(y)})^2 \right]^2}$
8	Çarpıklık (Özşen et al., 2010)	$x_{skw} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (abs(y_i) - \overline{abs(y)})^3}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (abs(y_i) - \overline{abs(y)})^2 \right]^{3/2}}$
9	Ortanca Değer (Lu et al., 2022)	$\tilde{x} = \begin{cases} \frac{abs(y_{n+1})}{2}, \text{ tek} \\ \frac{abs(y_{\frac{n}{2}}) + abs(y_{\frac{n+1}{2}})}{2}, \text{ çift} \end{cases}$
10	Ortalama (Lu et al., 2022)	$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N abs(y_i)$

3.3.3. Zaman ve Frekans Düzleminde Öznitelik Çıkarımı

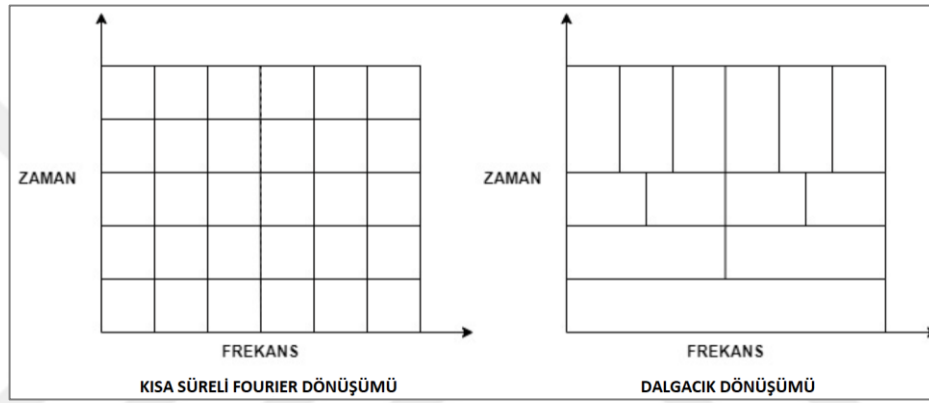
Dalgacık dönüşümü, sinyal işlemede en yaygın kullanılan dönüşümlerden biridir. Ayrıca veri sıkıştırma, örüntü tanıma ve daha fazlasında kullanılır. Bunlara ek olarak fourier dönüşümünün eksikliklerine bir çözümdür. Birçok makine öğrenimi uygulaması ön işleme adımı olarak dalgacık dönüşümünü kullanır.

Fourier dönüşümü bir sinyali zaman düzleminde frekans düzlemine dönüştürür. Ancak fourier dönüşümünün dezavantajı, yalnızca durağan sinyaller için çalışması ve gerçek dünyadaki birçok sinyalin durağan olmamasıdır. Frekans tahmin edilebilir, ancak hangi zamanda meydana geldiği tahmin edilemez. Bu, kısa süreli fourier

dönüşümü (STFT) geliştirilerek aşılmıştır. STFT’de sinyali pencerelere ayırır ve bu pencereler üzerinde fourier dönüşümü gerçekleştiririz. Analiz, pencere boyutunun seçimine bağlıdır. Pencere boyutu seçiminin etkileri şu şekildedir;

- Dar bir pencere boyutu, iyi bir zaman çözünürlüğüne sahip iken, kötü frekans çözünürlüğüne sahiptir.
- Geniş pencere boyutu iyi frekans çözünürlüğüne sahip iken, kötü zaman çözünürlüğüne neden olur.

Şekil 3.8.’de STFT ve dalgacık dönüşümlerinin (wavelet) frekans çözünürlüklerindeki ayrımları gösterilmektedir.



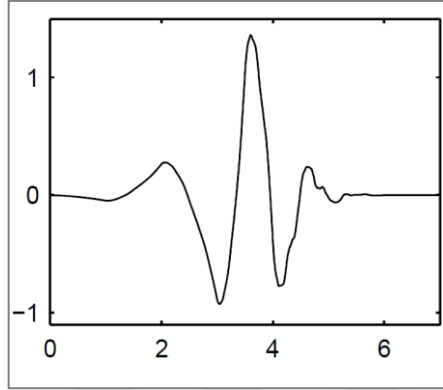
Şekil 3.8. Kısa süreli fourier dönüşümü ile dalgacık dönüşümünün zaman ve frekans çözünürlükleri

Dalgacık dönüşümü, farklı frekanslardaki sinyalleri farklı çözünürlüklerde analiz etmemizi sağlar. Sinyallerin bölgesel çözümlemesini sağlaması dalgacık dönüşümünün en efektif özelliğidir. Gerçek hayatta karşılaştığımız her sinyal sürekli değildir. Bu sinyaller gözle görülmeyecek kadar küçük süreksizliğe sahip olabilirler. Bu süreksizliklerin üstesinden gelebilmek için dalgacık dönüşümü kullanılmaktadır. Dalgacık dönüşümünün diğer dönüşüm yöntemlerinden üstünlüğü, yüksek mertebeli türevlerde süreksizlikleri ve benzerlikleri, bozulma ve eğilimleri yakalamada başarılı olmasıdır. Bu dönüşüm sayesinde işlenen sinyal bozulmadan sıkıştırma ve gürültü giderme gibi işlemler etkili bir şekilde yapılabilir. Sürekli ve ayrık olmak üzere iki tür dalgacık dönüşümü vardır. Bu çalışma kapsamında (3.6) nolu denklemde verilen ayrık dalgacık dönüşümünden faydalanılmıştır.

$$C(a, b) = C(j, k) = \sum x[n] 2^{-\left(\frac{j}{2}\right)} g\left((2^{-j})n - k\right) \quad (3.6)$$

(3.6) nolu denklemde $a = 2^j$, $b = k2^j$, $k \in \mathbb{Z}$, $j \in \mathbb{N}$ ’dir.

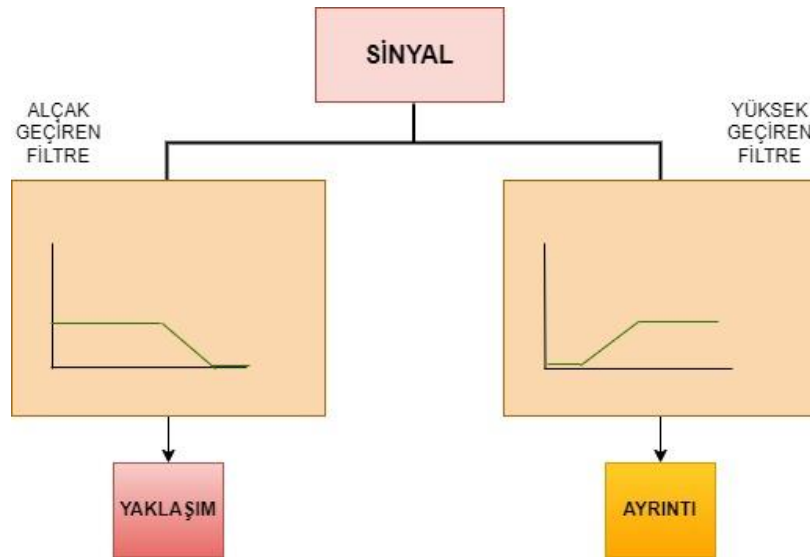
Bir dalgacık sınırlı bir yapıdadır. Bu dalgacığın ortalama değeri sıfır olan, pozitif ve negatif yönlerinden genliği sıfıra inen bir dalgacıktır. Çalışmamızda kullandığımız wavelet dalgacığımızın modeli, Daubechies-4 (db4) olup şekil 3.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Daubechies-4 (db4) dalgacığı

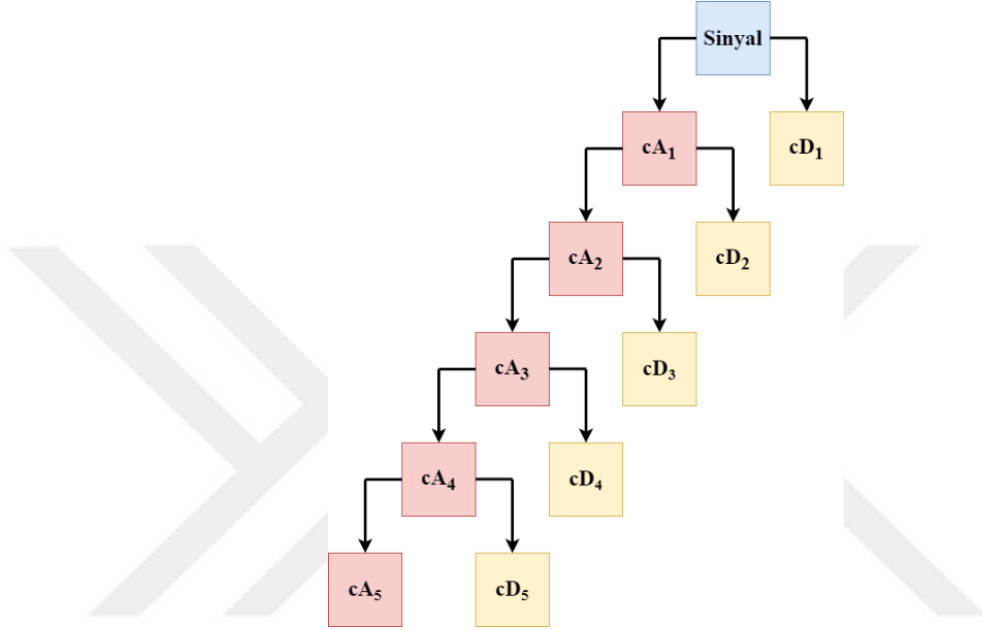
EOG sinyallerinde wavelet özellik çıkarımında en yaygın kullanılan Daubechies 4 (db4) dalgacığı ile ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) ile detay ve yaklaşım katsayıları elde edilmiştir (Ayoubipour et al., 2020; Djeha et al., 2017; Rahman et al., 2018). Daubechies-4 (db4) Daubechies-6 (db6) ve Haar-2 dalgacıklarının sinyal işlemede gürültüleri elimine etmelerinden dolayı popüler olarak kullanılmaktadır (Han et al., 2012). Elde edilen katsayılardan özellik çıkarımında faydalanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen ayrıntı ve yaklaşım katsayıları, sinyalin sırasıyla yüksek geçiren filtre ve alçak geçiren filtre ile elde edilmesi şekil 3.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Filtreleme işleminin en temel seviyede gösterimi

EOG sinyalinin 5 seviyeli ayrıştırılması şekil 3.11.'de gösterilmektedir. cA_5 yaklaşım katsayısı ile cD_{1-5} ayrıntı katsayıları olmak üzere toplamda 6 adet katsayı Tablo 3.3.'de bulunan matematiksel ifadeler ile her bir katsayıdan öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Toplamda $6 \times 6 = 36$ adet frekans-zaman düzleminde öznitelik elde edilmiştir. EOG sinyalinden 6 adet alt bant elde edilmiştir. 0-8 Hz aralığı yaklaşım, 8-16 Hz, 16-32 Hz, 32-64 Hz, 64-128 Hz ve 128-256 Hz alt bantları detaydır.



Şekil 3.11. Beş seviyeli ayrıştırma

Detay ve yaklaşım katsayıları (3.7) ve (3.8) nolu denklemlerde verilmektedir.

$$cA_1 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f[k]g[2n - k] \quad (3.7)$$

$$cD_1 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f[k]g[2n - k] \quad (3.8)$$

n orijinal sinyal olmak üzere t zamanındaki sinyal $n(t)$ olmak üzere aşağıdaki tablo 3.3.'de zaman-frekans düzlemindeki özellik çıkarımında kullanılan denklemler verilmektedir. Tablo 3.3.'de σ ve σ^2 sırasıyla standart sapma ve varyansı göstermektedir.

Denklem (3.9)'da ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) alt bantları $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, μ ise alt bantların ortalaması şeklinde ifade edilmektedir.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - \mu)^2 \quad (3.9)$$

Tablo 3.3. Kullanılan özniteliklerin zaman-frekans düzleminde matematiksel ifadeleri ile ilgili tablo

NO	Yapılan işlem	Denklem
1	Aktivite (Sharma et al., 2022)	$A = \sigma^2(n(t))$
2	Mobilite (Sharma et al., 2022)	$M = \frac{\sigma(n'(t))}{\sigma(n(t))}$
3	Karmaşıklık (Sharma et al., 2022)	$K = \frac{M(n'(t))}{M(n(t))}$
4	Basıklık (Rahman et al., 2018)	$x_{kur} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{x_j - \mu}{\sigma} \right)^4$
5	Çarpıklık (Rahman et al., 2018)	$x_{skw} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{x_j - \mu}{\sigma} \right)^3$
6	Enerji (Ayoubipour et al., 2020)	$E = \sum_{k=1}^K c_k ^2$

3.4. Veri Mühendisliği Teknikleri

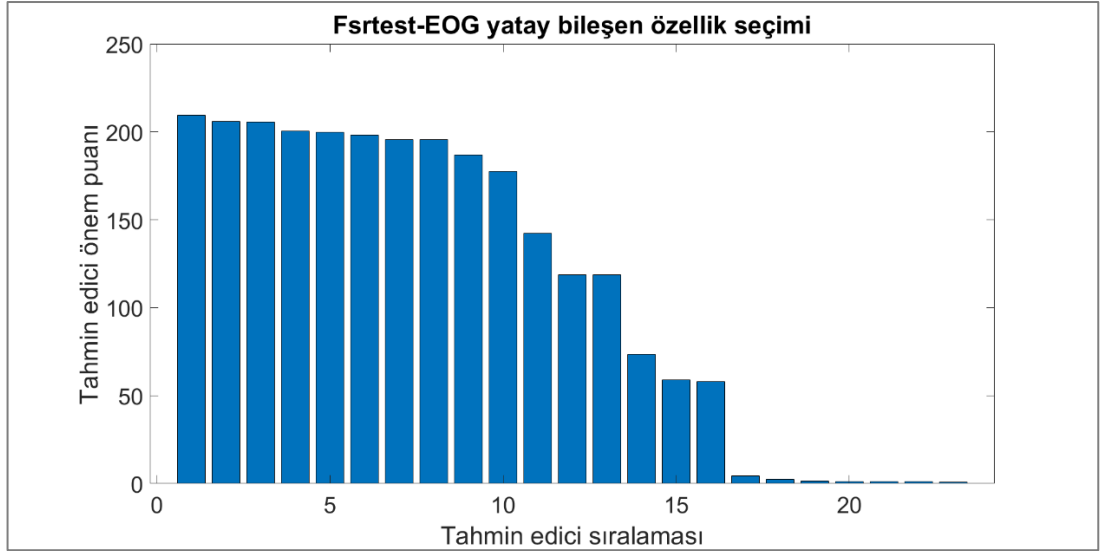
3.4.1. F Testleri Kullanılarak Regresyon İçin Tek Değişkenli Özellik Sıralaması (Fsrftest)

F testleri kullanarak Matlab ortamında genellikle regresyon algoritması için hata oranını düşürecek en önemli özellikleri önem sırasına göre sıralamaktadır. Tahmin edicinin önemine göre sıralanmış tahmin edicilerin indekslerini içeren fonksiyon döndürmektedir.

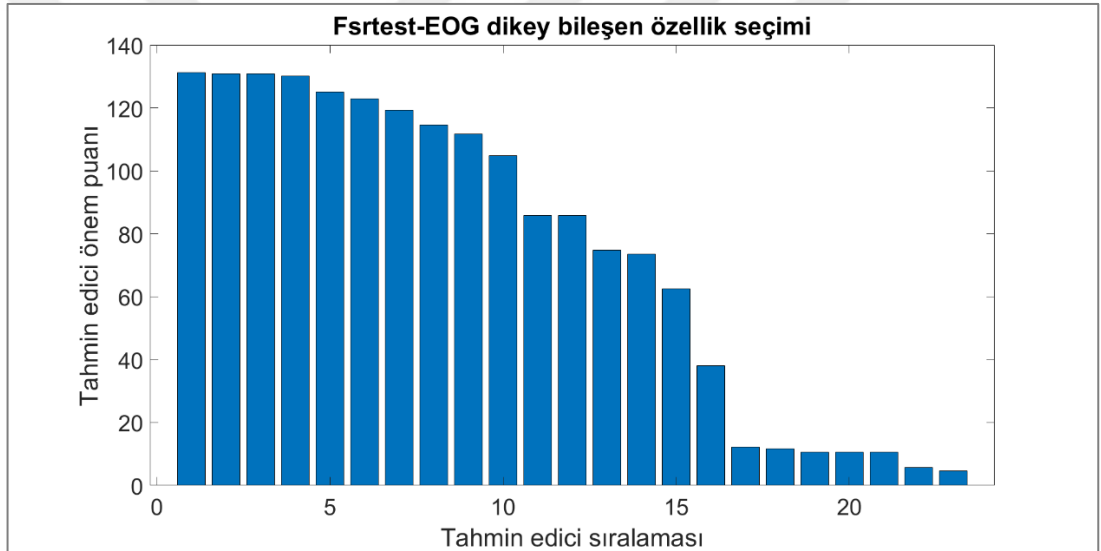
Bu özellik seçme yöntemi algoritma olarak regresyon için Tek Değişkenli Özellik Sıralamasını kullanır ve P-değerlerine göre her bir özelliği önem sırasına göre sıraya sokmaktadır. Bu işlemi özellik gruplarına karşılık gelen yanıt değerlerinin, popülasyon ortalamalarının farklı olduğu alternatif hipotezine karşı, ortalaması eşit popülasyonlardan alındığı hipotezine göre çalışmaktadır (MATLAB, 2020). Tablo 3.4.'de zaman, frekans ve zaman –frekans düzlemlerine göre kişi bazlı fsrftest yöntemi ile seçilen öznitelikler verilmektedir. 3.12. ve 3.13. nolu şekillerde zaman düzleminde S1 kişisi için fsrftest ile EOG bileşenlerinin özellik seçimleri verilmektedir.

Tablo 3.4. Fsrftest yöntemi ile seçilen öz nitelikleri

		Öznitelikler	
	Kişi	EOG yatay bileşen için	EOG dikey bileşen için
Zaman düzlemi	S1	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23	1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23
	S2	1, 2, 3, 7, 8, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22
	S3	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23	1, 2, 3, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 22
	S4	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23	1, 2, 3, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 22
	S5	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
	S6	1, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23	1, 2, 3, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22
Frekans düzlemi	S1	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
	S2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10
	S3	7, 8	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10
	S4	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10
	S5	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
	S6	5	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10
Zaman-Frekans düzlemi	S1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S4	1, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 36	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S5	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S6	2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 34, 35, 36	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36



Şekil 3.12. Zaman düzleminde fsrtest ile S1 kişinin EOG yatay bileşen için özellik seçimi



Şekil 3.13. Zaman düzleminde fsrtest ile S1 kişinin EOG dikey bileşen için özellik seçimi

3.4.2. Regresyon için Komşu Bileşen Analizi Kullanılarak Özellik Seçimi (Fsrnca)

Genellikle regresyon için komşu bileşen analizini kullanarak özellik seçimi yapmaktadır, komşu bileşen analizinin (NCA) çapraz uyarlaması ile özellik ağırlıklarını öğrenmektedir. Komşu bileşen analizi tahmin edilecek değerlerin, gerçek değerlere olabildiğince yakın değerler tahmin edebilmesi için özellikleri seçen bir yöntemdir. NCA eğitime verilen verilerin regresyon kaybını ölçer ve kaybı en aza indirmek için özellik ağırlıklarını öğrenerek NCA özellik seçimini yapmaktadır.

$$S = \{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\} \quad (3.10)$$

(3.10) nolu denklemde verilen n gözlem sayısını belirtmektedir, S eğitim kümesidir ve y 'yi tahmin etmektedir.

$$P(Ref(x) = x_j | S) = \frac{k(d_w(x, x_j))}{\sum_{j=1}^n k(d_w(x, x_j))} \quad (3.11)$$

(3.11) nolu denklemde x için referans noktası değeri olarak S 'den seçim yapılır ve (3.11) nolu denklem x_j noktasının S 'den alınıp x için referans noktası olma olasılığını göstermektedir.

$$p_{ij} = P(Ref(x_i) = x_j | S^{-i}) = \frac{k(d_w(x_i, x_j))}{\sum_{j=1, j \neq i}^n k(d_w(x_i, x_j))} \quad (3.12)$$

(3.12) nolu denklemde S eğitim kümesi için (x_i, y_i) noktası dışarda bırakılarak S^{-i} içinde olan verilerden yararlanarak x_i için yanıt tahmini gerçekleştirilmektedir ve (3.12) nolu denklem x_j noktasının x_i noktası için referans nokta olasılığını göstermektedir.

$$l_i = E(l(y_i, \hat{y}_i) | S^{-i}) = \sum_{j=1, j \neq i}^n p_{ij} l(y_i, y_j) \quad (3.13)$$

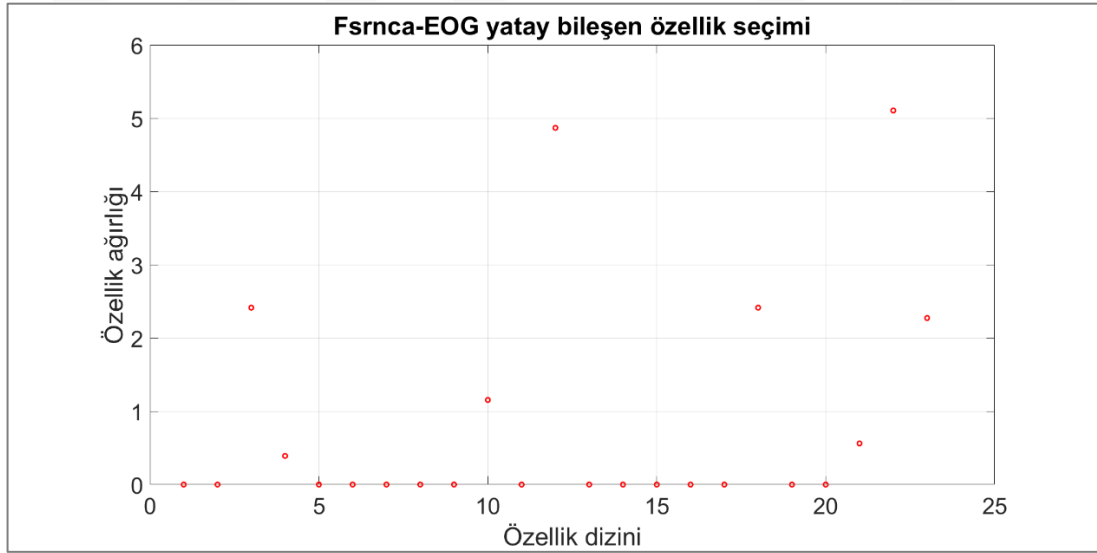
(3.13) nolu denklem $\hat{y}_i$ ve x_i için gerçek yanıt y_i ise, $l: R^2 \rightarrow R$, $\hat{y}_i$ ile y_i arasındaki kayıp fonksiyonu olmaktadır. Bu durumda (3.13) nolu denklem $l(y_i, \hat{y}_i)$ 'in ortalama değeri olmaktadır.

$$f(w) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i + \lambda \sum_{r=1}^p w_r^2 \quad (3.14)$$

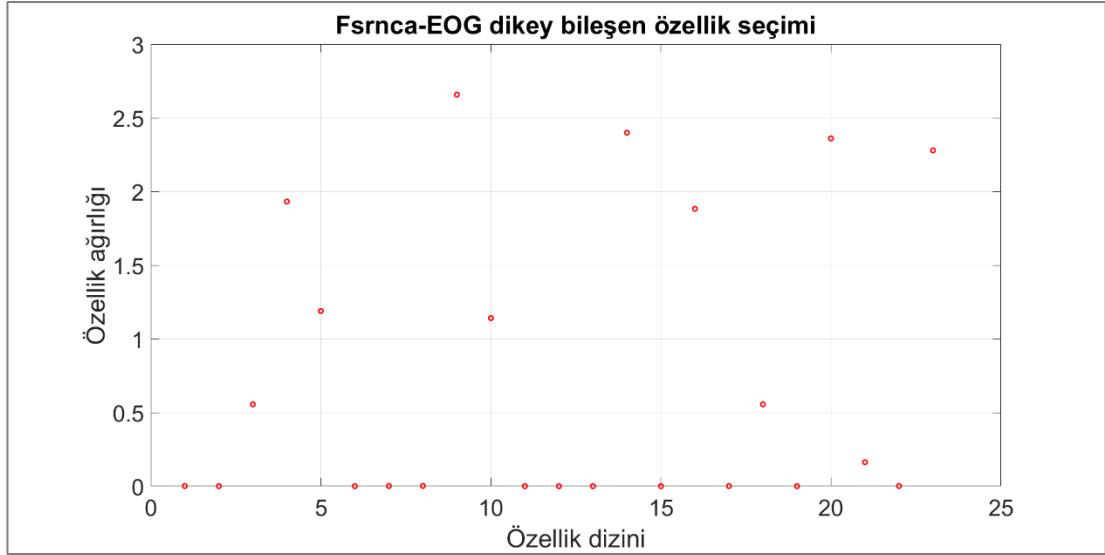
(3.14) nolu denklemde düzenleme terimi eklenmekte ve minimizasyon için amaç fonksiyonu olmaktadır (MATLAB, 2016). Tablo 3.5.'de zaman, frekans ve zaman –frekans düzlemlerine göre kişi bazlı fsrnca yöntemi ile seçilen öznelilikler verilmektedir. 3.14. ve 3.15. nolu şekillerde zaman düzleminde S1 kişisi için fsrnca ile EOG bileşenlerinin özellik seçimleri verilmektedir.

Tablo 3.5. Fsrnca yöntemi ile seçilen öz nitelikler

		Öznitelikler	
	Kişi	EOG yatay bileşen için	EOG dikey bileşen için
Zaman düzlemi	S1	3, 4, 10, 12, 18, 21, 22, 23	3, 4, 5, 9, 10, 14, 16, 18, 20, 21, 23
	S2	3, 6, 9, 10, 12, 18, 21, 22, 23	3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 15, 18, 20, 21, 22, 23
	S3	3, 4, 5, 6, 8, 9, 14, 18, 20, 21	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23
	S4	4, 5, 9, 13, 15, 17, 19, 20, 21, 23	3, 4, 5, 10, 12, 16, 18, 20, 21
	S5	3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 16, 18, 20, 21	3, 4, 5, 6, 10, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 23
	S6	4, 5, 6, 12, 15, 16, 20, 21, 22, 23	4, 6, 8, 10, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23
Frekans düzlemi	S1	5, 6, 8, 9, 10	3, 5, 7, 8, 9, 10
	S2	1, 4, 5, 7, 9, 10	1, 4, 6, 7, 9, 10
	S3	1, 4, 5, 7, 8, 9, 10	1, 5, 6, 7, 8, 9, 10
	S4	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10	1, 4, 5, 6, 7, 9, 10
	S5	1, 4, 5, 7, 8, 9, 10	2, 5, 6, 7, 8, 9, 10
	S6	3, 5, 6, 9, 10	3, 4, 6, 7, 8, 9, 10
Zaman-Frekans düzlemi	S1	6, 7, 10, 11, 12, 15, 17, 18, 22, 23, 29, 30, 36	1, 4, 6, 7, 8, 11, 16, 17, 18, 21, 24, 28, 30, 35, 36
	S2	5, 6, 9, 12, 13, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 30, 32, 35	1, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 15, 17, 21, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 34, 35, 36
	S3	4, 6, 10, 12, 15, 18, 21, 23, 26, 27, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 35, 36
	S4	6, 7, 11, 12, 15, 17, 18, 22, 23, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 36	1, 2, 5, 6, 8, 9, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35
	S5	2, 3, 6, 7, 12, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 35	1, 5, 6, 12, 13, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35
	S6	3, 6, 7, 9, 16, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 30, 31, 32, 35, 36	1, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 33, 35, 36



Şekil 3.14. Zaman düzleminde fsrnca ile S1 kişinin EOG yatay bileşen için özellik seçimi



Şekil 3.15. Zaman düzleminde fsrnca ile S1 kişinin EOG dikey bileşen için özellik seçimi

3.4.3. Minimum Fazlalık Maksimum Alaka Düzeyi Kullanılarak Regresyon İçin Özellik Seçimi (Fsrmmr)

Genellikle regresyon için Minimum fazlalık maksimum alaka düzeyini (MRMR) ortaya çıkarır. Tahmin edicinin önemine göre sıralanmış tahmin edicilerin dizinlerini içeren işlev döndürür. Algoritma özellik kümesinin seçiminde, yanıt değişkenine karşılık gelen ve en fazla miktarda farklılaşan değerlerinin, etkili bir şekilde yanıt değişkenini temsil ederken aynı zamanda fazlalıkların azaltılmasını sağlamaktadır. Bu sayede belirlenen özellik kümesinin, yanıt değişkenlerindeki değerlerin en etkili şekilde temsil edilebilmesine yardımcı olmaktadır.

$$I(X, Z) = \sum_{i,j} P(X = x_i, Z = z_j) \log \frac{P(X = x_i, Z = z_j)}{P(X = x_i)P(Z = z_j)} \quad (3.15)$$

(3.15) nolu denklemde Fsrmmr yöntemi X ve Z değişkenlerini, bir değişkenin değeri bilinerek diğer bir değişkenin belirsizliğinin ne kadar azaltılacağını ölçer. X ve Z değişkenleri birbirlerinden bağımsızlarsa, bu durumda $I=0$ 'dır. X ve Z değişkenleri aynı ise, I X 'in entropi değerine eşittir.

$$V_s = \frac{1}{|S|} \sum_{x \in S} I(x, y) \quad (3.16)$$

$$W_s = \frac{1}{|S|^2} \sum_{x,z \in S} I(x, z) \quad (3.17)$$

(3.16) ve (3.17) nolu denklemlerde fsrmrmr algoritmasının amacını anlatmak gerekirse, V_s 'nin değerini maksimum yapan ve W_s 'nin değerini minimuma çeken, y yanıt değişkeni ile S özellik kümesinin ilişkisinde, S 'deki fazlalığı en düşük tutan bir S özellik kümesi tanımlamaktır.

$$V_x = I(x, y) \quad (3.18)$$

$$W_x = \frac{1}{|S|} \sum_{z \in S} I(x, z) \quad (3.19)$$

(3.18) ve (3.19) nolu denklemlerde bir özelliğin, V_x alaka düzeyini, W_x ise fazlalığını tanımlamaktadır.

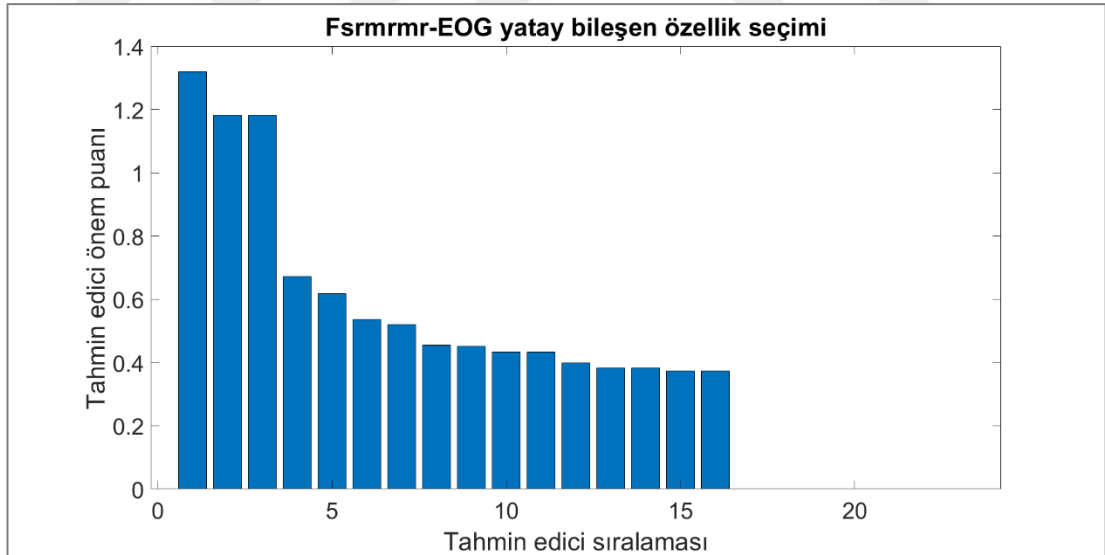
Fsrmrmr yöntemi, Minimum Redundancy Maximum Relevance algoritmasını kullanarak işleme alınan özellik kümesinden alaka düzeyi en çok, $\max_{x \in \Omega} V_x$ değerini elde edilen özelliği boş bir S kümesine eklemektedir ve Ω cinsine göre sıralamaktadır. S_c , S 'nin tamamlayıcısı olup, alaka düzeyi sıfır değilse ve sıfır artıklığa sahip olması durumunda S kümesine eklenecek özelliğin seçimi, (3.20) nolu denklemdeki en büyük MIQ değerine sahip olan özelliğin S kümesine eklenmesiyle devam etmektedir. Aksi Durumda $\max_{x \in S^c, W_x=0} V_x$ değeri elde edilen özellik S kümesine eklenmektedir (MATLAB, 2022).

$$\max_{x \in S^c} MIQ_x = \max_{x \in S^c} \frac{I(x, y)}{\frac{1}{|S|} \sum_{z \in S} I(x, z)} \quad (3.20)$$

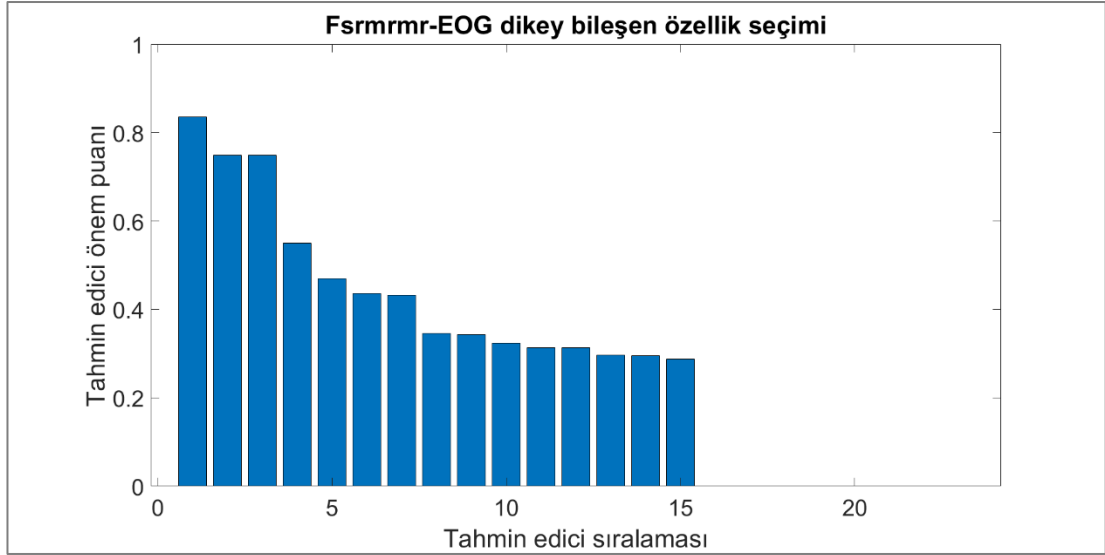
Tablo 3.6.'da zaman, frekans ve zaman –frekans düzlemlerine göre kişi bazlı fsrmrmr yöntemi ile seçilen öznitelikler verilmektedir. 3.16. ve 3.17. nolu şekillerde zaman düzleminde S1 kişisi için fsrmrmr ile EOG bileşenlerinin özellik seçimleri verilmektedir.

Tablo 3.6. Fsrmmr yöntemi ile seçilen öznelilikler

		Öznelilikler	
	Kişi	EOG yatay bileşen için	EOG dikey bileşen için
Zaman düzlemi	S1	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23	1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23
	S2	1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22
	S3	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23
	S4	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23	1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22
	S5	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23	1, 2, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22
	S6	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 22, 23
Frekans düzlemi	S1	9	3, 7, 8, 9
	S2	1, 7, 8, 9	7, 9, 10
	S3	1, 5, 9	1, 5, 9
	S4	4, 9	6, 10
	S5	7, 9	1, 9
	S6	1, 5, 9	3, 7, 8, 9
Zaman-Frekans düzlemi	S1	30	1, 5, 18, 23, 28, 29, 30
	S2	5, 30	6, 12, 30
	S3	30	5, 7, 12, 16, 28, 29, 30, 35
	S4	18, 30	30
	S5	23, 30	1, 5, 18, 24, 26, 28, 29, 30
	S6	30	12, 30



Şekil 3.16. Zaman düzleminde fsrmmr ile S1 kişinin EOG yatay bileşen için özellik seçimi



Şekil 3.17. Zaman düzleminde fsrmrmr ile S1 kişinin EOG dikey bileşen için özellik seçimi

3.4.4. Regresyon için Tahmin Edici Önem Sıralaması (RReliefF)

RReliefF yöntemi tahmin edicilerin önem sıralamasını gerçekleştirmektedir. Bu sıralama işlemini benzer yanıt değerlerine sahip komşulara farklı değer veren tahmin edicileri cezalandırırken, farklı değer veren tahmin edicileri ödüllendirme prensibiyle çalışmaktadır. Ara ağırlıklar vasıtasıyla en son tahmin ağırlıklarını bulmaktadır.

$$W_{dy^i} = W_{dy^{i-1}} + \Delta_y(x_r, x_q) \cdot d_{rq} \quad (3.21)$$

$$W_{dj^i} = W_{dj^{i-1}} + \Delta_j(x_r, x_q) \cdot d_{rq} \quad (3.22)$$

$$W_{dy \wedge dj^i} = W_{dy \wedge dj^{i-1}} + \Delta_y(x_r, x_q) \cdot \Delta_j(x_r, x_q) \cdot d_{rq} \quad (3.23)$$

(3.21), (3.22) ve (3.23) nolu denklemlerde ara ağırlıklar görülmektedir. i ve $i - 1$ yinemelerin adım numaralarını göstermektedir. W_{dy} ağırlığı, y yanıt değeri için farklı değer vermektedir. W_{dj} ağırlığı, F_j tahmin edicisi için farklı değer vermektedir. $W_{dy \wedge dj}$ ağırlığı, F_j tahmin edicisi için farklı yanıt değerlerine ve farklı değerler sahiptir.

W_{dy} , W_{dj} , $W_{dy \wedge dj}$ ve W_j ağırlıklarının değerleri sıfırdan başlatmaktadır ve herhangi bir x_r gözlemi tekrarlayan bir şekilde seçilip, en yakın komşularını belirledikten sonra komşuların her biri x_q için yenilenmektedir.

$$\Delta_y(x_r, x_q) = \frac{|y_r - y_q|}{\max(y) - \min(y)} \quad (3.24)$$

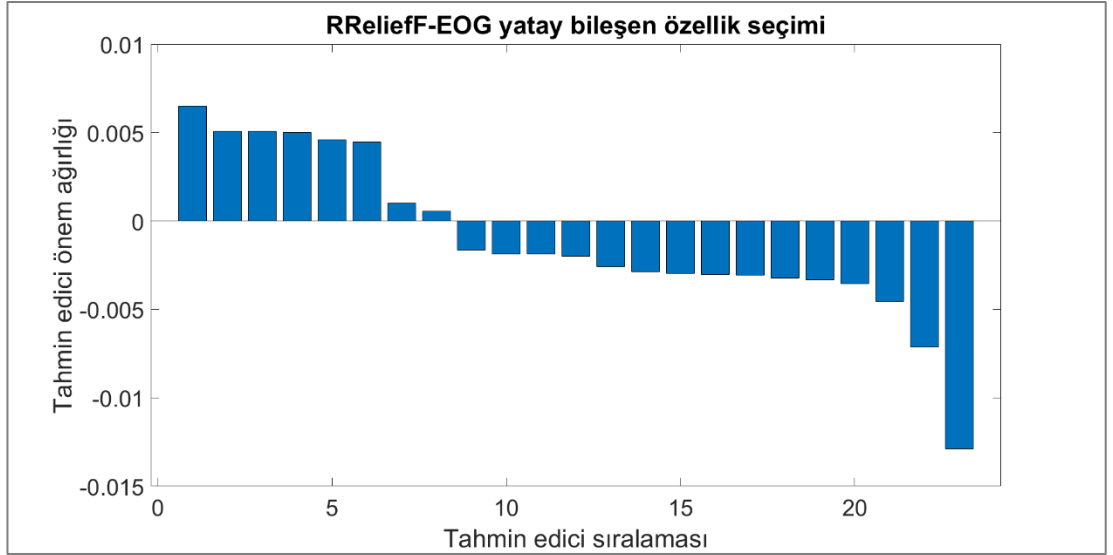
(3.24) nolu denklemde $\Delta_y(x_r, x_q)$, x_r ile x_q gözlemlerinin y yanıt değerlerindeki farka karşılık gelmektedir. Sırasıyla x_r ve x_q gözlemleri için yanıt değerleri y_r ve y_q ile ifade edilmektedir.

$$W_j = \frac{W_{dy \wedge dj}}{W_{dy}} - \frac{W_{dj} - W_{dy \wedge dj}}{m - W_{dy}} \quad (3.25)$$

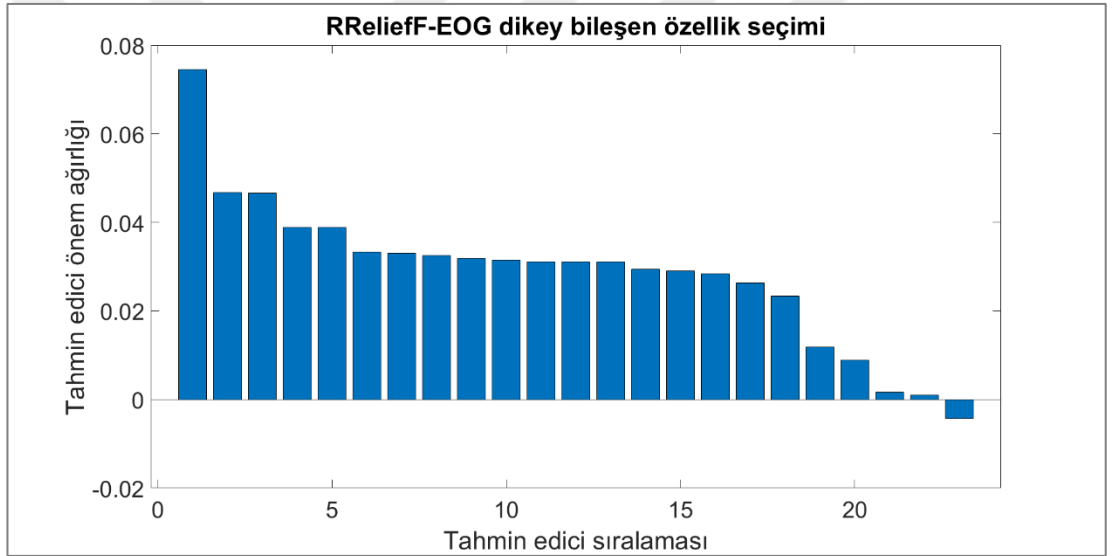
(3.25) nolu denklemde m , güncellemelere göre yinleme sayısına karşılık gelmektedir. Ara ağırlıkların hepsi güncellendikten sonra W_j hesaplanmaktadır (MATLAB, 2010). Tablo 3.7.'de zaman, frekans ve zaman –frekans düzlemlerine göre kişi bazlı rrelieff yöntemi ile seçilen öznitelikler verilmektedir. 3.18. ve 3.19. nolu şekillerde zaman düzleminde S1 kişisi için rrelieff ile EOG bileşenlerinin özellik seçimleri verilmektedir.

Tablo 3.7. Rrelieff yöntemi ile seçilen öznitelikleri

Öznitelikler		
Kişi	EOG yatay bileşen için	EOG dikey bileşen için
Zaman düzlemi	S1	4, 5, 12, 13, 15, 19
	S2	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 23
	S3	3, 4, 5, 12, 13, 15, 18, 19, 20
	S4	5, 9, 10, 12, 13, 15, 19, 20, 23
	S5	4, 12, 13, 15, 19, 20
	S6	3, 4, 5, 12, 13, 15, 18, 19, 20, 22
Frekans düzlemi	S1	1, 3, 4, 10
	S2	1, 3, 4, 10
	S3	1, 3, 4, 9, 10
	S4	1, 3, 4, 9, 10
	S5	1, 2, 3, 4, 9, 10
	S6	1, 3, 4, 9, 10
Zaman-Frekans düzlemi	S1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 20, 21, 23, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 21, 22, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S5	1, 2, 3, 4, 5, 6, 20, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
	S6	1, 2, 3, 4, 5, 6, 22, 24, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36



Şekil 3.18. Zaman düzleminde rrelieff ile S1 kişinin EOG yatay bileşen için özellik seçimi



Şekil 3.19. Zaman düzleminde rrelieff ile S1 kişinin EOG dikey bileşen için özellik seçimi

3.4.5. Sıralı Özellik Seçimi (Sequentials)

Sıralı özellik seçimini istenen boyut veya en düşük hata oranı sağlanana kadar işlemi sürdürmektedir. Aramanın yönüne göre Sıralı İleri Seçim(SFS) veya Sıralı Geri Seçim(SBS) isimli iki türe ayırmak mümkündür.

Sıralı İleri Seçim(SFS) yönteminde başlangıçta hiçbir özellik seçili değildir ve sonucu en iyi şekilde iyileştirecek bir özellik bulununca eklenmektedir. Ekleme işlemi, sıralı olarak yapılmaktadır ve gelişmeye katkısı en çok olan aday özelliğin eklenmesiyle devam etmektedir. Bu işlem değerlendirme sonucunun en iyi halini alması veya istenen özellik sayısına ulaşılması durumunda sonlandırılır.

Sıralı Geri Seçim(SBS) yönteminde ise Sıralı İleri Seçim(SFS) yönteminin aksine boş bir kümeyle değil, var olan tüm özellikler ile işleme başlanmaktadır. (SBS)'de de amaç en iyi sonucu veren nihai özellik kümesinin elde edilmesidir. Bu süreç sıralı olarak en alakasız özellikleri, tüm özellik kümesinden atarak devam etmektedir ve değerlendirme sonucunun en iyi halini alması veya istenen özellik sayısına ulaşılması durumunda sonlandırılmaktadır (Abdulwahab, Ajitha et al. 2022).

Sequentials öznitelik seçim yöntemi, makine öğrenmesi algoritmalarıyla birlikte öznitelik seçimi yapmaktadır. Bu sebeple sonuçlar, 3.8., 3.9., 3.10. ve 3.11. nolu tablolarda sırasıyla GPR, SVM, RT ve RTE makine öğrenmesi algoritmalarıyla zaman, frekans ve zaman –frekans düzlemlerine göre kişi bazlı sequentials yöntemi ile seçilen öznitelikler verilmektedir.

Tablo 3.8. Sequentials yönteminin GPR makine öğrenmesiyle seçtiği öznitelikler

Öznitelikler			
	Kişi	EOG yatay bileşen için	EOG dikey bileşen için
Zaman düzlemi	S1	3, 12, 16	1, 2, 3, 11, 13, 14, 16, 17, 20, 22
	S2	3, 11, 14, 18, 19	4, 5, 8, 9, 22, 23
	S3	2, 8, 12, 16, 22	1, 2, 7, 11, 14, 19, 22
	S4	1, 5, 6, 7, 8, 13, 17, 20, 23	3, 5, 13, 14, 18, 19, 22, 23
	S5	1, 7	1, 11, 14, 15, 16
	S6	2, 3, 12, 13, 20	8, 10, 19, 22
Frekans düzlemi	S1	1, 2, 3, 6, 8, 9, 10	2, 7, 8, 10
	S2	1, 2, 3, 4, 8	2, 6, 7, 10
	S3	1	2, 5, 7, 8
	S4	8, 9, 10	1, 2, 6, 10
	S5	3, 4, 7, 9	2, 6, 7, 8, 9, 10
	S6	7	2, 7, 9, 10
Zaman- Frekans düzlemi	S1	6, 30	6, 18, 24, 30
	S2	6, 30	6, 11, 17, 18, 23, 24, 28, 30
	S3	6, 30	9, 12, 18, 24, 30
	S4	6, 30	5, 18, 30
	S5	6, 12, 30	18, 22, 30
	S6	6, 30	6, 18, 25, 30

Tablo 3.9. Sequentials yönteminin SVM makine öğrenmesiyle seçtiği öznitelikler

Öznitelikler			
	Kişi	EOG yatay bileşen için	EOG dikey bileşen için
Zaman düzlemi	S1	10, 11, 15, 16, 23	4, 5, 8, 10, 20, 23
	S2	1, 5, 10	3, 7, 10, 14, 18, 19, 23
	S3	2, 8, 9, 10, 12, 13, 20	14, 22
	S4	2, 5, 7	6, 12, 13, 14, 19, 20, 22, 23
	S5	3, 10, 11, 14, 16, 17	2, 3, 7, 8, 16, 17, 23
	S6	1, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 20, 23	4, 6, 7, 13, 15, 20
Frekans düzlemi	S1	7, 8	4, 5, 7, 8
	S2	1, 6, 8	1, 6
	S3	5	1, 5
	S4	1, 7, 8, 9	6
	S5	8, 9	9
	S6	5	5
Zaman-Frekans düzlemi	S1	14, 24, 30	18, 29, 30
	S2	2, 5, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 21, 25, 26, 28, 30, 32, 35	7, 11, 12, 15, 16, 17, 21, 23, 24, 27, 28, 30, 36
	S3	8, 9, 11, 13, 17, 19, 27, 30	13, 15, 24, 30
	S4	23, 30	8, 13, 14, 24, 27, 30
	S5	12, 28, 30	22
	S6	11, 12, 22, 26, 29, 30	2, 21, 23, 24, 30, 31

Tablo 3.10. Sequentials yönteminin RT makine öğrenmesiyle seçtiği öznitelikler

Öznitelikler			
	Kişi	EOG yatay bileşen için	EOG dikey bileşen için
Zaman düzlemi	S1	3, 4, 5, 7, 9, 10, 15, 19	3, 6, 8, 12, 16, 17, 20
	S2	7, 8, 9, 14, 16, 19, 21	1, 7, 14
	S3	4, 8, 10, 16, 17, 21, 23	3, 9, 10, 12, 16, 21
	S4	5, 8, 11	3, 14, 15, 21, 23
	S5	6, 8	6, 16
	S6	1, 9, 17, 19	1, 4, 7, 9, 11, 12, 19
Frekans düzlemi	S1	9, 10	1, 5, 10
	S2	4, 5	2, 3, 6, 7, 10
	S3	1, 5	5, 6, 8
	S4	8, 9	5, 6, 8, 10
	S5	3, 4	8
	S6	5, 6	4, 6, 9, 10
Zaman-Frekans düzlemi	S1	6, 10, 11, 12, 22, 30, 36	6, 7, 18, 21, 30
	S2	6, 12, 15, 30, 33	3, 6, 12, 13, 14, 16, 20, 21, 23, 25, 29, 30, 31, 33
	S3	2, 3, 6, 18, 30	18, 20, 24, 30, 31
	S4	6, 28, 30	5, 16, 18, 30
	S5	6, 11, 13, 24, 28, 29, 30, 36	5, 6, 16, 18, 19, 30
	S6	6, 11, 13, 30	6, 17, 23, 24, 30, 31, 36

Tablo 3.11. Sequentials yönteminin RTE makine öğrenmesiyle seçtiği öznitelikler

		Öznitelikler	
	Kişi	EOG yatay bileşen için	EOG dikey bileşen için
Zaman düzeni	S1	1, 3, 7, 11, 15, 22	5, 6, 8, 10, 22, 23
	S2	1, 12, 14, 21	1, 2, 6, 9, 11, 14, 21
	S3	2, 7, 16, 19, 22	2, 3, 4, 6, 8
	S4	8, 12, 16	2, 3, 17, 18, 22
	S5	12, 16	1, 2, 9, 10, 11
	S6	2, 5, 6, 7, 17, 23	7, 19
Frekans düzeni	S1	1, 9, 10	2, 3, 6, 7
	S2	2, 4, 6, 10	1, 2, 3, 4, 8, 10
	S3	1, 7	6, 7
	S4	8, 9	3, 4, 7, 10
	S5	1, 3	8
	S6	1, 5	6, 7, 9
Zaman- Frekans düzeni	S1	6, 21, 30	6, 14, 18, 30
	S2	6, 30	5, 30
	S3	6, 18, 30	5, 24, 29, 30
	S4	4, 6, 19, 30	5, 26, 30, 32
	S5	6, 12, 30	12, 24, 30
	S6	6, 30	6, 24, 30, 31

3.4.6. Çapraz Doğruluk

Çapraz doğrulama, verilerin makine öğrenimi algoritmalarını daha objektif değerlendirilmesinde, modelin fazla veya eksik boyutunun tartılmasında ve bağımsız verilerin genelleştirilmesinde önemli rol oynar. Ayrıca, veri miktarının fazla olmadığı durumlarda modelin fazla uydurma yapmasına karşı sigorta görevi görmektedir.

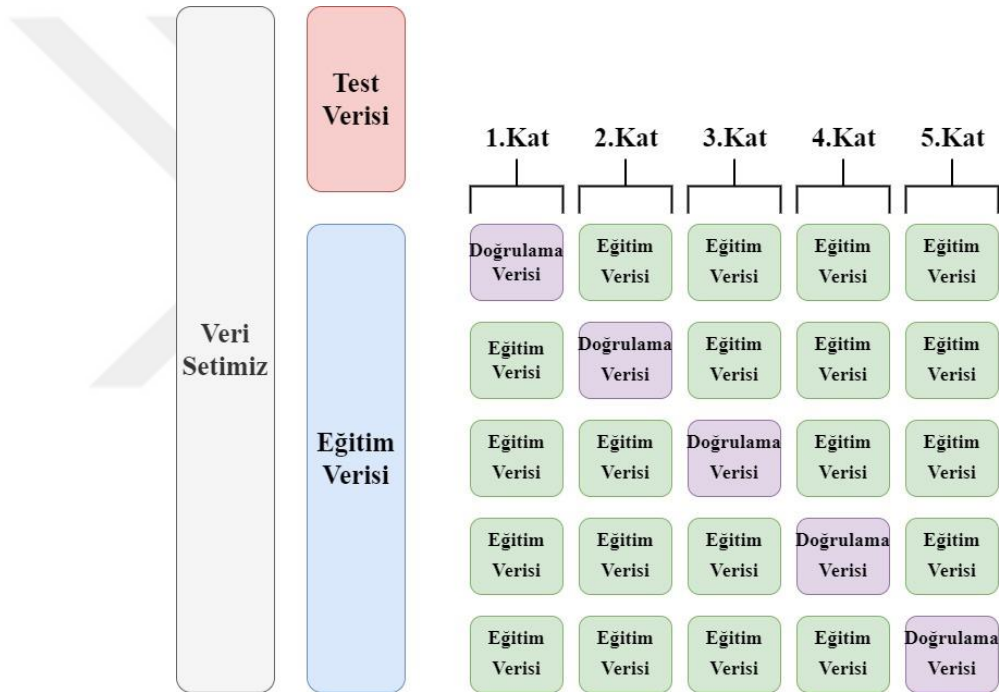
Öyleyse, üzerinde çalışılan modelin gerçek dünyada olası karşılaşılabileceği durumlarda nasıl tepki vereceğini ölçmemizde ve modelimizi daha doğru bir şekilde hazırlamamıza yardımcı olmaktadır.

3.4.6.1. Holdout Yöntemi

Veri setimizle modelimizi eğitmek ve test etmek için veri setimizin bir bölümünün eğitime ve teste ayrılmasında ve bu işlemi yaparken veri setimiz içinden bölümlerin rastgele veriler ile istenildiği oranda bölünmesine yardımcı olmaktadır. Bu yöntemin veri setimizin çok büyük olması ve zamanımızın sınırlı olduğu durumlarda başlangıç modeli oluşturmada kolaylık sağlamaktadır. Bir diğer taraftan, veri setinin dengesiz olarak dağıldığı durumlarda ve bölünme sonrasında çoğu verinin izole olmasından dolayı modelimizin farklı tip veriler ile karşılaştığında tahminlerinin sapıtmasına sebep olabilmektedir.

3.4.6.2. K-Fold Yöntemi

Bu yöntem Holdout yöntemini geliştirmek ve etkisini arttırmak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Veri setimizin belirtilen “K” sayıda rastgele olarak eşit alt kümelere ayrılır ve holdout yöntemi “K” defa tekrarlanmaktadır. Yöntemin detaylıca açıklamak gerekirse K adet alt kümeye bölünmüş veri setinde her kat için kullanacağımız modeli veri setinin “K-1” katı üzerine oluşturulmaktadır. Bu işlem “K” katmanlarının her biri test seti olana kadar sürdürülmektedir. Ardından kaydedilen K kadar doğruluğunun ortalaması alınarak kullandığınız model için performans metrikleri ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak, yaptığımız çalışmada “K” değeri “5” olarak alınmıştır. Şekil 3.20.’de gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Beş kat çapraz doğrulama

3.4.7. Kullanılan Algoritmalar

Günümüzde revaçta olan makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. Ardından kullanılan yöntemlerin performans metrikleri kıyaslanmaktadır.

3.4.7.1. Gaussian Process Regression (GPR)

Gauss süreci (GP), belirli rastgele değişken gauss dağılımları ile hesaplanmakta ve kovaryansı ve ortalama fonksiyonları ile şekillendirilmektedir. Bu algorithma kovaryans ve ortalama, vektör matrisleridir. Gauss süreç regresyon (GPR) modelleri ardışık gözlemler hakkında birbirlerine bilgi aktarmaktadır. Fonksiyonların bağımlılık

ve eldeki verilerin ilişkilerine göre (GPR) modelleri test verilerine göre tahmin verilerini göstermektedir. Daha da detayına inmek gerekirse; n tane gözleme sahip bir S veri seti olsun. Burada $\{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n\}$ x_i D boyutlu girdi vektörü olsun ve y_i 'de hedef vektörü olsun. Bu halde $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ girdi matrisi, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ çıktı matrisi olmaktadır. Buradaki regresyonun görevi S veri kümesindeki x^* gözlemlerine karşılık yeni y^* değerleri oluşturmaktır. Burada gauss süreci $f(x)$ ve ortalama da $m(x)$ fonksiyonu olarak gösterilir.

$$m(x) = E(f(x)) \quad (3.26)$$

Bir sonraki denklem ise kovaryans fonksiyonunu göstermektedir.

$$k(x, x') = E((f(x) - m(x))(f(x') - m(x'))) \quad (3.27)$$

Gauss süreci ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (3.28)$$

Basit olması için ortalama fonksiyon değeri çoğunlukla sifıra ayarlanır. Bu işlemde hedef ile girdi vektörleri arasındaki ilişki şu şekildedir.

$$y_i = f(x) + \varepsilon \quad (3.29)$$

Burada ε , σ^2 varyansı ve sıfır ortalama ile gauss dağılımı gürültüsünü göstermektedir (Jamei et al., 2021).

3.4.7.2. Support Vector Machine Regression (SVR)

SVR birçok veri madenciliği ve sinyal işleme uygulamalarında iyi sonuç veren regresyon için olan SVM'nin bir versiyonudur. SVR aşağıdaki verilen denklemin düzenli fonksiyonelliğini en aza indirmek için w ağırlıklarını hesaplar.

$$\min_{w, \xi_i^{(*)}, b} \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_i \xi_i + \xi_i^{(*)} \right\} \quad (3.30)$$

Burada w ve $\xi_i^{(*)}$ için $i = (1, \dots, n)$ kadardır ve şu şekilde sınırlanır.

$$y_i - (\langle \phi(x_i), w \rangle + b) \leq \epsilon + \xi_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (3.31)$$

$$(\langle \phi(x_i), w \rangle + b) - y_i \leq \epsilon + \xi_i^{(*)} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (3.32)$$

$$\xi_i, \xi_i^{(*)} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (3.33)$$

Burada $\xi_i^{(*)}$, ϵ 'dan daha büyük bir tahmin mutlak hatasıdır ve eğitim örnekleri ile ilgili pozitif rastgele değişkendir. C ise cezalandırma katsayısıdır. C parametresi hataları azaltmak ve düzenileştirme terimini dengelemek için kullanılan bir parametredir. SVR algoritması Lagrange çarpanlarını kullanır ve lineer kısıtlamalar yaratarak Karush-Kuhn-Tucker koşullarını hesaplar ikili problemleri ise kareleme fazı kullanarak çözüme ulaştırır ve son denklem şu şekildedir (Salcedo-Sanz et al., 2014).

$$\hat{y}_i = \sum_{j=1}^n (\alpha_j, \alpha_j^*) K(x_i, x_j) + b \quad (3.34)$$

3.4.7.3. Regression Tree

Regresyon ağaçları tahmin etmek istediği değerleri bulmak için bu değişkenlere belirli kurallar uygulayarak veri setini en verimli şekilde alt kümeler ayırmaktadır. Bu işlemde tahmin edilmesi istenen değerine dayalı olarak ikiye bölme işlemiyle ayırarak gruplar yani düğümleri oluşturur. Bu segmentasyon işlemi düğüm başına gözlem sayısı minimuma gelene kadar devam ettirilir. En sonunda ezberlemeyi önlemek için algoritma tarafından oluşturulan ağaçlar budanır. Algoritma optimum segmentasyonu yapmak için uç düğümlerindeki ortalama kare hatasını en aza indirmeye çalışır. N tane gözlem sayısına sahip, tahmin edilen ortalama değer y ise, ilgili düğümdeki ortalama kare hatası R şu şekilde hesaplanır.

$$R(t) = \frac{1}{n(t)} * \sum_{i=1}^n [y(t) - \bar{y}(t)]^2 \quad (3.35)$$

En iyi segmentasyonu yapabilmek için ana düğüm ile sol (t_l) ve sağ (t_r) çocuk düğümler arasındaki ortalama kare hatası R ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R(t) - [R(t_l) + R(t_r)] \quad (3.36)$$

Yukarıdaki denklem maksimize edilerek düğüm içindeki değerlerin ortalaması tahmin için kullanılır (Ließ et al., 2012).

3.4.7.4. Regression Tree Ensembles

Literatürde yapılan çalışmalarda tekli regresyon ağaçlarının, çoklu regresyon ağaçlarına göre doğruluklarının düşük olduğu belirtilmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada Regression Tree Ensembles kullanılmıştır. Bu yöntemin detayına inmek

gerekirse; ilk olarak oluşturulan algoritmalarda bireysel regresyon ağaçları vardır, bu işlem sırasında bir bağımlı değişkeni tahmin edebilmek için çoklu bağımsız değişkenler kullanılmaktadır ve bu işlem için ikili öz yinelemeli bölümlleme (binary recursive partitioning) uygulanmaktadır. Regresyon ağaçları geleneksel denetimli sınıflandırma yaklaşımlarının temelinde yer alan algoritmalarından biridir. Bir regresyon ağacının kökünden düğümlere kadar uzanan işlem sırasında veri kümesini mümkün olduğunca homojen olarak alt bölümlere ayırmak için hiyerarşik bir ikili bölümlmeden faydalanılır. Bölme kriteri olarak eşik değeri s seçilir. Aşağıda verilen denklem minimize edilir.

$$\sum_{y_i | X_{i,j} \leq s} (y_i - \bar{y})^2 + \sum_{y_i | X_{i,j} > s} (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.37)$$

Burada, Y bağımlı değişkenleri, X_j ise bağımsız değişkenleri göstermektedir. $\bar{y}$, tüm y_i öğelerinin ortalamasını gösterir. s eşik değeri X_j bağımsız değişkenlerinin herhangi bir değerine eşit olabilir. Bir regresyon ağacının son düğümü yaprak olarak tanımlanır. Bütün yaprakların bağımlı değişkenlerinin ortalama değeri bu yaprakların her birine atanır. Bu algoritmada oluşturulan ağaçlar öğrenme örneklerindeki gürültüyü kısmen ezberledikleri için test verileri için doğru tahminler yapma konusunda kabiliyetleri düşüktür. Bu olumsuzluğu elimine etmek için ağaçtaki daha az önemli dalları kesen budama yöntemleri uygulanır. Bu budanan tekil ağaçlardan oluşturulan ormanlar sayesinde doğruluk oranı artmaktadır. Her yaprağın ağırlığı eğitim örneklerinden hesaplanan yaprağa özgü RMSE'ye göre tanımlanır (Gessner et al., 2013).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada uygulanan yöntemler önceki bölümlerde anlatılmıştır. Bu bölümde ise veri setinin dikey ve yatay kanallarına uyguladığımız sinyal işleme yöntemleri ve akabinde uygulanan makine öğrenmesi algoritmalarının deneysel sonuçlarına değinilecektir. Değerlendirme metrikleri regresyon için yaygın olarak kullanılan kök ortalama kare hatası (RMSE) ve EOG verilerini değerlendirmede kullanılan açısal hata (Error Angle) verilmiştir. (4.1) ve (4.2) nolu denklemlerde sırasıyla ortalama kare hatası ve açısal hata verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4.1)$$

$$Hata\ Açıslı = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n abs(\hat{y}_i - y_i) \quad (4.2)$$

(4.1) ve (4.2) denklemlerde $\hat{y}_i$ tahmin edilen değeri, y_i ise gerçek değeri temsil etmektedir.

4.1. Zaman Düzleminde

Tablo 4.1.'de Fsrftest öznelilik seçim yöntemiyle çıkarılan öznelilikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.13, 1.67 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.85, 1.41 ile yine GPR'de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.34, 2.40 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.59, 3.72 ile RTE'de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.85, 3.99 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.79, 4.66 SVM'de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.71, 4.03 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.47, 4.43 ile RTE'de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.07, 3.47 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.39, 4.15 ile RTE’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.74, 2.43 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.21, 2.79 ile SVM’de elde edilmiştir.

Tablo 4.1. Zaman düzleminde fsrftest öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	3.13	3.34	7.20	5.71	6.07	4.73	5.03
		Açısal Hata/°	1.67	2.40	4.13	4.03	3.47	2.75	3.08
	Dikey	RMSE	1.85	5.72	5.89	5.51	5.82	4.27	4.85
		Açısal Hata/°	1.41	3.64	4.50	4.28	4.62	2.86	3.55
	SVM	RMSE	11.00	5.28	7.56	6.08	6.61	4.25	6.80
		Açısal Hata/°	3.78	4.31	5.53	4.39	4.35	2.95	4.22
RT	Yatay	RMSE	3.26	5.86	5.79	6.09	7.61	4.21	5.47
		Açısal Hata/°	2.45	3.87	4.66	5.14	6.80	2.79	4.29
	Dikey	RMSE	4.01	4.09	7.86	5.98	8.84	3.80	5.76
		Açısal Hata/°	2.18	3.29	4.55	4.15	4.55	2.55	3.54
	RTE	RMSE	2.28	5.90	5.99	6.49	5.76	4.26	5.11
		Açısal Hata/°	1.71	3.84	4.53	5.28	4.33	3.25	3.82
RTE	Yatay	RMSE	3.35	3.74	6.85	5.95	7.40	3.74	5.17
		Açısal Hata/°	1.66	2.57	3.99	4.12	3.81	2.43	3.10
	Dikey	RMSE	2.00	5.59	5.81	5.47	5.39	4.39	4.78
		Açısal Hata/°	1.49	3.72	4.65	4.43	4.15	3.12	3.59

Tablo 4.2.’de Fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.66, 1.48 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.73, 1.35 ile yine RTE’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.87, 2.03 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.39, 3.67 ile GPR’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.46, 3.58 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.75, 3.24 GPR’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.28, 3.63 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.43, 4.20 ile GPR’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.10, 3.41 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.86, 4.40 ile RTE’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.71, 2.15 ile RT’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.16, 2.93 ile RTE’de elde edilmiştir.

Tablo 4.2. Zaman düzleminde fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	3.34	3.01	7.43	5.28	6.10	4.79	1.67
		Açısal Hata/°	1.85	2.11	4.38	3.63	3.41	2.55	0.98
	Dikey	RMSE	1.95	5.39	4.75	5.43	6.13	5.16	4.80
		Açısal Hata/°	1.50	3.67	3.24	4.20	4.80	3.14	3.42
	SVM	RMSE	9.50	2.87	7.54	7.11	7.70	5.90	6.77
		Açısal Hata/°	3.38	2.03	4.51	5.70	5.35	4.44	4.24
RT	Yatay	RMSE	3.20	4.39	7.54	6.23	8.47	3.71	5.59
		Açısal Hata/°	1.71	2.49	3.96	4.41	4.88	2.15	3.27
	Dikey	RMSE	3.09	6.25	6.09	6.38	5.64	4.32	5.30
		Açısal Hata/°	1.67	3.96	4.11	4.77	4.18	3.25	3.66
	RTE	RMSE	2.66	3.81	6.46	5.65	7.02	4.05	4.94
		Açısal Hata/°	1.48	2.29	3.58	3.63	3.69	2.39	2.84
RTE	Yatay	RMSE	1.73	5.41	5.13	5.62	5.86	4.16	4.65
		Açısal Hata/°	1.35	3.58	3.40	4.30	4.40	2.93	3.33
	Dikey	RMSE	1.35	3.58	3.40	4.30	4.40	2.93	3.33
		Açısal Hata/°	1.35	3.58	3.40	4.30	4.40	2.93	3.33
	SVM	RMSE	9.50	2.87	7.54	7.11	7.70	5.90	6.77
		Açısal Hata/°	3.38	2.03	4.51	5.70	5.35	4.44	4.24

Tablo 4.3.’de Fsrmmr öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.37, 1.70 ile

RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 1.97, 1.54 ile SVM’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.43, 1.71 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.41, 3.89 ile RT’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 6.27, 3.41 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.12, 3.41 ile RTE’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 6.08, 4.37 ile RT’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.50, 4.25 ile RTE’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 6.44, 3.55 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.41, 4.49 ile RTE’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 3.78, 2.47 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 4.11, 2.78 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Zaman düzleminde fsrmrmr öznetelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısıl hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	5.02	2.43	7.04	7.03	6.44	4.17	5.36
		Açısıl Hata/°	2.12	1.71	3.66	5.40	3.55	2.60	3.17
	Dikey	RMSE	4.21	5.87	14.59	6.95	6.29	4.11	7.00
		Açısıl Hata/°	3.65	3.94	6.73	5.63	4.74	2.78	4.58
	SVM	RMSE	7.11	5.19	6.27	5.78	6.69	4.63	5.95
		Açısıl Hata/°	3.11	4.25	3.41	3.88	4.39	3.27	3.72
RT	Yatay	RMSE	1.97	6.23	7.44	5.62	7.09	4.87	5.54
		Açısıl Hata/°	1.54	5.43	6.27	4.75	6.34	3.83	4.69
	Dikey	RMSE	4.06	3.48	7.93	6.08	8.21	3.88	5.61
		Açısıl Hata/°	2.14	2.82	4.47	4.37	4.65	2.50	3.49
	RTE	RMSE	2.15	5.41	5.60	6.68	5.66	4.57	5.01
		Açısıl Hata/°	1.67	3.89	3.73	5.20	4.48	3.38	3.73
RTE	Yatay	RMSE	3.37	3.33	7.29	6.10	7.36	3.78	5.20
		Açısıl Hata/°	1.70	2.45	4.24	4.15	3.88	2.47	3.15
	Dikey	RMSE	2.04	5.57	5.12	5.50	5.41	4.31	4.66
		Açısıl Hata/°	1.47	3.72	3.41	4.25	4.49	3.01	3.39

Tablo 4.4.'de RreliefF öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 7.57, 5.04 ile SVM'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.15, 1.50 ile GPR'de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.80, 1.82 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.06, 3.62 ile RT'de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 6.04, 3.08 ile RT'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 4.89, 3.52 ile GPR'de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.21, 3.61 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.62, 4.30 ile RTE'de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 6.23, 3.86 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.86, 4.46 ile RTE'de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 3.64, 2.39 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 4.07, 2.89 ile RTE'de elde edilmiştir.

Tablo 4.4. Zaman düzleminde rrelieff öznelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısıl hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	8.02	2.80	6.23	5.21	6.76	3.64	1.96
		Açısıl Hata/°	5.80	1.82	3.84	3.61	4.43	2.39	1.43
	Dikey	RMSE	2.15	5.30	4.89	5.86	6.18	4.36	4.79
		Açısıl Hata/°	1.50	3.63	3.52	4.65	4.74	3.23	1.18
	SVM	RMSE	7.57	12.11	8.28	7.31	9.02	4.27	8.09
		Açısıl Hata/°	5.04	10.33	6.18	5.70	5.94	2.57	5.96
RT	Yatay	RMSE	2.26	5.83	5.82	8.87	7.61	5.13	5.92
		Açısıl Hata/°	1.74	3.84	4.51	5.51	6.80	3.89	4.38
	Dikey	RMSE	8.21	4.36	6.04	6.20	7.35	3.92	6.01
		Açısıl Hata/°	4.93	2.56	3.08	4.24	3.96	2.41	3.53
	RTE	RMSE	2.28	5.06	5.83	6.09	6.83	4.15	5.04
		Açısıl Hata/°	1.49	3.62	3.88	4.69	4.98	3.18	3.64
RTE	Yatay	RMSE	1.49	3.62	3.88	4.69	4.98	3.18	3.64
		Açısıl Hata/°	1.49	3.62	3.88	4.69	4.98	3.18	3.64
	Dikey	RMSE	7.67	3.15	6.20	5.48	6.23	4.20	5.49
		Açısıl Hata/°	5.29	1.98	3.49	3.82	3.86	2.59	3.50
	RTE	RMSE	2.40	5.49	5.07	5.62	5.86	4.07	4.75
		Açısıl Hata/°	1.61	3.67	3.40	4.30	4.46	2.89	3.39

Tablo 4.5.'de Sequentials öznelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.96, 1.78 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 1.76, 1.42 ile RTE'de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 3.45, 2.12 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.59, 3.83 ile GPR'de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 7.04, 4.34 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.28, 3.59 ile RTE'de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.02, 3.45 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.44, 4.39 ile GPR'de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.86, 3.70 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.49, 4.36 ile RTE’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.59, 2.31 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.97, 2.76 ile RTE’de elde edilmiştir.

Tablo 4.5. Zaman düzleminde sequentials öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	3.43	3.63	7.04	5.02	7.72	3.59	5.07
		Açısal Hata/°	1.99	2.13	4.34	3.45	4.14	2.31	3.06
	Dikey	RMSE	1.90	5.59	5.72	5.44	5.74	4.34	4.79
		Açısal Hata/°	1.47	3.83	4.14	4.39	4.60	3.06	3.58
	SVM	RMSE	14.17	6.12	8.24	6.09	6.86	3.84	7.55
		Açısal Hata/°	3.85	4.52	5.99	4.14	3.70	2.64	4.14
RT	Yatay	RMSE	3.00	6.30	6.30	11.09	6.20	5.24	6.35
		Açısal Hata/°	2.94	4.80	5.28	5.89	4.93	4.02	4.64
	Dikey	RMSE	4.09	3.59	7.58	7.93	6.94	3.72	5.64
		Açısal Hata/°	2.10	1.89	3.82	5.18	4.00	2.16	3.19
	RTE	RMSE	2.83	6.41	5.51	6.83	5.62	4.93	5.35
		Açısal Hata/°	1.79	4.82	4.21	5.05	4.24	3.27	3.89
RTE	Yatay	RMSE	2.96	3.45	7.25	7.28	8.42	4.75	5.69
		Açısal Hata/°	1.78	2.12	4.20	4.90	4.46	2.84	3.38
	Dikey	RMSE	1.76	5.86	5.28	5.75	5.49	3.97	4.68
		Açısal Hata/°	1.42	4.04	3.59	4.60	4.36	2.76	3.46

Tablo 4.6.’da, 3.1., 3.2., 3.3., 3.4. ve 3.5. nolu tabloların birey bazlı incelenmesi ve öznitelik seçim yöntemlerine göre düşük RMSE ve açısal hata değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.6.’da Fsrftest öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.13, 1.67 ile S1 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.85, 1.41 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

Fsrnca öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.66, 1.48 ile S1 kişisinde elde

edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 1.73, 1.35 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

Fsrmmr öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.43, 1.71 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise SVM algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 1.97, 1.54 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

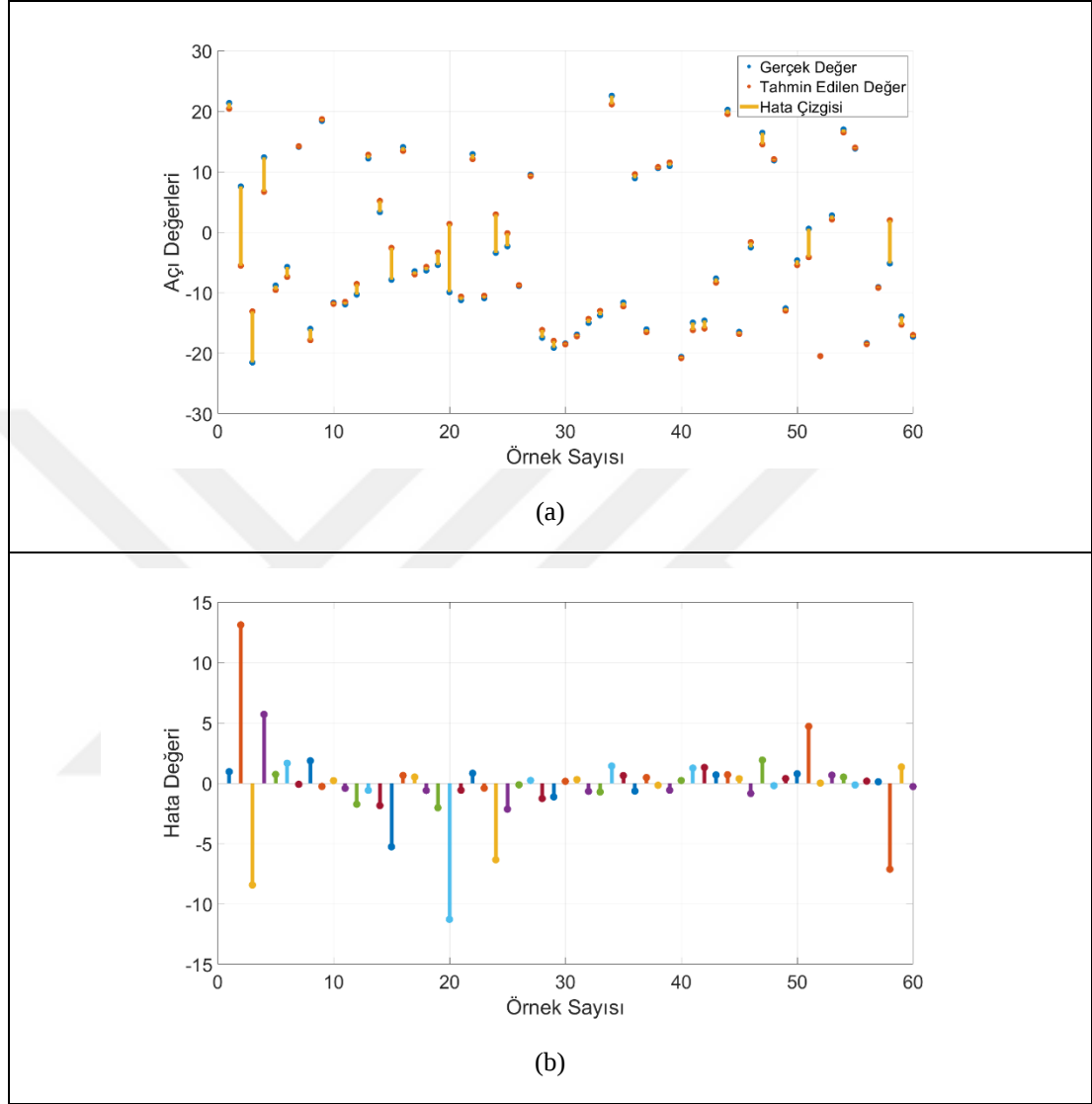
RreliefF öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.80, 1.82 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.15, 1.50 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

Sequentials öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.96, 1.78 ile S1 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 1.76, 1.42 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

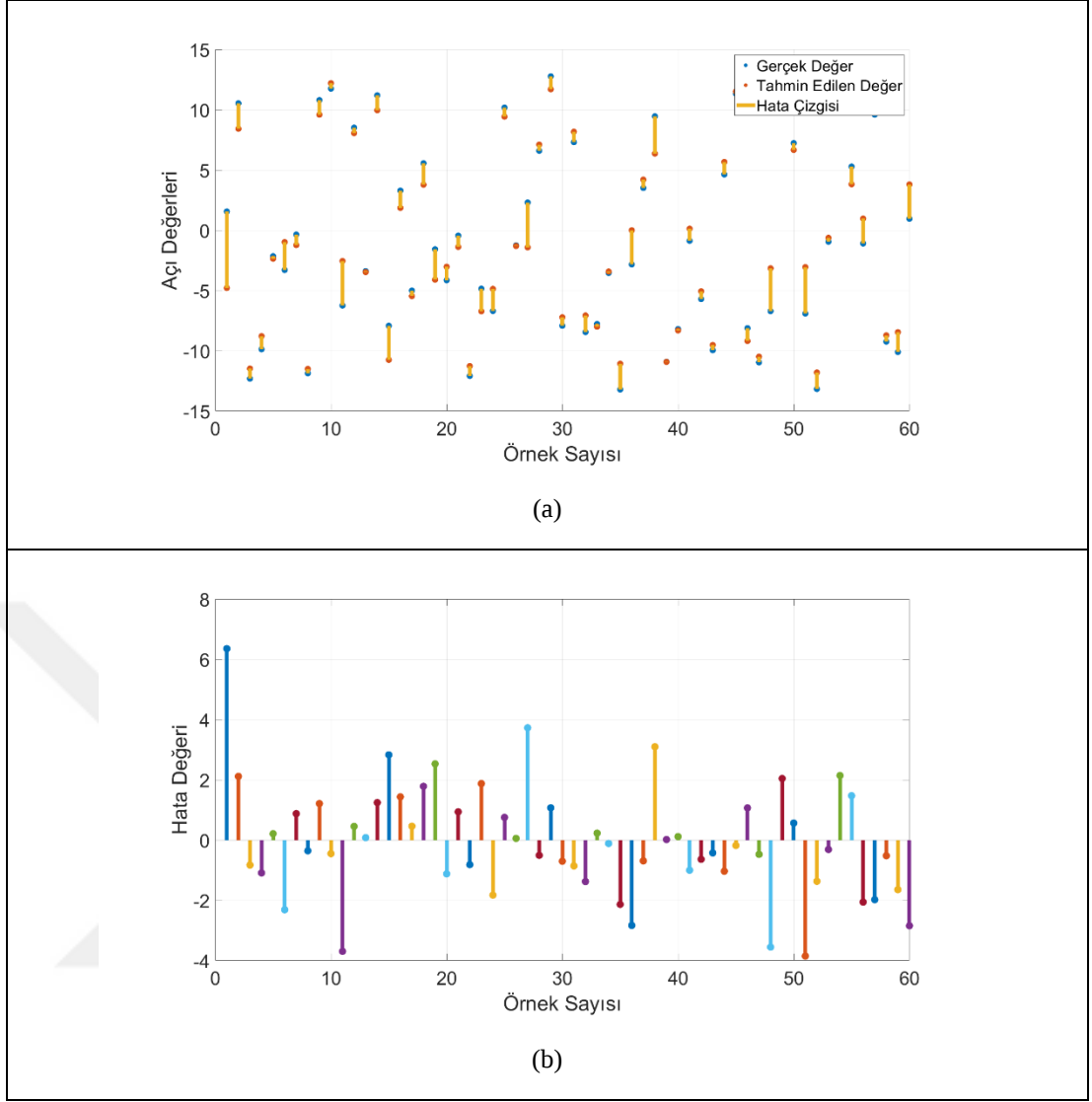
Tablo 4.6. Zaman düzleminde tüm öznelik seçim yöntemlerinde bireyler için en düşük RMSE hata metriği ve açısıl hatası

			FSRFTEST	FSRNCA	FSRMRMR	RRELIEFF	SEQUENTIALS
GPR	Yatay	RMSE	3.13(S1)	3.34(S1)	2.43(S2)	2.80(S2)	3.43(S1)
		Açısıl Hata/°	1.67(S1)	1.85(S1)	1.71(S2)	1.82(S2)	1.99(S1)
	Dikey	RMSE	1.85(S1)	1.95(S1)	4.11(S6)	2.15(S1)	1.90(S1)
		Açısıl Hata/°	1.41(S1)	1.50(S1)	2.78(S6)	1.50(S1)	1.47(S1)
	SVM	RMSE	4.25(S6)	2.87(S2)	4.63(S6)	4.27(S6)	3.84(S6)
		Açısıl Hata/°	2.95(S6)	2.03(S2)	3.27(S6)	2.57(S6)	2.64(S6)
RT	Yatay	RMSE	3.26(S1)	3.86(S1)	1.97(S1)	2.26(S1)	3.00(S1)
		Açısıl Hata/°	2.45(S1)	3.06(S1)	1.54(S1)	1.74(S1)	2.94(S1)
	Dikey	RMSE	3.80(S6)	3.20(S1)	3.48(S2)	3.92(S6)	3.59(S2)
		Açısıl Hata/°	2.55(S6)	1.71(S1)	2.82(S2)	2.41(S6)	1.89(S2)
	RTE	RMSE	2.28(S1)	3.09(S1)	2.15(S1)	2.28(S1)	2.83(S1)
		Açısıl Hata/°	1.71(S1)	1.67(S1)	1.67(S1)	1.49(S1)	1.79(S1)
RTE	Yatay	RMSE	3.35(S1)	2.66(S1)	3.33(S2)	3.15(S2)	2.96(S1)
		Açısıl Hata/°	1.66(S1)	1.48(S1)	2.45(S2)	1.98(S2)	1.78(S1)
	Dikey	RMSE	2.00(S1)	1.73(S1)	2.04(S1)	2.40(S1)	1.76(S1)
		Açısıl Hata/°	1.49(S1)	1.35(S1)	1.47(S1)	1.61(S1)	1.42(S1)

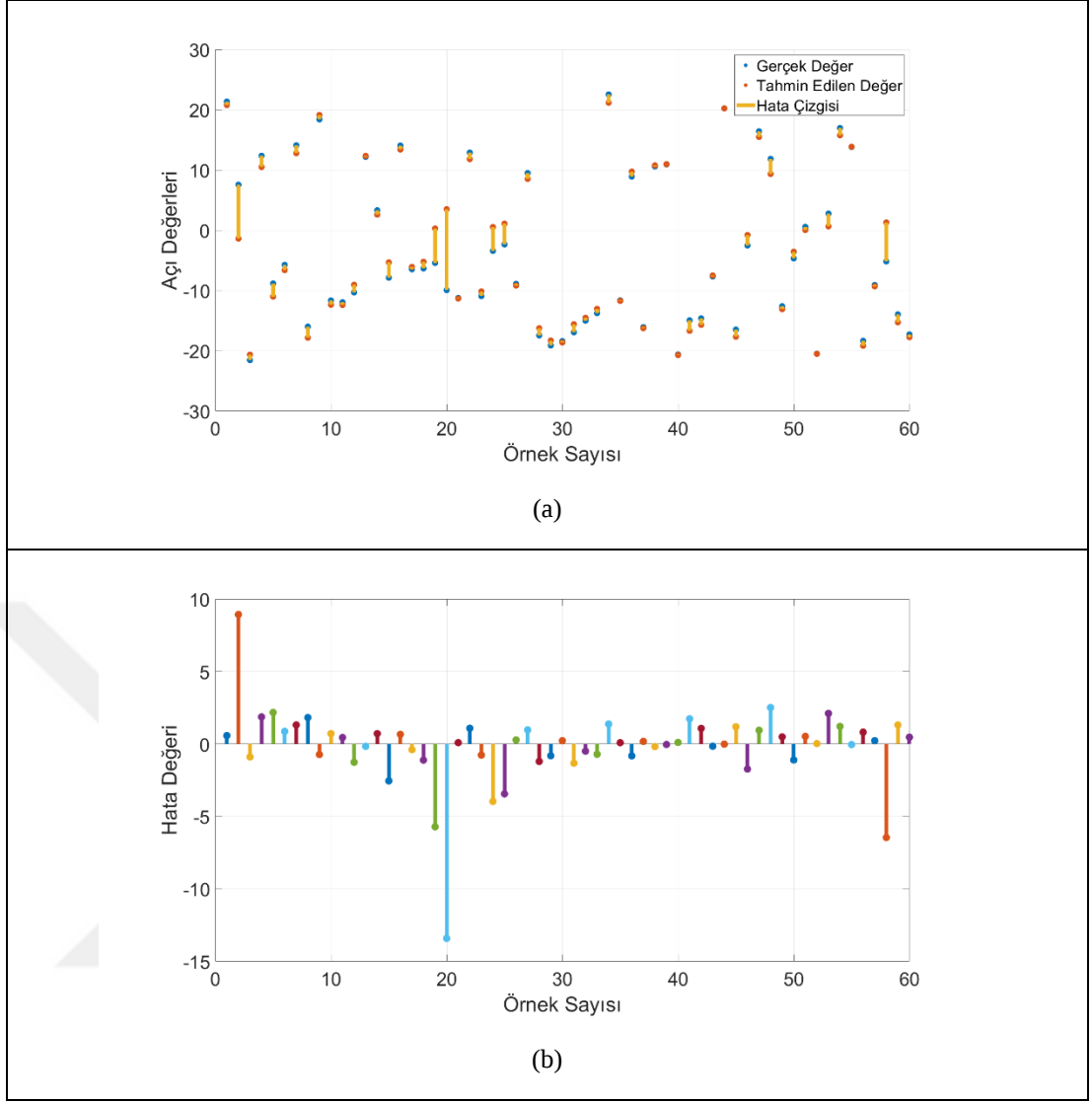
4.1., 4.2., 4.3., 4.4., 4.5., 4.6., 4.7., 4.8., 4.9. ve 4.10. nolu şekillerde, tablo 4.6.'daki öz nitelik seçim yöntemlerine göre en iyi yatay ve dikey EOG bileşenlerinin (a) açılma değerleri ve (b) hata değerlerinin grafikleri verilmektedir.



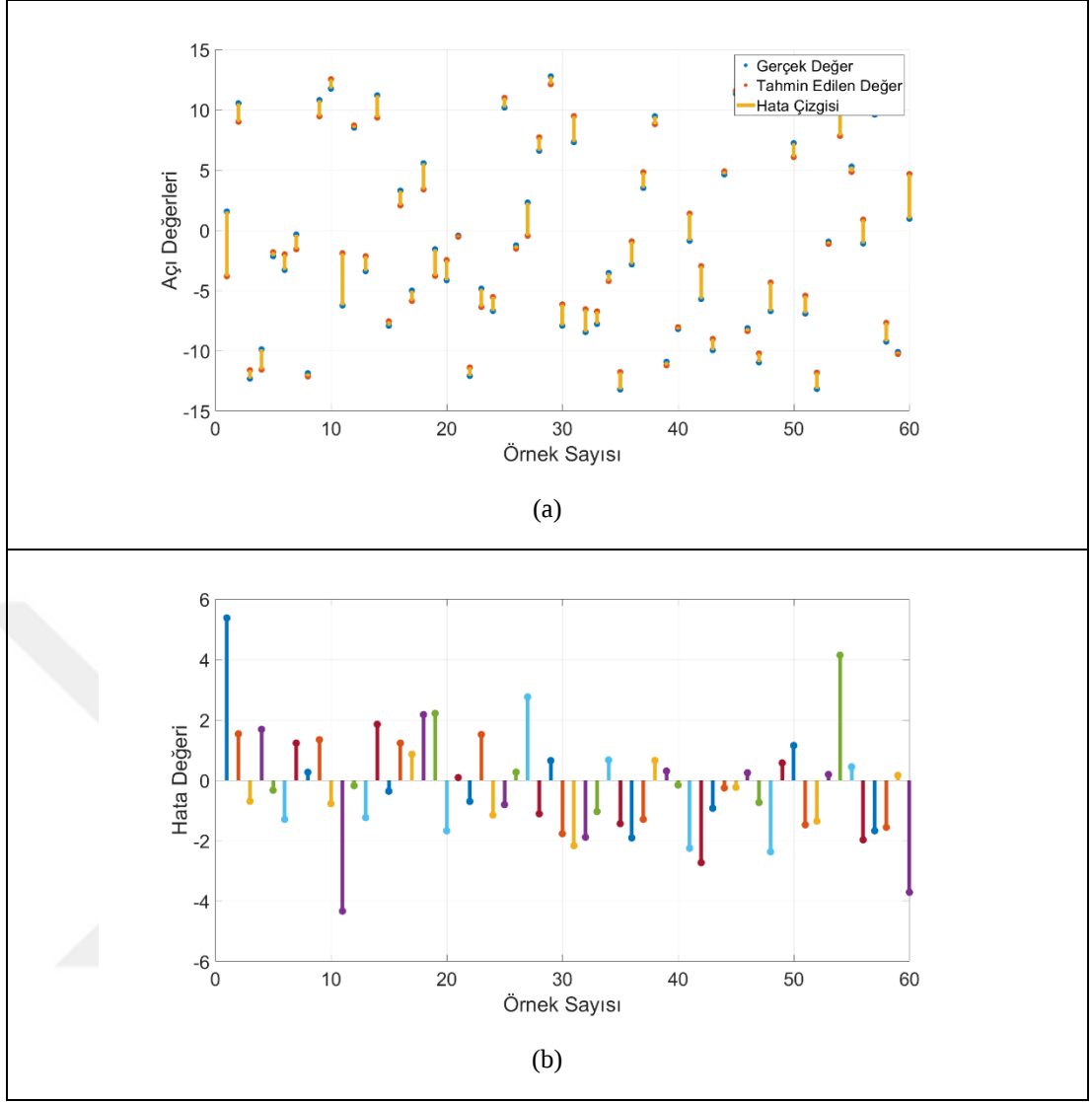
Şekil 4.1. Zaman düzleminde fsrftest için GPR algoritmasıyla S1 kişinin yatay EOG bileşeninin (a) açılma değerleri (b) hata değerleri



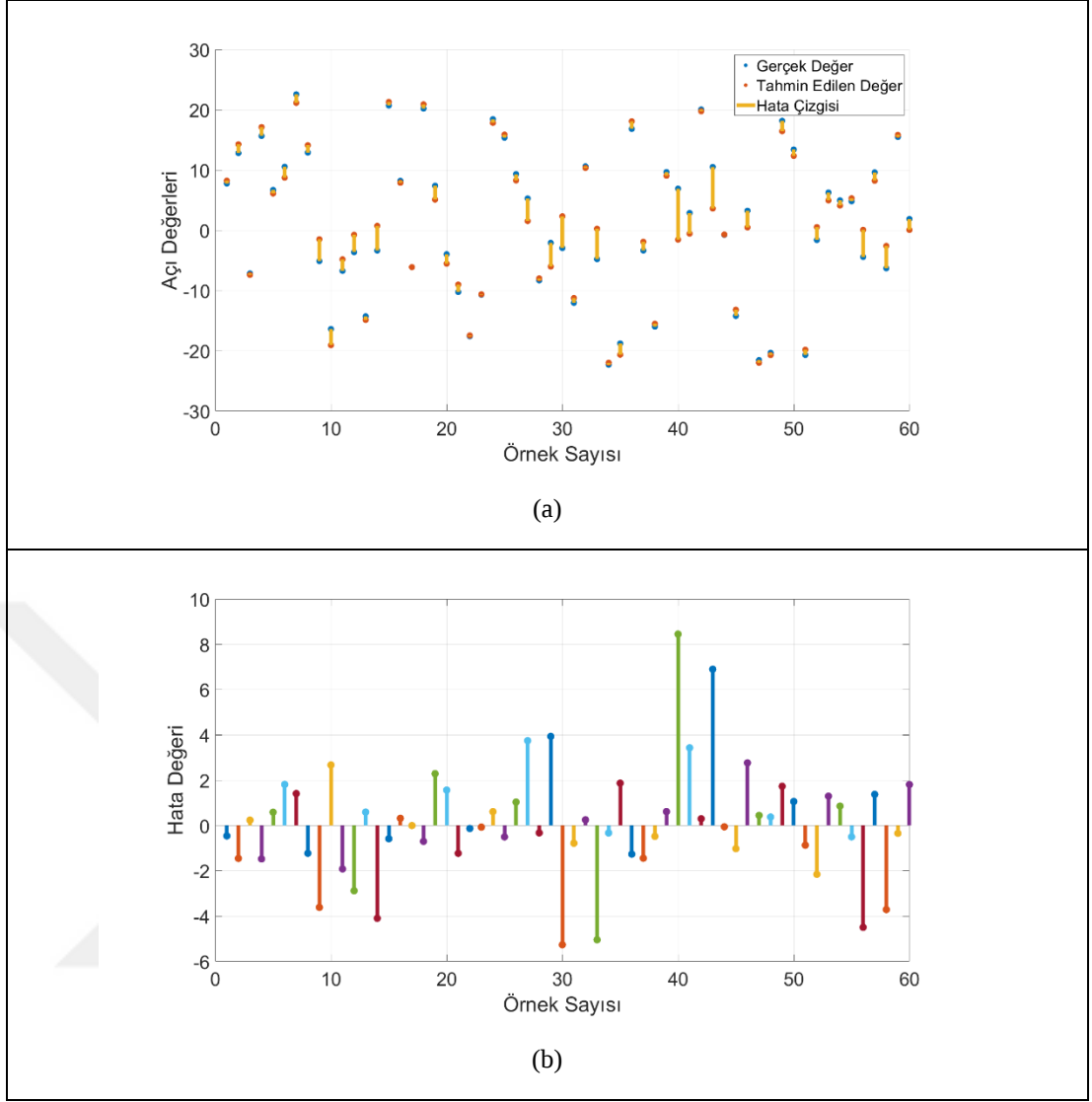
Şekil 4.2. Zaman düzleminde fsrftest için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) Açı değerleri (b) Hata değerleri



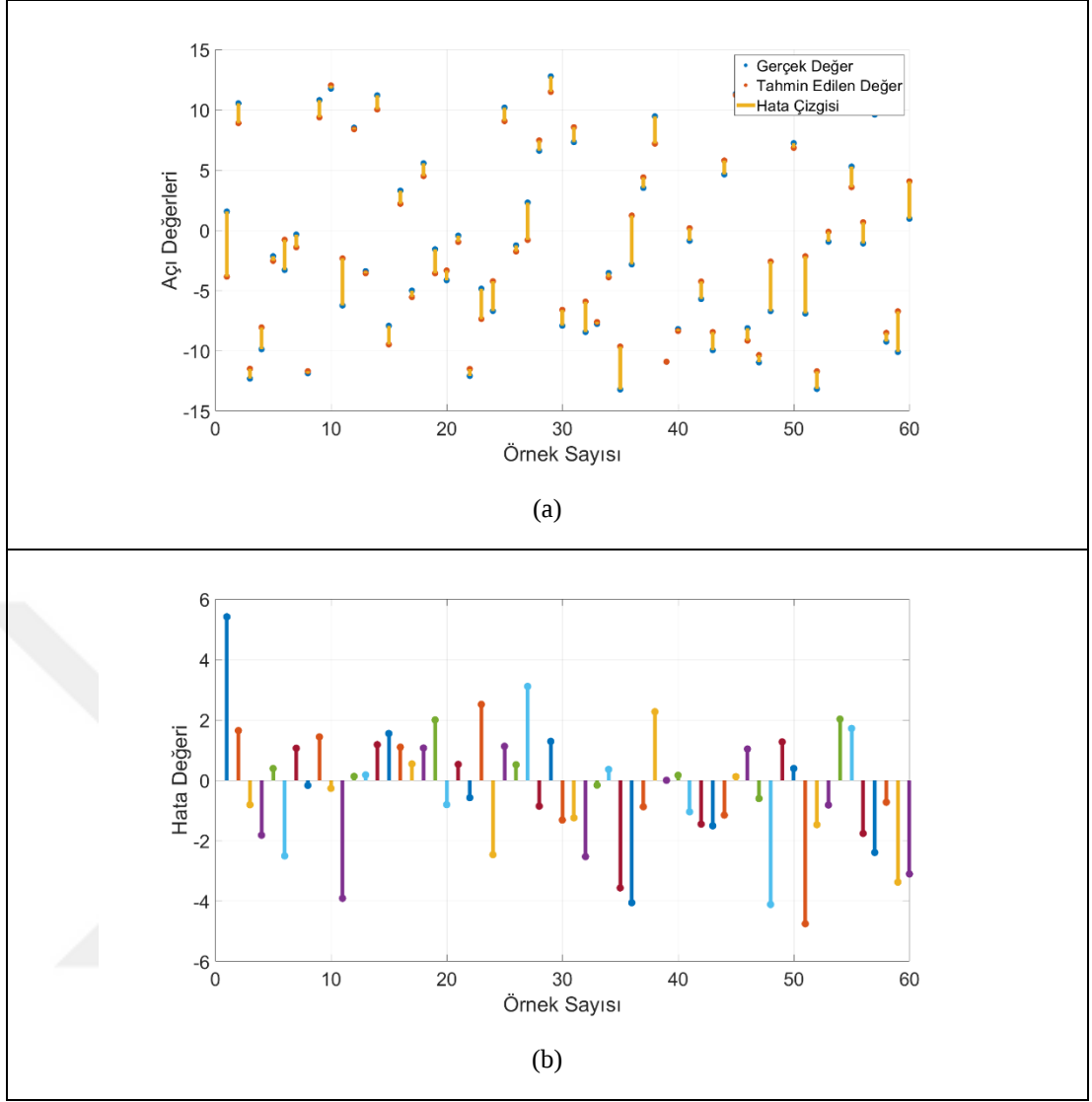
Şekil 4.3. Zaman düzleminde fsnrca için RTE algoritmasıyla S1 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açılış değerleri (b) hata değerleri



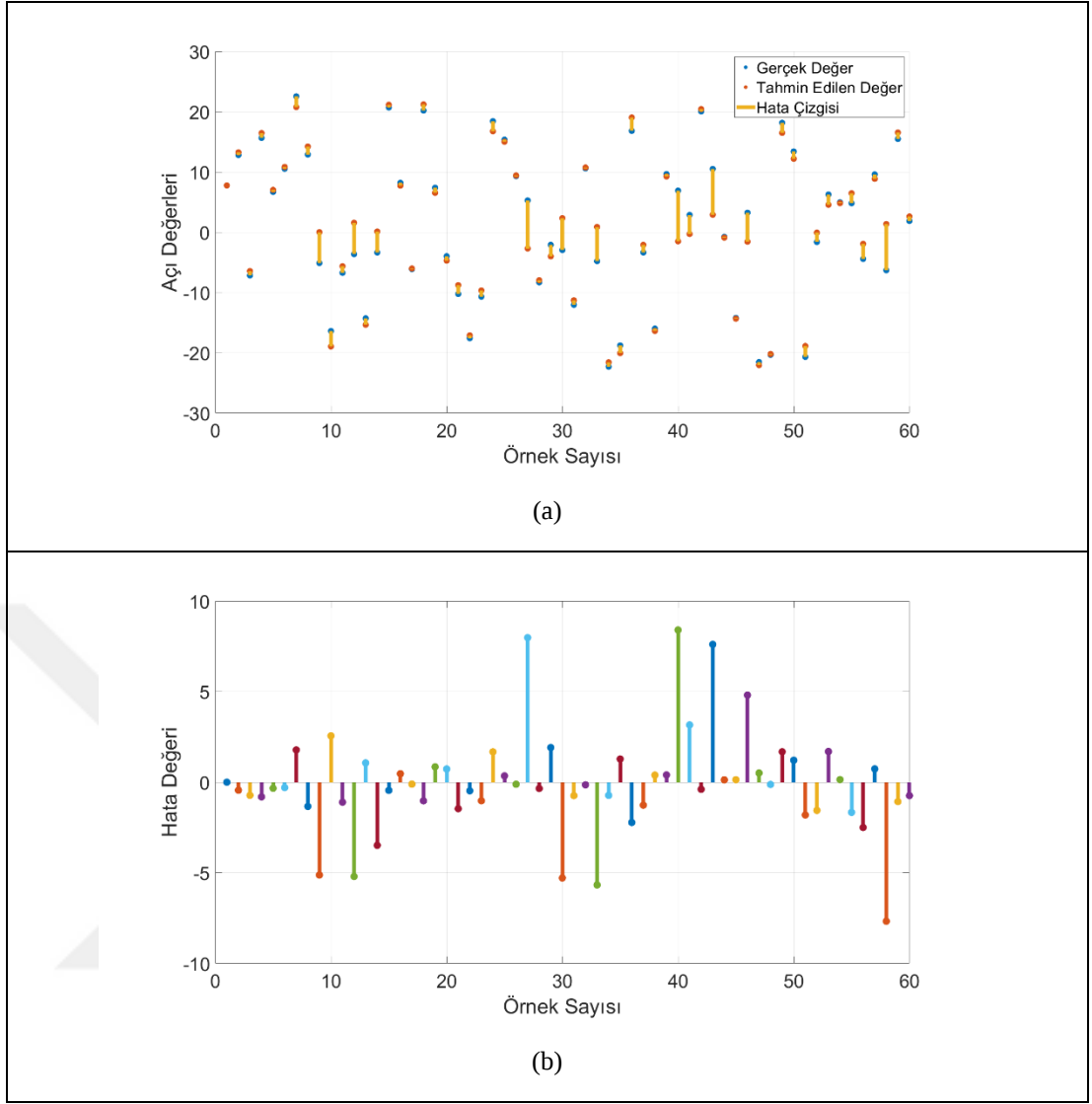
Şekil 4.4. Zaman düzleminde fsrnca için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) Açı değerleri (b) Hata değerleri



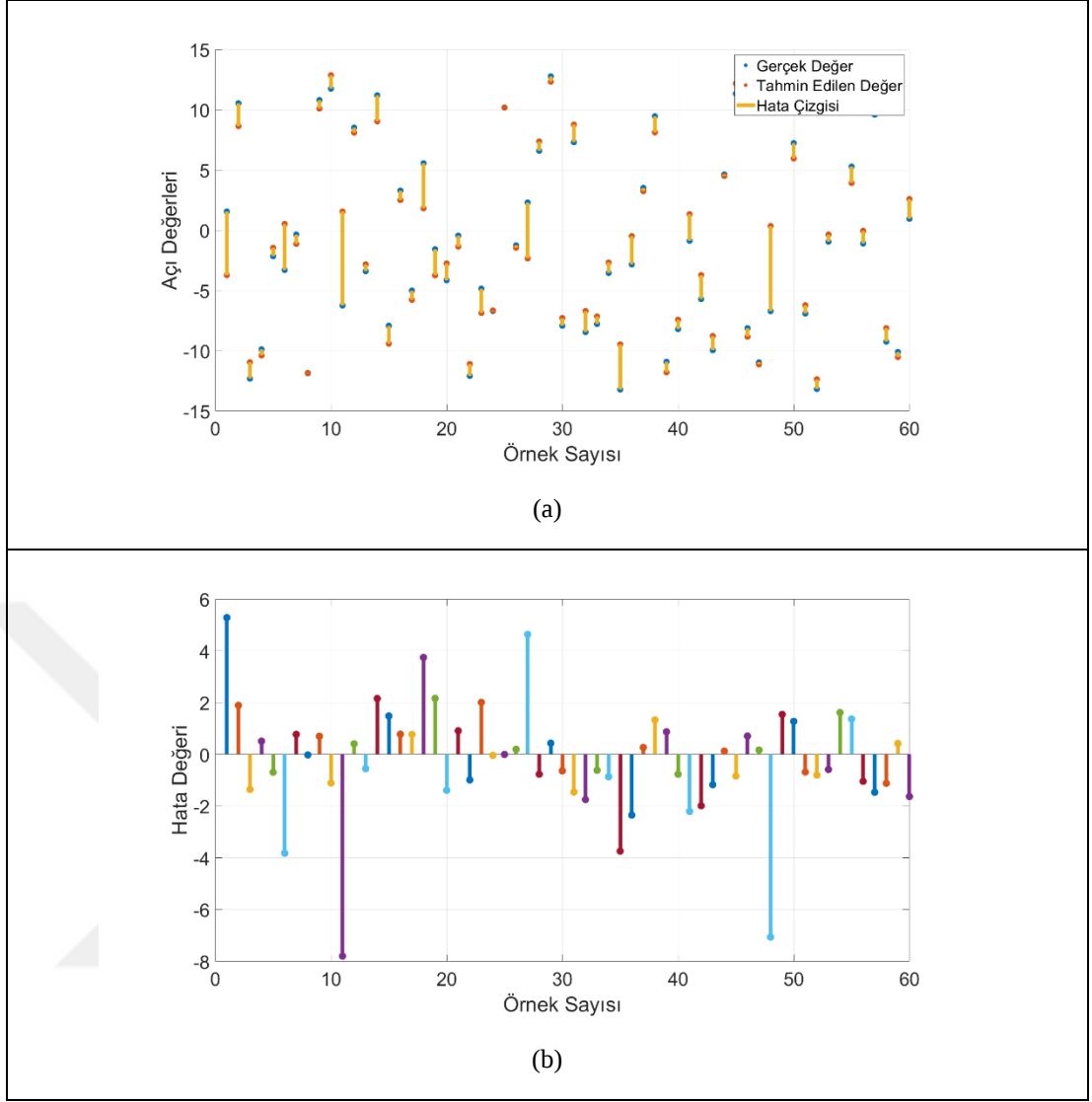
Şekil 4.5. Zaman düzleminde fsmrmr için GPR algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açılış değerleri (b) hata değerleri



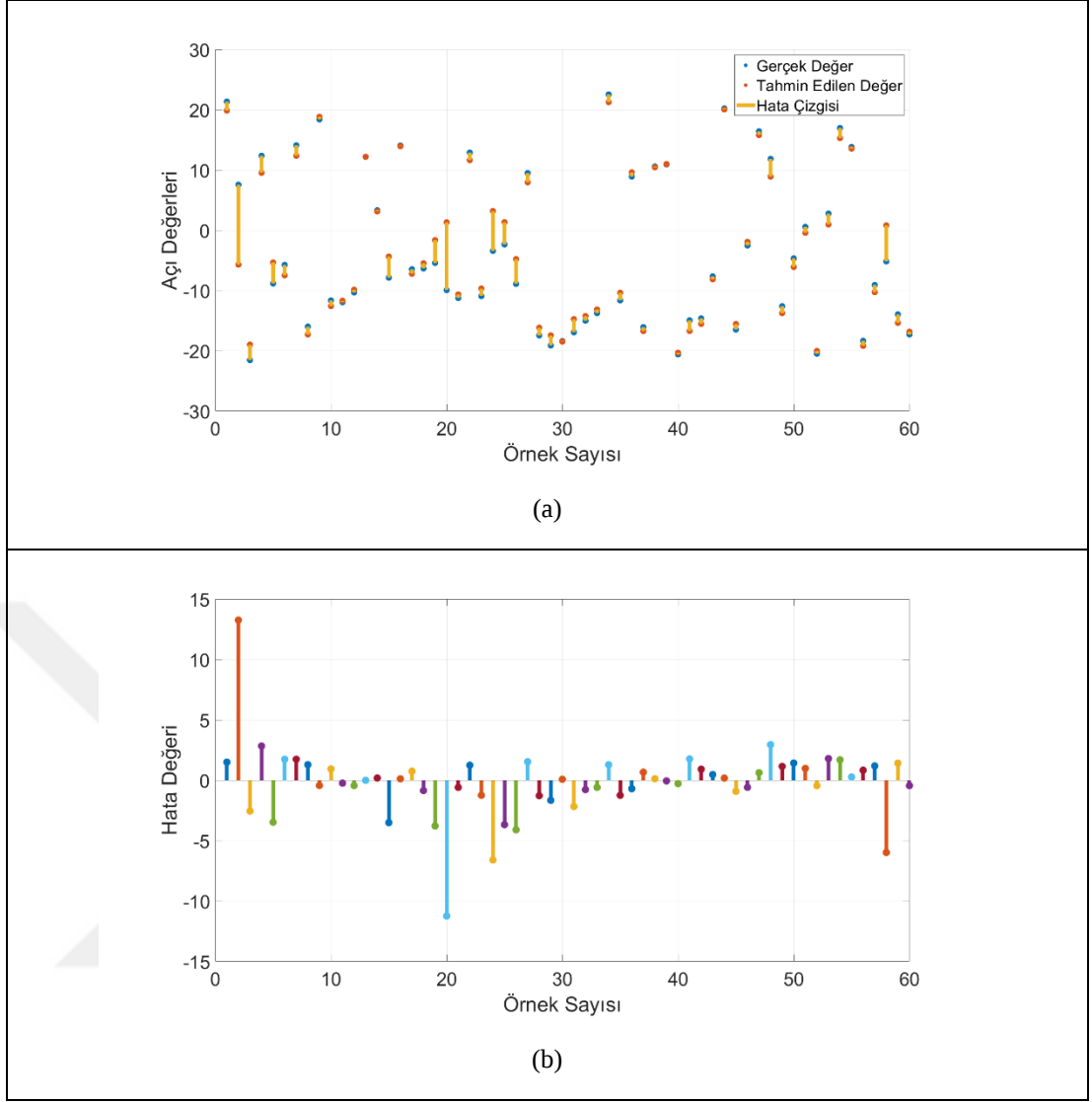
Şekil 4.6. Zaman düzleminde fsmrmr için SVM algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açığı değerleri (b) hata değerleri



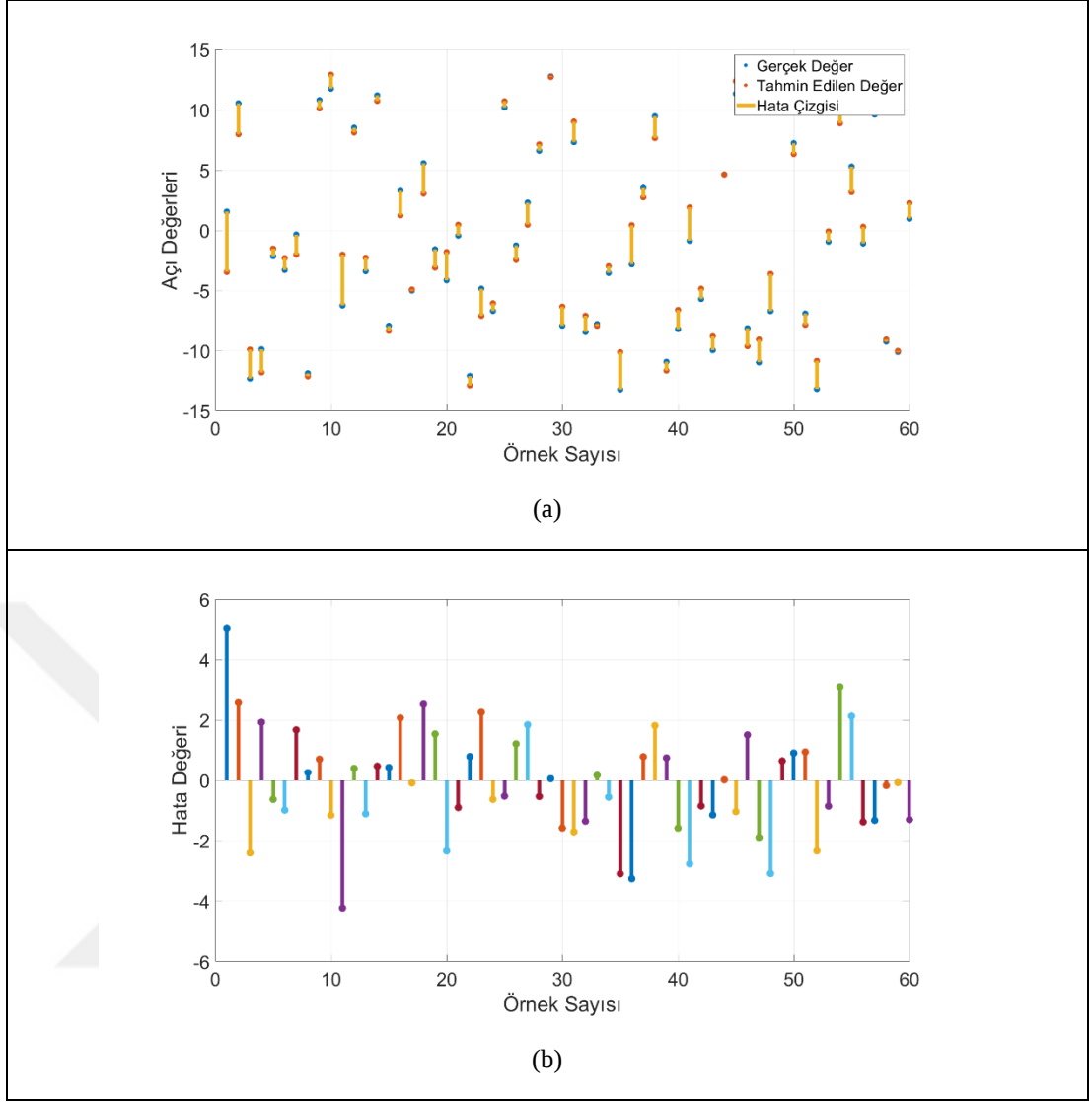
Şekil 4.7. Zaman düzleminde rrelieff için GPR algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açıcı değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.8. Zaman düzleminde relief için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açma değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.9. Zaman düzleminde sequentials için RTE algoritmasıyla S1 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açığı değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.10. Zaman düzleminde sequentials için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açma değerleri (b) hata değerleri

Tablo 4.7.'de, 4.1., 4.2., 4.3., 4.4. ve 4.5. nolu tabloların ortalama ve standart sapma değerleriyle birlikte ve öznelilik seçim yöntemlerine göre düşük RMSE ve açılma hata değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.7.'de Fsrftest öznelilik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılma hata değerleri sırasıyla 5.03 ± 1.60 , 3.08 ± 0.97 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılma hata değerleri sırasıyla 4.78 ± 1.44 , 3.59 ± 1.16 elde edilmiştir.

Fsrnca öznelilik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılma hata değerleri sırasıyla 4.94 ± 1.70 , 2.84 ± 0.92 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılma hata değerleri sırasıyla 4.65 ± 1.55 , 3.33 ± 1.11 elde edilmiştir.

Fsrmmr öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.20 ± 1.93 , 3.15 ± 1.08 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.66 ± 1.37 , 3.39 ± 1.09 elde edilmiştir.

RreliefF öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.44 ± 1.96 , 3.65 ± 1.43 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.75 ± 1.31 , 3.39 ± 1.05 elde edilmiştir.

Sequentials öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.07 ± 1.89 , 3.06 ± 1.05 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.68 ± 1.58 , 3.46 ± 1.19 elde edilmiştir.

Tablo 4.7. Zaman düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde ortalama RMSE hata metriği ve açısal hatası

			FSRFTEST	FSRNCA	FSRMMR	RRELIEFF	SEQUENTIALS
GPR	Yatay	RMSE	5.03±1.60	4.99±1.67	5.36±1.84	5.44±1.96	5.07±1.89
		Açısal Hata/°	3.08±0.97	2.99±0.98	3.17±1.34	3.65±1.43	3.06±1.05
	Dikey	RMSE	4.85±1.59	4.80±1.47	7.0±3.89	4.7±1.45	4.7±1.51
		Açısal Hata/°	3.55±1.24	3.42±1.13	4.58±1.43	3.55±1.18	3.58±1.16
	SVM	RMSE	6.80±2.35	6.77±2.24	5.95±0.93	8.09±2.55	7.55±3.54
		Açısal Hata/°	4.22±0.85	4.24±1.35	3.72±0.53	5.96±2.51	4.14±1.11
RT	Yatay	RMSE	5.47±1.53	6.19±1.57	5.54±1.98	5.92±2.26	6.35±2.65
		Açısal Hata/°	4.29±1.61	5.08±1.59	4.69±1.81	4.38±1.71	4.64±1.03
	Dikey	RMSE	5.76±2.17	5.59±2.15	5.61±2.11	6.01±1.66	5.64±2.05
		Açısal Hata/°	3.54±1.03	3.27±1.32	3.49±1.13	3.53±1.01	3.19±1.34
	RTE	RMSE	5.11±1.58	5.30±1.31	5.01±1.55	5.04±1.63	5.35±1.41
		Açısal Hata/°	3.82±1.24	3.66±1.09	3.73±1.19	3.64±1.25	3.89±1.20
RTE	Yatay	RMSE	5.17±1.78	4.94±1.70	5.20±1.93	5.49±1.61	5.69±2.27
		Açısal Hata/°	3.10±1.01	2.84±0.92	3.15±1.08	3.50±1.15	3.38±1.31
	Dikey	RMSE	4.78±1.44	4.65±1.55	4.66±1.37	4.75±1.31	4.68±1.58
		Açısal Hata/°	3.59±1.16	3.33±1.11	3.39±1.09	3.39±1.05	3.46±1.19

4.2. Frekans Düzleminde

Tablo 4.8.'de Fsrftest öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için

yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 12.38, 10.43 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.64, 4.72 ile GPR’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.72, 10.06 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 7.02, 5.58 ile GPR’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 14.24, 12.68 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.93, 5.60 ile GPR’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 15.07, 11.89 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.11, 4.20 ile GPR’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.25, 10.21 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 7.14, 5.76 ile RTE’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.28, 11.51 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.76, 5.38 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.8. Frekans düzleminde fsrftest öznelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısıl hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	12.43	12.31	14.42	15.58	13.25	13.35	1.25
		Açısıl Hata/°	10.24	8.81	12.78	12.37	10.21	11.56	1.51
	Dikey	RMSE	5.64	7.02	6.93	5.11	7.56	6.76	0.93
		Açısıl Hata/°	4.72	5.58	5.60	4.20	6.22	5.38	0.72
	SVM	RMSE	12.38	11.72	14.42	15.12	13.63	13.31	1.26
		Açısıl Hata/°	10.43	10.06	12.78	13.00	11.47	11.56	1.19
RT	Yatay	RMSE	8.04	7.66	7.44	5.20	7.61	7.54	1.03
		Açısıl Hata/°	6.98	6.20	6.27	4.21	6.80	6.44	1.00
	Dikey	RMSE	13.11	11.93	14.42	15.69	13.50	14.40	1.30
		Açısıl Hata/°	10.70	9.23	12.82	12.15	10.27	11.18	1.34
	RTE	RMSE	7.21	7.64	7.42	7.25	7.30	7.24	0.16
		Açısıl Hata/°	5.49	6.16	6.12	5.94	6.25	6.14	0.28
RTE	Yatay	RMSE	12.95	11.93	14.24	15.07	13.29	13.28	1.08
		Açısıl Hata/°	10.54	8.86	12.68	11.89	9.15	11.51	1.53
	Dikey	RMSE	5.88	7.20	7.13	5.86	7.14	7.23	0.67
		Açısıl Hata/°	4.68	5.69	5.68	4.91	5.76	6.19	0.57

Tablo 4.9.'da Fsrnca öznelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 11.41, 9.46 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.26, 3.90 ile GPR'de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 11.72, 9.35 ile RT'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 6.70, 5.18 ile GPR'de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 14.25, 12.67 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 7.03, 5.70 ile yine RTE'de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 15.10, 11.96 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.11, 4.04 ile GPR'de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.26, 10.73 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.84, 5.38 ile RTE’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.25, 11.50 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.86, 5.63 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.9. Frekans düzleminde fsnrca öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	12.50	12.99	14.42	15.71	13.34	13.25	13.70
		Açısal Hata/°	9.48	10.81	12.78	12.30	10.07	11.51	11.16
	Dikey	RMSE	5.26	6.70	7.16	5.11	7.34	6.86	6.40
		Açısal Hata/°	3.90	5.18	5.72	4.04	5.69	5.63	5.03
	SVM	RMSE	13.18	12.29	14.42	16.29	13.26	13.25	13.78
		Açısal Hata/°	11.96	10.52	12.78	12.47	10.73	11.50	11.66
RT	Yatay	RMSE	7.54	7.91	7.44	5.79	10.52	7.02	7.70
		Açısal Hata/°	6.32	6.79	6.27	4.94	6.13	5.77	6.04
	Dikey	RMSE	11.61	11.72	14.63	15.28	13.50	13.38	13.35
		Açısal Hata/°	8.99	9.35	12.94	12.75	10.27	11.27	10.93
	SVM	RMSE	7.06	7.49	7.42	7.44	7.30	7.18	7.31
		Açısal Hata/°	5.98	5.80	6.12	5.86	6.25	6.10	6.02
RTE	Yatay	RMSE	11.41	12.43	14.25	15.10	13.50	13.29	13.33
		Açısal Hata/°	9.46	8.97	12.67	11.96	9.50	11.52	10.68
	Dikey	RMSE	5.71	6.95	7.03	6.10	6.84	6.96	6.60
		Açısal Hata/°	4.17	5.49	5.70	4.93	5.38	5.79	5.24
	SVM	RMSE	11.41	12.43	14.25	15.10	13.50	13.29	13.33
		Açısal Hata/°	9.46	8.97	12.67	11.96	9.50	11.52	10.68

Tablo 4.10.’da Fsrmmr öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 12.51, 10.21 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.48, 4.33 ile RTE’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.89, 9.37 ile RT’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 7.14, 6.04 ile GPR’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 14.27, 12.68 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 7.22, 6.01 ile SVM’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 14.28, 12.13 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 6.11, 5.02 ile GPR’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 12.86, 10.48 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 7.61, 6.80 ile SVM’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 12.87, 11.12 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 7.07, 5.95 ile RTE’de elde edilmiştir.

Tablo 4.10. Frekans düzleminde frsmrmr öznelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açılal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD	
GPR	Yatay	RMSE	12.51	12.40	14.27	14.44	12.86	12.87	13.22	0.90
		Açısal Hata/°	10.21	9.67	12.68	12.47	10.48	11.12	11.10	1.23
	Dikey	RMSE	7.00	7.14	7.40	6.11	7.62	7.08	7.06	0.52
		Açısal Hata/°	5.83	6.04	6.16	5.02	6.81	5.76	5.94	0.58
SVM	Yatay	RMSE	13.64	12.14	14.54	14.28	16.36	13.25	14.03	1.42
		Açısal Hata/°	10.84	10.33	12.90	12.13	12.49	11.50	11.70	0.99
	Dikey	RMSE	7.13	7.91	7.22	6.64	7.61	7.54	7.34	0.45
		Açısal Hata/°	5.93	6.79	6.01	4.79	6.80	6.44	6.13	0.75
RT	Yatay	RMSE	13.02	11.89	14.63	14.69	13.57	13.38	13.53	1.05
		Açısal Hata/°	10.64	9.37	12.94	12.47	10.66	11.27	11.22	1.31
	Dikey	RMSE	7.06	7.71	7.71	6.24	7.63	7.24	7.26	0.57
		Açısal Hata/°	5.98	6.06	6.36	5.04	6.82	6.14	6.07	0.58
RTE	Yatay	RMSE	13.17	11.94	14.57	14.79	13.28	13.33	13.51	1.04
		Açısal Hata/°	10.58	9.16	12.91	12.36	10.64	11.58	11.20	1.36
	Dikey	RMSE	5.48	7.52	7.22	6.17	7.64	7.07	6.85	0.85
		Açısal Hata/°	4.33	6.31	6.04	4.92	6.82	5.95	5.73	0.93

Tablo 4.11.’de RreliefF öznelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 13.88, 12.39

ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.77, 3.34 ile yine SVM’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.45, 8.65 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 7.21, 6.04 ile RTE’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 14.27, 12.68 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.84, 5.55 ile yine GPR’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 14.39, 12.49 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.16, 4.14 ile GPR’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.52, 9.90 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 7.00, 5.91 ile yine GPR’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.10, 11.46 ile RT’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.81, 5.46 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.11. Frekans düzleminde rrelieff öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısıl hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	15.47	12.92	14.27	15.69	13.52	13.60	14.25
		Açısıl Hata/°	12.94	8.96	12.68	12.46	9.90	11.85	11.47
	Dikey	RMSE	5.87	7.26	6.84	5.16	7.00	6.81	6.49
		Açısıl Hata/°	4.26	5.74	5.55	4.14	5.91	5.46	5.18
	SVM	RMSE	13.88	11.45	14.33	14.39	13.95	13.26	13.54
		Açısıl Hata/°	12.39	8.65	12.73	12.49	11.75	11.54	11.59
RT	Yatay	RMSE	4.77	7.91	7.40	5.53	7.61	7.54	6.80
		Açısıl Hata/°	3.34	6.79	6.11	4.39	6.80	6.44	5.65
	Dikey	RMSE	14.44	13.54	14.67	15.78	14.42	13.10	14.33
		Açısıl Hata/°	11.83	9.31	12.96	12.64	9.75	11.46	11.33
	RTE	RMSE	7.06	7.48	7.37	7.43	7.35	7.26	7.33
		Açısıl Hata/°	5.98	6.06	5.24	6.14	6.46	5.99	5.98
RTE	Yatay	RMSE	13.93	12.27	14.28	15.86	13.57	13.25	13.86
		Açısıl Hata/°	12.42	9.63	12.69	12.95	9.67	11.51	11.48
	Dikey	RMSE	6.12	7.21	7.34	6.33	7.20	7.52	6.95
		Açısıl Hata/°	4.39	6.04	5.85	5.06	5.90	6.49	5.62

Tablo 4.12.'de Sequentials öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 11.51, 9.25 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.78, 4.13 ile GPR'de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 11.21, 8.92 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 6.21, 5.14 ile yine GPR'de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 14.27, 12.69 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 7.12, 5.73 ile yine GPR'de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 14.88, 12.61 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.74, 4.16 ile GPR'de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.78, 9.66 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.97, 5.85 ile yine GPR’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.25, 11.50 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.91, 5.61 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.12. Frekans düzleminde sequentials öznelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	13.30	11.21	14.27	14.97	13.78	13.66	13.53
		Açısal Hata/°	12.12	8.92	12.69	12.26	9.66	11.76	11.23
	Dikey	RMSE	5.78	6.21	7.12	5.74	6.97	6.91	6.45
		Açısal Hata/°	4.13	5.14	5.73	4.16	5.85	5.61	5.11
	Yatay	RMSE	13.18	11.24	14.41	15.09	13.59	13.25	13.46
		Açısal Hata/°	11.96	8.83	12.78	12.00	10.64	11.50	11.28
SVM	Yatay	RMSE	6.81	7.91	7.26	7.53	7.61	7.54	7.44
		Açısal Hata/°	5.08	6.79	6.05	6.45	6.80	6.44	6.27
	Dikey	RMSE	12.58	13.04	14.73	14.91	14.05	13.38	13.78
		Açısal Hata/°	9.52	10.71	12.99	12.37	11.84	11.27	11.45
	Yatay	RMSE	7.43	7.22	7.70	6.41	7.57	7.41	7.29
		Açısal Hata/°	5.61	5.58	6.07	5.06	6.67	6.41	5.90
RT	Yatay	RMSE	11.51	11.44	14.37	14.88	14.29	13.38	13.31
		Açısal Hata/°	9.25	9.03	12.75	12.61	11.25	11.61	11.09
	Dikey	RMSE	6.42	7.48	7.60	5.94	7.39	7.55	7.06
		Açısal Hata/°	5.01	6.18	6.30	4.61	6.64	6.08	5.80
RTE	Yatay	RMSE	11.51	11.44	14.37	14.88	14.29	13.38	13.31
		Açısal Hata/°	9.25	9.03	12.75	12.61	11.25	11.61	11.09
	Dikey	RMSE	6.42	7.48	7.60	5.94	7.39	7.55	7.06
		Açısal Hata/°	5.01	6.18	6.30	4.61	6.64	6.08	5.80

Tablo 4.13.’de, 4.8., 4.9., 4.10., 4.11. ve 4.12. nolu tabloların birey bazlı incelenmesi ve öznelik seçim yöntemlerine göre düşük RMSE ve açısal hata değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.13.’de Fsrftest öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde SVM algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.72, 10.06 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.11, 4.20 ile S4 kişisinde elde edilmiştir.

Fsrnca öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.41, 9.46 ile S1 kişisinde elde

edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.11, 4.04 ile S4 kişisinde elde edilmiştir.

Fsrmmr öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RT algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.89, 9.37 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.48, 4.33 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

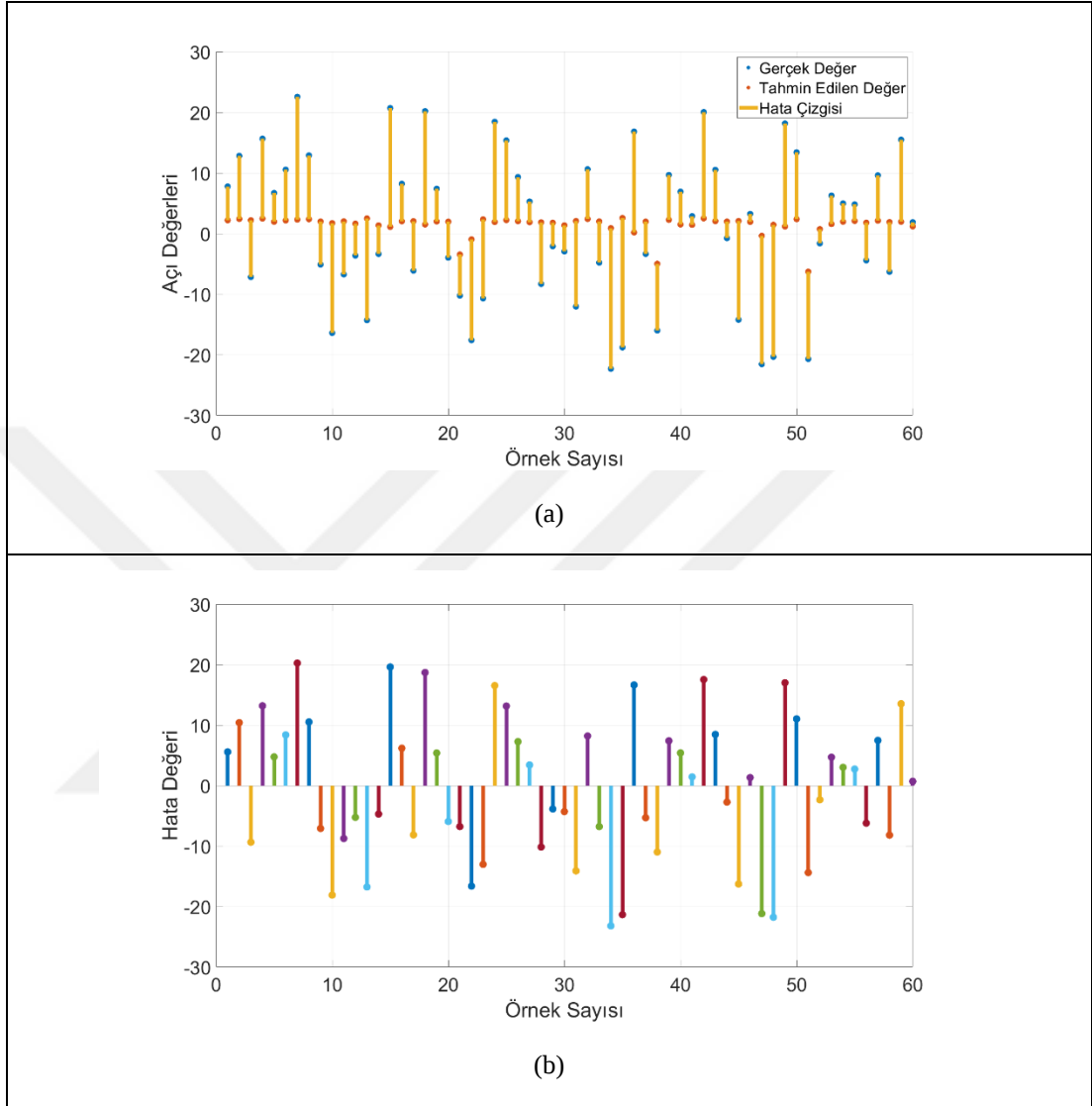
Rrelieff öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde SVM algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.45, 8.65 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise SVM algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.77, 3.34 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

Sequentials öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.21, 8.92 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.74, 4.16 ile S4 kişisinde elde edilmiştir.

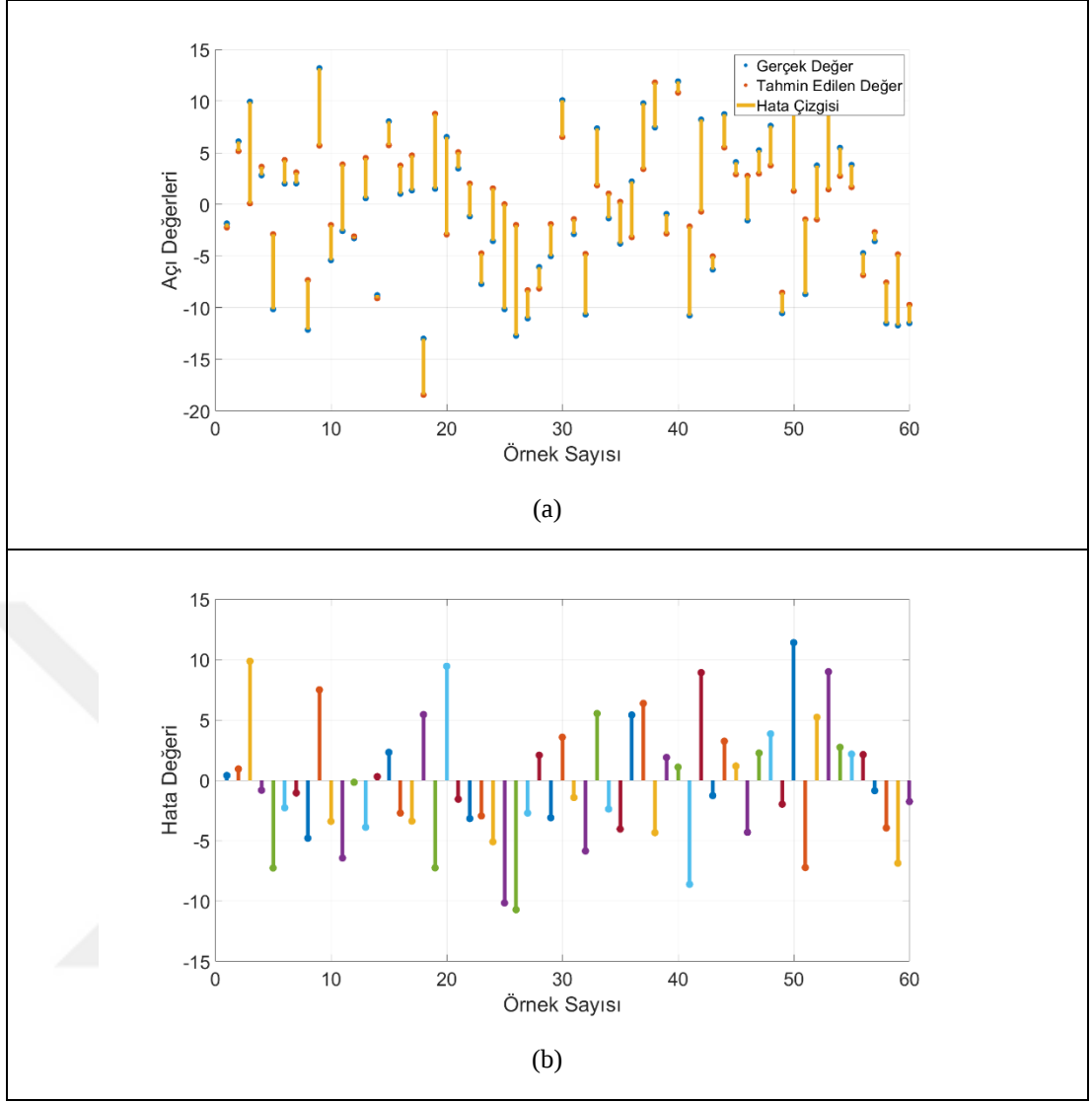
Tablo 4.13. Frekans düzleminde tüm öznelik seçim yöntemlerinde bireyler için en düşük RMSE hata metriği ve açısal hatası

			FSRFTEST	FSRNCA	FSRMRMR	RRELIEFF	SEQUENTIALS
GPR	Yatay	RMSE	12.31(S2)	12.50(S1)	12.40(S2)	12.92(S2)	11.21(S2)
		Açısal Hata/°	8.81(S2)	9.48(S1)	9.67(S2)	8.96(S2)	8.92(S2)
	Dikey	RMSE	5.11(S4)	5.11(S4)	6.11(S4)	5.16(S4)	5.74(S4)
		Açısal Hata/°	4.20(S4)	4.04(S4)	5.02(S4)	4.14(S4)	4.16(S4)
	SVM	RMSE	11.72(S2)	12.29(S2)	12.14(S2)	11.45(S2)	11.24(S2)
		Açısal Hata/°	10.06(S2)	10.52(S2)	10.33(S2)	8.65(S2)	8.83(S2)
RT	Yatay	RMSE	5.20(S4)	5.79(S4)	6.64(S4)	4.77(S1)	6.81(S1)
		Açısal Hata/°	4.21(S4)	4.94(S4)	4.79(S4)	3.34(S1)	5.08(S1)
	Dikey	RMSE	11.93(S2)	11.61(S1)	11.89(S2)	13.10(S1)	12.58(S1)
		Açısal Hata/°	9.23(S2)	8.99(S1)	9.37(S2)	11.46(S1)	9.52(S1)
	RTE	RMSE	7.21(S1)	7.06(S1)	6.24(S4)	7.06(S1)	6.41(S4)
		Açısal Hata/°	5.49(S1)	5.98(S1)	5.04(S4)	5.98(S1)	5.06(S4)
RTE	Yatay	RMSE	11.93(S2)	11.41(S1)	11.94(S2)	12.27(S2)	11.44(S2)
		Açısal Hata/°	8.86(S2)	9.46(S1)	9.16(S2)	9.63(S2)	9.03(S2)
	Dikey	RMSE	5.86(S4)	5.71(S1)	5.48(S1)	6.12(S1)	5.94(S4)
		Açısal Hata/°	4.91(S4)	4.17(S1)	4.33(S1)	4.39(S1)	4.61(S4)

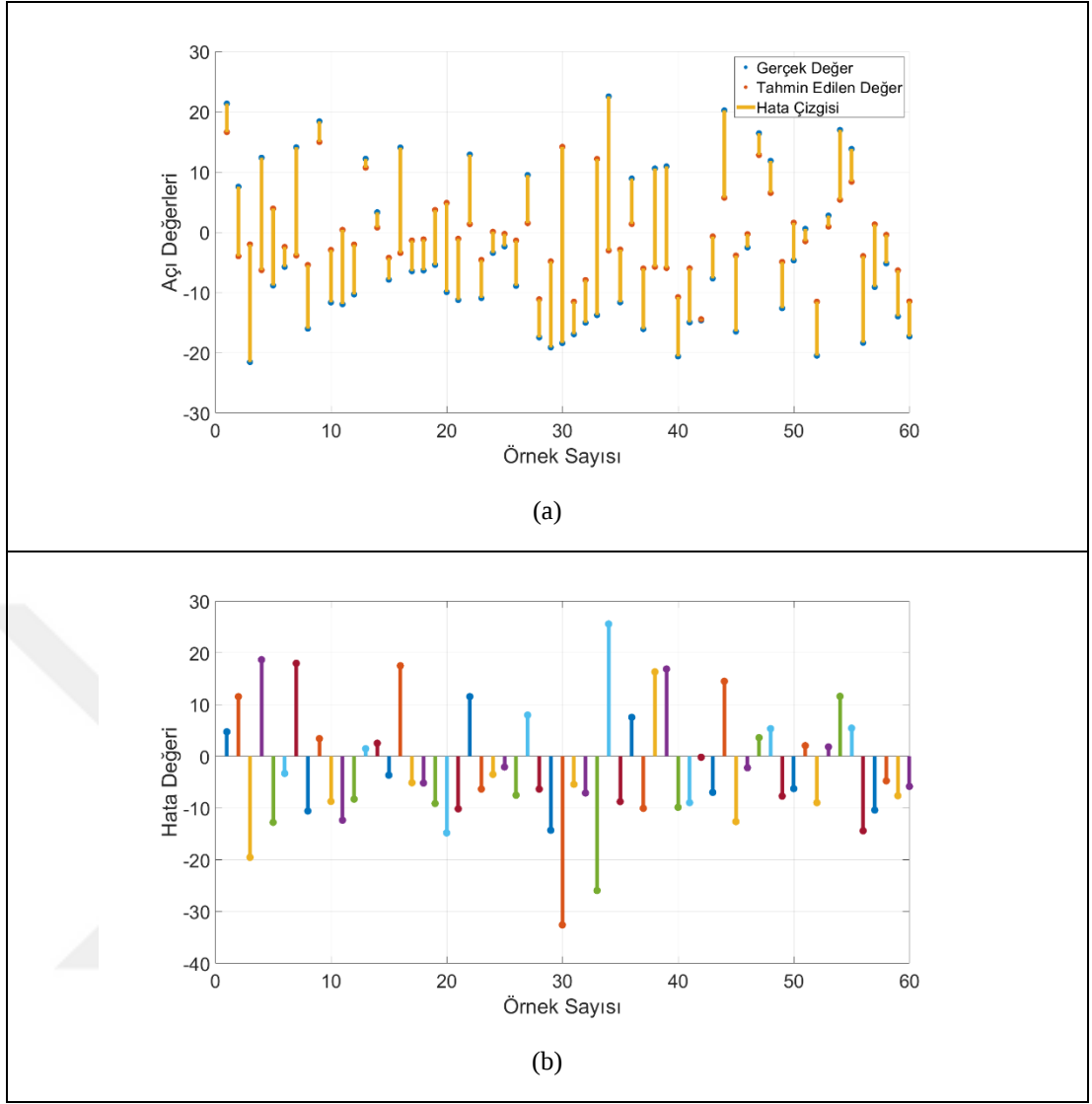
4.11., 4.12., 4.13., 4.14., 4.15., 4.16., 4.17., 4.18., 4.19. ve 4.20, nolu şekillerde, tablo 4.13.'deki öznelilik seçim yöntemlerine göre en iyi yatay ve dikey EOG bileşenlerinin (a) açılma değerleri ve (b) hata değerlerinin grafikleri verilmektedir.



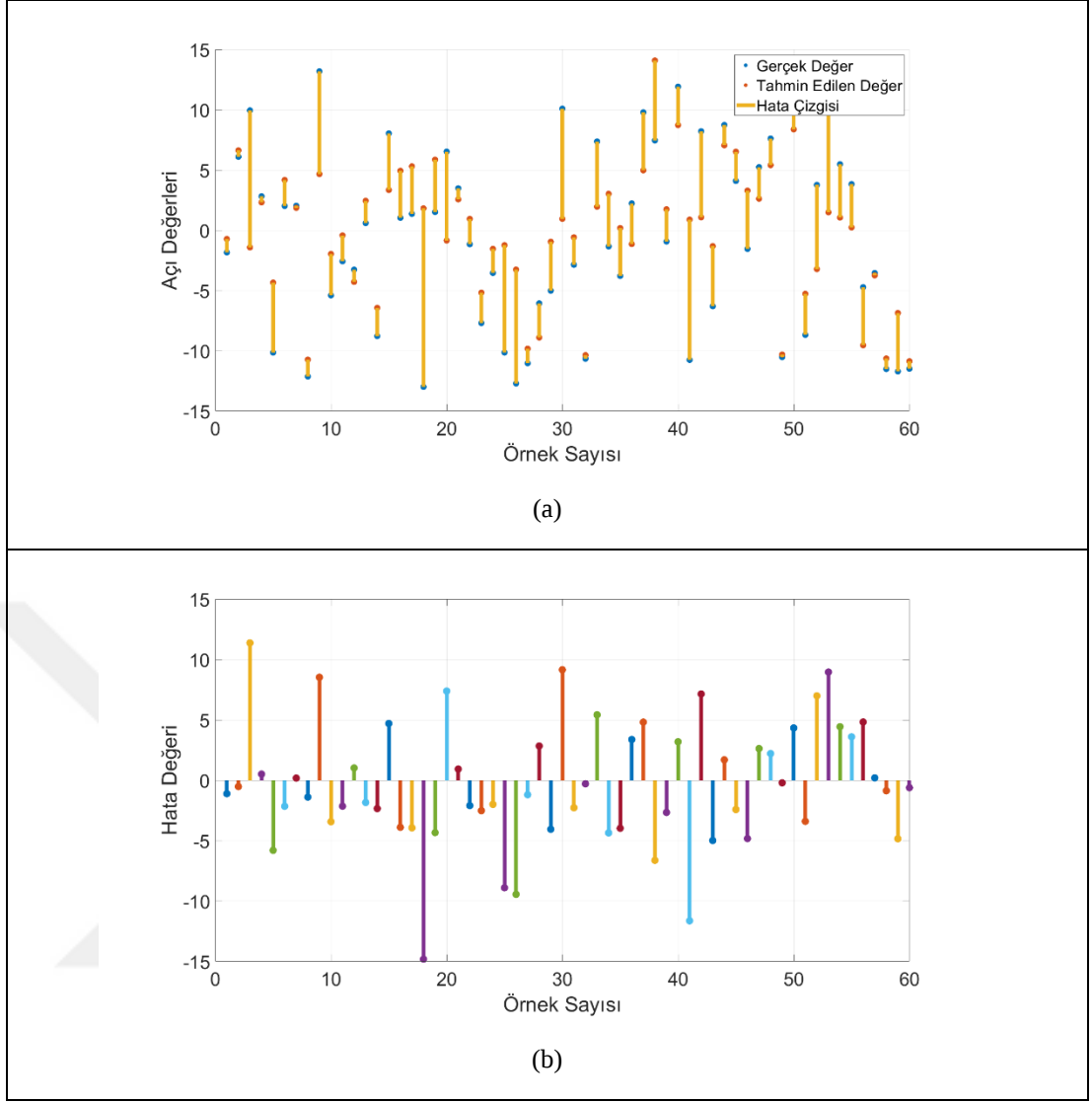
Şekil 4.11. Frekans düzleminde fsrftest için SVM algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşeninin (a) açılma değerleri (b) hata değerleri



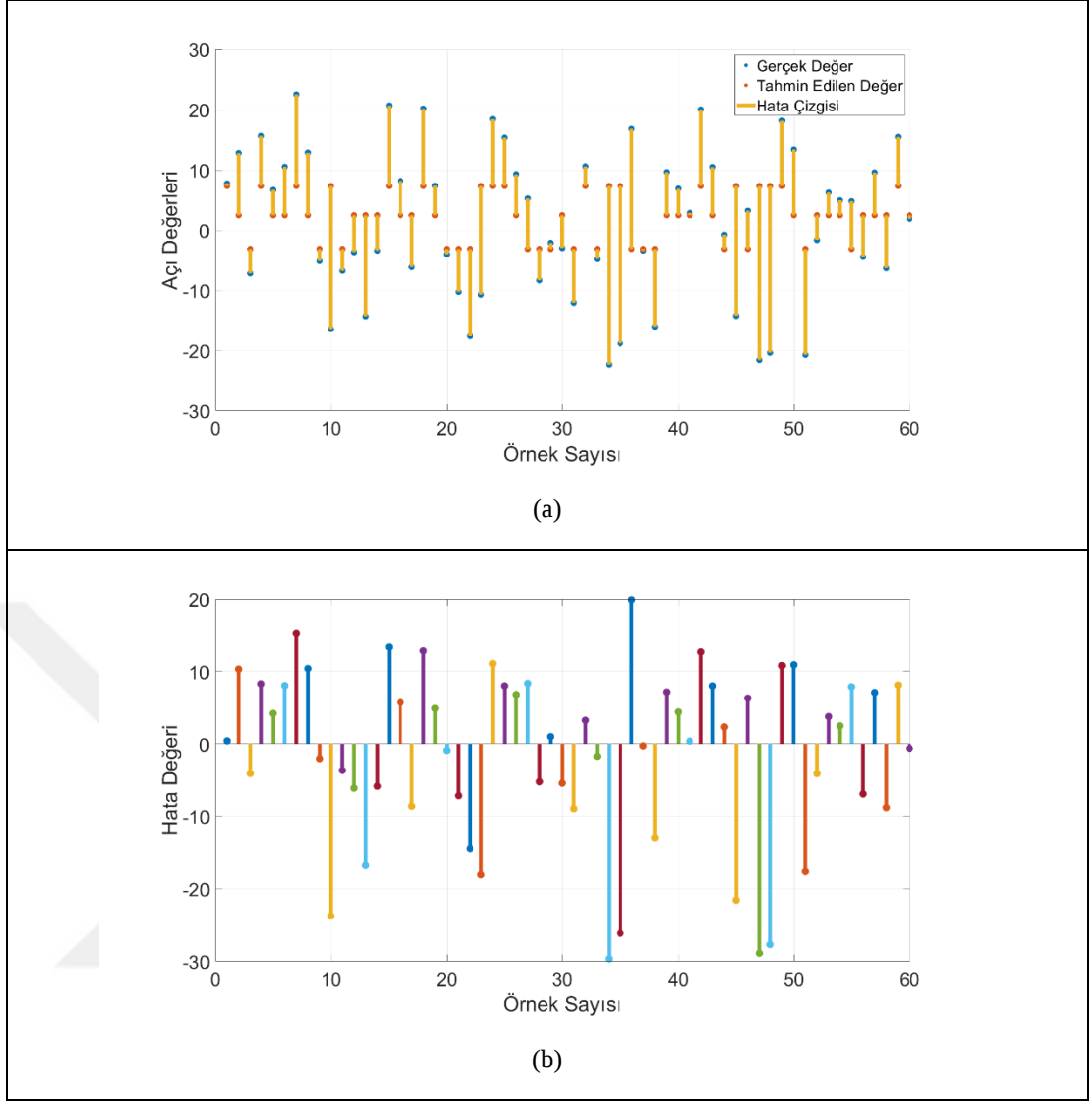
Şekil 4.12. Frekans düzleminde fsrftest için GPR algoritmasıyla S4 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açığı değerleri (b) hata değerleri



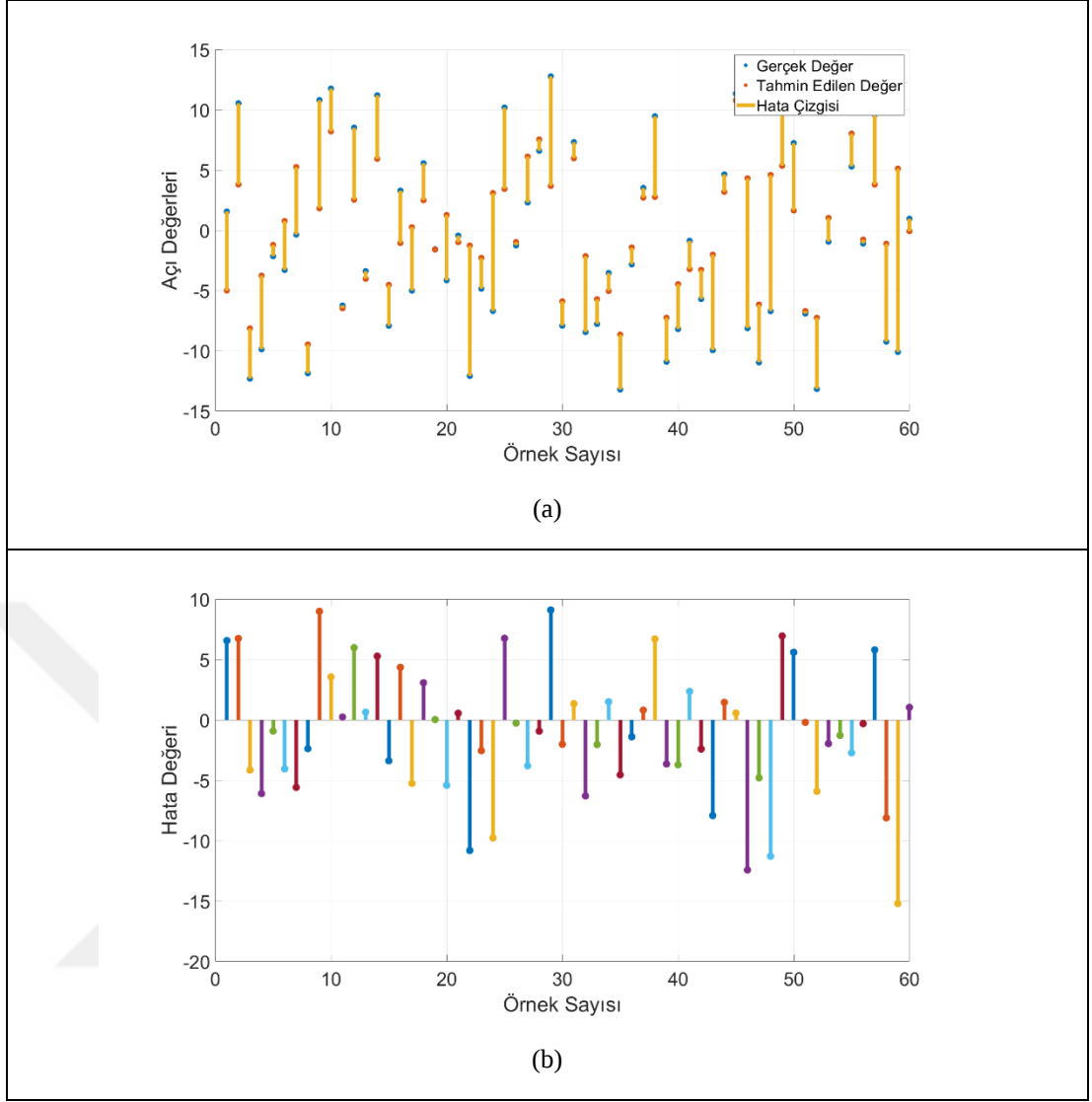
Şekil 4.13. Frekans düzleminde fsrnca için RTE algoritmasıyla S1 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açığı değerleri (b) hata değerleri



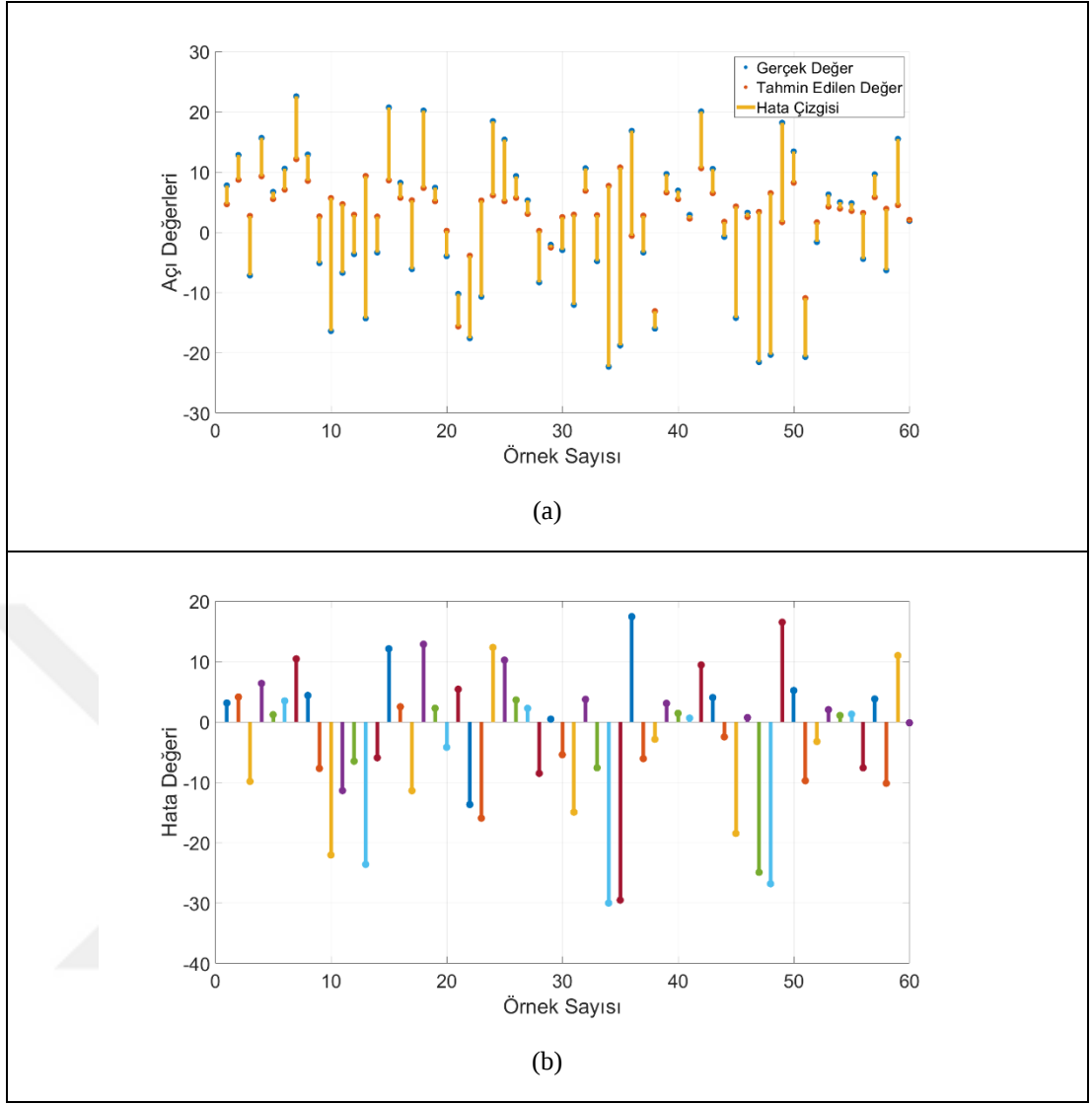
Şekil 4.14. Frekans düzleminde fsrnca için GPR algoritmasıyla S4 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açığı değerleri (b) hata değerleri



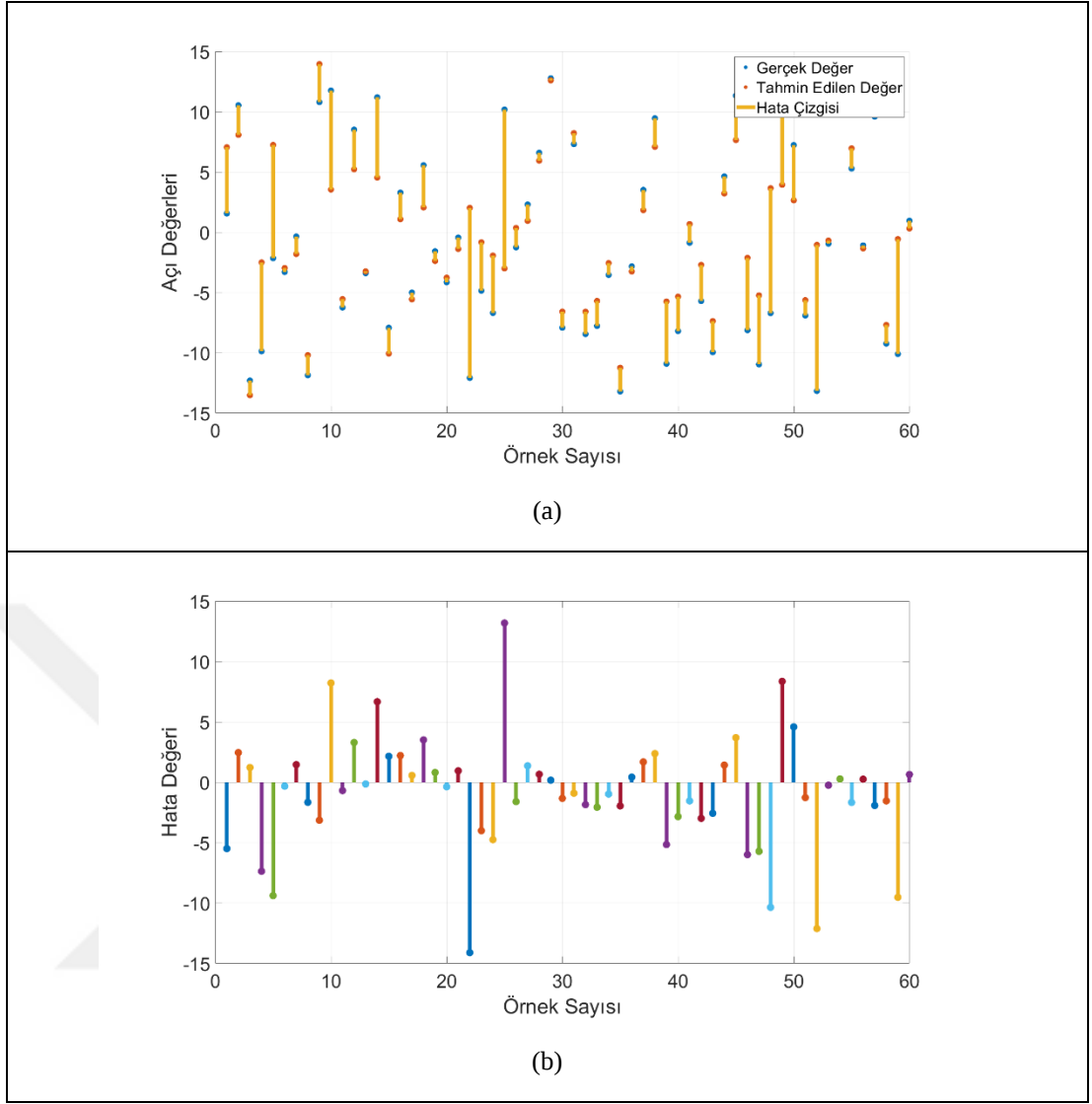
Şekil 4.15. Frekans düzleminde fşrmımr için RT algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) aç ı değ erleri (b) hata değ erleri



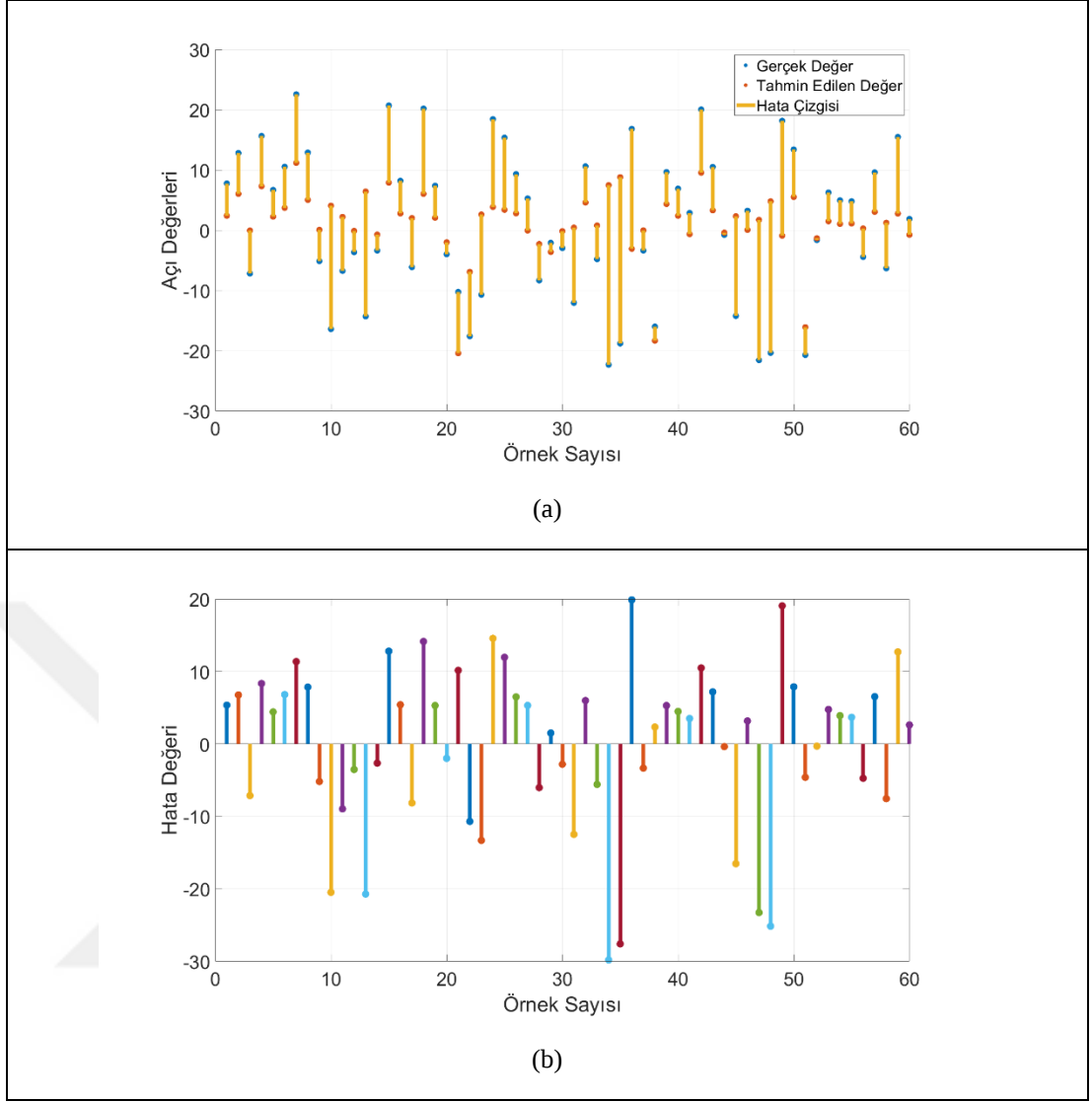
Şekil 4.16. Frekans düzleminde f_sm_mr için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açı değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.17. Frekans düzleminde rrelieff için SVM algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açığı değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.18. Frekans düzleminde rrelieff için SVM algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açılı değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.19. Frekans düzleminde sequentials için GPR algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açığı değerleri (b) hata değerleri

Fsrmmr öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.22 ± 0.90 , 11.10 ± 1.23 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.85 ± 0.85 , 5.73 ± 0.93 elde edilmiştir.

RreliefF öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde SVM algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.54 ± 1.10 , 11.59 ± 1.51 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.49 ± 0.80 , 5.18 ± 0.77 elde edilmiştir.

Sequentials öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.31 ± 1.50 , 11.09 ± 1.61 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.45 ± 0.62 , 5.11 ± 0.78 elde edilmiştir.

Tablo 4.14. Frekans düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde ortalama RMSE hata metriği ve açısal hatası

			FSRFTEST	FSRNCA	FSRMMR	RRELIEFF	SEQUENTIALS
GPR	Yatay	RMSE	13.56±1.25	13.70±1.17	13.22±0.90	14.25±1.12	13.53±1.28
		Açısal Hata/°	11.00±1.51	11.16±1.28	11.10±1.23	11.47±1.64	11.23±1.55
	Dikey	RMSE	6.50±0.93	6.40±0.97	7.06±0.52	6.49±0.80	6.45±0.62
		Açısal Hata/°	5.28±0.72	5.03±0.84	5.94±0.58	5.18±0.77	5.11±0.78
SVM	Yatay	RMSE	13.43±1.26	13.78±1.40	14.03±1.42	13.54±1.10	13.46±1.31
		Açısal Hata/°	11.56±1.19	11.66±0.92	11.70±0.99	11.59±1.51	11.28±1.39
	Dikey	RMSE	7.25±1.03	7.70±1.56	7.34±0.45	6.80±1.31	7.44±0.37
		Açısal Hata/°	6.15±1.00	6.04±0.63	6.13±0.75	5.65±1.44	6.27±0.65
RT	Yatay	RMSE	13.84±1.30	13.35±1.49	13.53±1.05	14.33±0.94	13.78±0.94
		Açısal Hata/°	11.18±1.34	10.93±1.68	11.22±1.31	11.33±1.50	11.45±1.24
	Dikey	RMSE	7.35±0.16	7.31±0.17	7.26±0.57	7.33±0.15	7.29±0.46
		Açısal Hata/°	6.02±0.28	6.02±0.17	6.07±0.58	5.98±0.40	5.90±0.60
RTE	Yatay	RMSE	13.46±1.08	13.33±1.31	13.51±1.04	13.86±1.20	13.31±1.50
		Açısal Hata/°	10.77±1.53	10.68±1.56	11.20±1.36	11.48±1.50	11.09±1.61
	Dikey	RMSE	6.74±0.67	6.60±0.56	6.85±0.85	6.95±0.58	7.06±0.71
		Açısal Hata/°	5.49±0.57	5.24±0.61	5.73±0.93	5.62±0.76	5.80±0.80

4.3. Zaman-Frekans Düzleminde

Tablo 4.15.'de Fsrftest öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için

yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.96, 0.96 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.09, 1.53 ile GPR’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.19, 0.93 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.57, 2.29 ile GPR’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.78, 1.22 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.47, 2.71 ile GPR’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.30, 1.69 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.38, 3.25 ile GPR’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.64, 1.84 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.49, 3.22 ile GPR’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.33, 2.50 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.00, 2.65 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.15. Zaman-frekans düzleminde fsrfest öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

			S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	1.96	1.25	2.70	2.30	2.64	3.80	2.44	0.85
		Açısal Hata/°	0.96	0.91	1.67	1.69	1.84	2.52	1.60	0.60
	Dikey	RMSE	2.09	3.57	3.47	4.38	4.49	4.00	3.67	0.87
		Açısal Hata/°	1.53	2.29	2.71	3.25	3.22	2.65	2.61	0.64
SVM	Yatay	RMSE	7.27	8.50	10.12	8.24	8.75	9.42	8.72	0.98
		Açısal Hata/°	5.79	6.26	6.98	6.91	6.68	7.07	6.61	0.50
	Dikey	RMSE	6.42	5.33	5.86	8.11	7.61	5.35	6.45	1.17
		Açısal Hata/°	5.23	4.15	4.87	5.96	6.80	4.33	5.22	1.01
RT	Yatay	RMSE	2.84	1.27	1.78	2.69	5.08	3.35	2.84	1.33
		Açısal Hata/°	1.21	1.00	1.34	2.04	2.94	2.56	1.85	0.79
	Dikey	RMSE	3.20	5.72	4.06	6.41	5.35	4.21	4.83	1.20
		Açısal Hata/°	2.00	3.41	2.92	4.36	3.86	3.13	3.28	0.81
RTE	Yatay	RMSE	2.13	1.19	1.78	2.44	3.24	3.33	2.35	0.83
		Açısal Hata/°	1.01	0.93	1.22	1.70	2.10	2.50	1.58	0.63
	Dikey	RMSE	2.51	3.58	4.39	5.60	5.07	4.11	4.21	1.09
		Açısal Hata/°	1.77	2.47	3.59	3.68	3.68	2.95	3.02	0.78

Tablo 4.16.’de Fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.99, 1.00 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.11, 1.54 ile GPR’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.17, 0.96 ile RT’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.79, 2.80 ile RTE’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.43, 1.13 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.55, 3.52 ile GPR’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.48, 1.80 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.18, 3.17 ile GPR’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.62, 1.82 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.45, 3.14 ile GPR’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.83, 1,68 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.79, 2.64 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.16. Zaman-frekans düzleminde fsnrca öznelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	1,99	1,22	2,51	2,52	2,62	3,77	2,44
		Açısal Hata/°	1,00	0,88	1,60	1,85	1,82	1,83	1,50
	Dikey	RMSE	2,11	4,24	4,55	4,18	4,45	3,79	3,89
		Açısal Hata/°	1,54	3,08	3,52	3,17	3,14	2,64	2,85
	SVM	RMSE	7,12	3,29	14,40	8,27	8,46	8,12	8,28
		Açısal Hata/°	5,45	2,47	7,13	7,07	6,81	6,74	5,95
RT	Yatay	RMSE	2,99	1,17	1,75	3,15	5,29	3,47	2,97
		Açısal Hata/°	1,31	0,96	1,38	2,14	2,85	2,21	1,81
	Dikey	RMSE	3,08	5,62	4,87	6,42	5,21	4,74	4,99
		Açısal Hata/°	1,89	3,57	3,58	4,35	3,60	3,31	3,38
	RTE	RMSE	2,06	1,17	1,43	2,48	2,93	2,83	2,15
		Açısal Hata/°	1,08	0,88	1,13	1,80	1,79	1,68	1,39
RTE	Yatay	RMSE	2,61	3,79	4,64	5,53	5,00	3,93	4,25
		Açısal Hata/°	1,65	2,80	3,79	3,44	3,55	2,77	3,00
	Dikey	RMSE	2,06	1,17	1,43	2,48	2,93	2,83	2,15
		Açısal Hata/°	1,08	0,88	1,13	1,80	1,79	1,68	1,39
	SVM	RMSE	7,12	3,29	14,40	8,27	8,46	8,12	8,28
		Açısal Hata/°	5,45	2,47	7,13	7,07	6,81	6,74	5,95

Tablo 4.17.’de Fsrmmr öznelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.50, 4.51 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.83, 2.12 ile RTE’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.78, 2.12 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.26, 2.26 ile GPR’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.33, 5.27 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.83, 3.77 ile RTE’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.33, 4.88 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.94, 4.89 ile RT’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.45, 4.42 ile SVM’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.68, 3.44 ile GPR’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.66, 5.57 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.02, 4.09 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.17. Zaman-frekans düzleminde fsrmrmr öznelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD	
GPR	Yatay	RMSE	5,60	2,88	6,33	6,33	5,50	6,66	5,55	1,38
		Açısal Hata/°	4,65	2,27	5,27	4,88	4,58	5,57	4,53	1,17
	Dikey	RMSE	3,09	3,26	5,32	5,95	4,68	5,02	4,55	1,15
		Açısal Hata/°	2,28	2,26	4,10	4,91	3,44	4,09	3,51	1,07
SVM	Yatay	RMSE	5,50	2,78	6,37	6,36	5,45	7,01	5,58	1,49
		Açısal Hata/°	4,51	2,12	5,35	5,08	4,42	6,01	4,58	1,34
	Dikey	RMSE	4,77	3,31	6,53	6,38	5,78	6,29	5,51	1,25
		Açısal Hata/°	3,94	2,31	5,32	5,19	4,51	4,97	4,37	1,13
RT	Yatay	RMSE	6,21	3,07	6,46	6,63	5,92	6,64	5,82	1,38
		Açısal Hata/°	5,05	2,47	5,42	5,17	4,62	5,60	4,72	1,15
	Dikey	RMSE	3,89	3,93	5,45	5,94	5,37	5,67	5,04	0,90
		Açısal Hata/°	2,57	2,60	3,69	4,89	3,75	4,70	3,70	0,99
RTE	Yatay	RMSE	5,91	2,84	6,34	6,61	5,89	6,74	5,72	1,45
		Açısal Hata/°	4,91	2,10	5,36	5,13	4,91	5,67	4,68	1,30
	Dikey	RMSE	2,83	3,69	4,83	6,17	5,02	5,35	4,65	1,20
		Açısal Hata/°	2,12	2,48	3,77	4,92	3,84	4,40	3,59	1,09

Tablo 4.18.’de RreliefF öznelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.12, 1.04 ile

GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.12, 2.17 ile RTE’de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 0.96, 0.77 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.74, 2.52 ile GPR’de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.80, 1.29 ile RT’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.38, 3.57 ile GPR’de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.47, 1.82 ile RTE’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.55, 3.51 ile GPR’de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.45, 2.28 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.52, 4.50 ile RTE’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.66, 1,75 ile RT’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.87, 2.64 ile GPR’de elde edilmiştir.

Tablo 4.18. Zaman-frekans düzleminde rrelieff öznitelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısıl hataları

			S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	2.12	1.08	2.03	2.55	3.45	3.33	2.43	0.89
		Açısal Hata/°	1.04	0.82	1.31	1.96	2.28	1.74	1.52	0.56
	Dikey	RMSE	3.44	3.74	4.38	4.55	5.65	3.87	4.27	0.79
		Açısal Hata/°	2.22	2.52	3.57	3.51	4.29	2.64	3.12	0.79
SVM	Yatay	RMSE	12.18	8.43	12.50	8.95	9.12	12.12	10.55	1.90
		Açısal Hata/°	11.96	6.43	10.29	6.86	7.13	5.94	8.10	2.44
	Dikey	RMSE	8.05	5.94	7.02	6.17	6.18	6.73	6.68	0.78
		Açısal Hata/°	7.09	4.86	6.01	5.25	4.94	5.41	5.59	0.84
RT	Yatay	RMSE	2.98	1.69	1.80	3.28	4.63	2.66	2.84	1.08
		Açısal Hata/°	1.26	1.30	1.29	2.22	2.71	1.75	1.75	0.60
	Dikey	RMSE	3.59	4.60	5.77	5.82	5.64	4.77	5.03	0.88
		Açısal Hata/°	2.31	2.71	4.05	3.99	4.32	3.30	3.45	0.81
RTE	Yatay	RMSE	2.59	0.96	1.83	2.47	4.29	2.98	2.52	1.12
		Açısal Hata/°	1.26	0.77	1.27	1.82	2.60	1.82	1.59	0.63
	Dikey	RMSE	3.12	3.83	4.88	5.84	5.52	4.06	4.54	1.05
		Açısal Hata/°	2.17	2.51	3.96	4.12	4.50	3.06	3.39	0.95

Tablo 4.19.'da Sequentials öznitelik seçim yöntemiyle çıkarılan öznitelikler ile beslenen makine öğrenmesi algoritmalarında kişi bazlı bakıldığında S1 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.13, 1.03 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşenine geldiğimizde S1 kişisi için en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.11, 1.54 ile GPR'de elde edilmiştir.

S2 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 1.09, 0.89 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 3.84, 2.50 ile GPR'de elde edilmiştir.

S3 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 1.32, 0.95 ile RTE'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 4.23, 3.43 ile GPR'de elde edilmiştir.

S4 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.65, 2.10 ile GPR'de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 5.30, 3.74 ile RTE'de elde edilmiştir.

S5 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.10, 2.02 ile GPR’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.94, 3.80 ile GPR’de elde edilmiştir.

S6 kişisi için yatay EOG bileşeninde en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.71, 1,71 ile RT’de elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.04, 2.87 ile RT’de elde edilmiştir.

Tablo 4.19. Zaman-frekans düzleminde sequentials öznelik seçim yöntemiyle RMSE hata metriği ve açısal hataları

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	ORT	STD
GPR	Yatay	RMSE	2.13	1.14	1.73	2.65	3.10	2.92	2.28
		Açısal Hata/°	1.03	0.88	1.26	2.10	2.02	1.69	1.50
	Dikey	RMSE	2.11	3.84	4.23	5.71	4.94	4.31	4.19
		Açısal Hata/°	1.54	2.50	3.43	3.94	3.80	3.19	3.07
	SVM	RMSE	6.24	7.91	7.70	6.23	7.67	7.61	7.23
		Açısal Hata/°	5.13	6.11	6.49	5.02	6.23	6.29	5.88
RT	Yatay	RMSE	2.98	1.11	2.24	2.75	3.14	2.71	2.49
		Açısal Hata/°	1.26	0.89	1.36	2.00	2.09	1.71	1.55
	Dikey	RMSE	3.01	5.16	4.63	6.32	5.00	4.04	4.69
		Açısal Hata/°	1.89	3.25	3.85	4.09	3.49	2.87	3.24
	RTE	RMSE	2.33	1.09	1.32	2.72	3.42	2.90	2.30
		Açısal Hata/°	1.10	0.89	0.95	1.97	1.96	1.71	1.43
RTE	Yatay	RMSE	2.74	4.13	4.29	5.30	5.21	4.14	4.30
		Açısal Hata/°	1.80	2.68	3.37	3.74	4.16	2.96	3.12
	Dikey	RMSE	2.33	1.09	1.32	2.72	3.42	2.90	2.30
		Açısal Hata/°	1.10	0.89	0.95	1.97	1.96	1.71	1.43
	RTE	RMSE	2.74	4.13	4.29	5.30	5.21	4.14	4.30
		Açısal Hata/°	1.80	2.68	3.37	3.74	4.16	2.96	3.12

Tablo 4.20.’de, 4.15., 4.16., 4.17., 4.18. ve 4.19. nolu tabloların birey bazlı incelenmesi ve öznelik seçim yöntemlerine göre düşük RMSE ve açısal hata değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.20.’de Fsrftest öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.19, 0.93 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.09, 1.53 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

Fsrnca öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RT algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.17, 0.96 ile S2 kişisinde elde

edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.11, 1.54 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

Fsrmmr öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde SVM algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.78, 2.12 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.83, 2.12 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

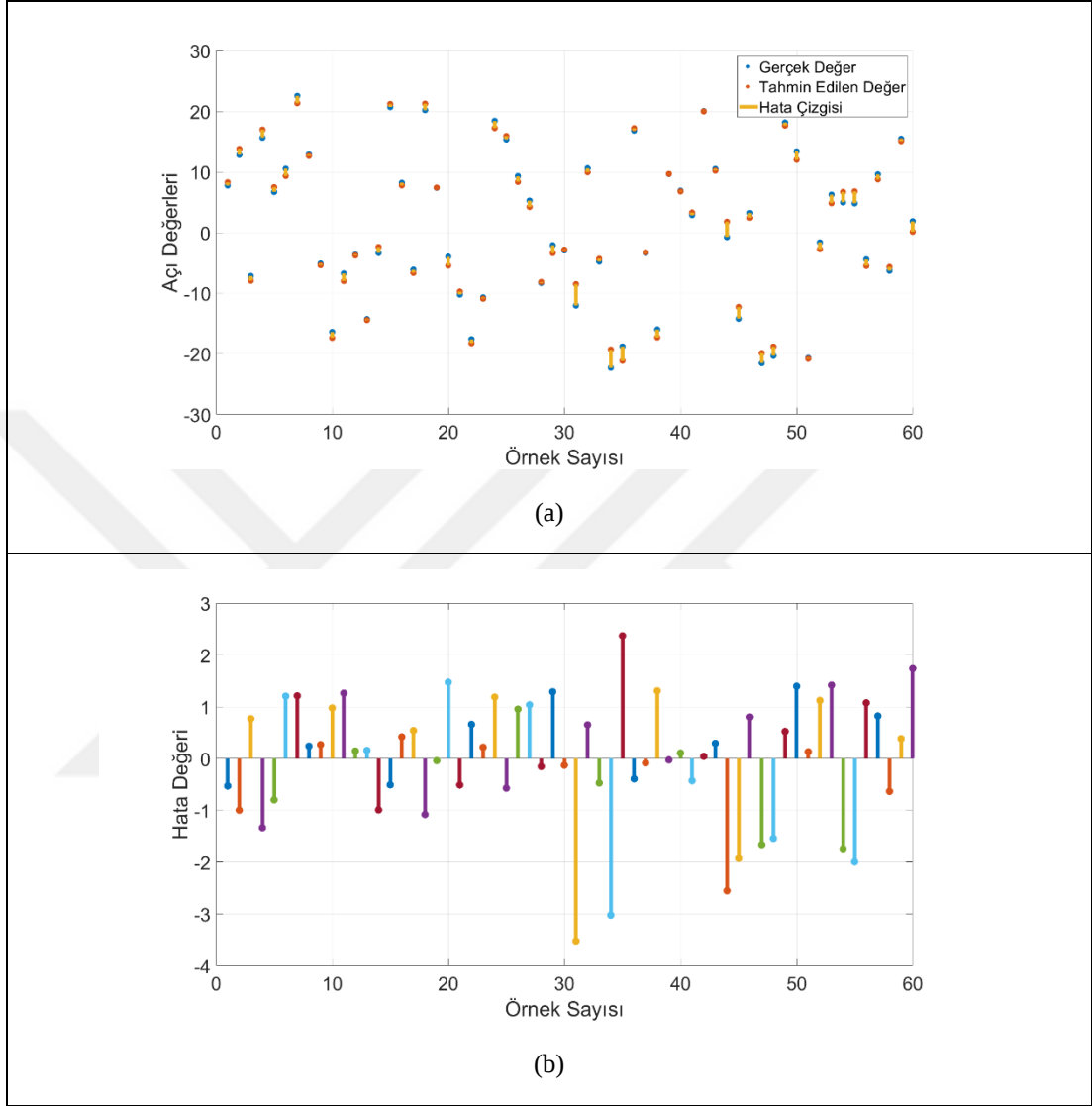
RreliefF öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 0.96, 0.77 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 3.12, 2.17 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

Sequentials öznelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 1.09, 0.89 ile S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açısıl hata değerleri sırasıyla 2.11, 1.54 ile S1 kişisinde elde edilmiştir.

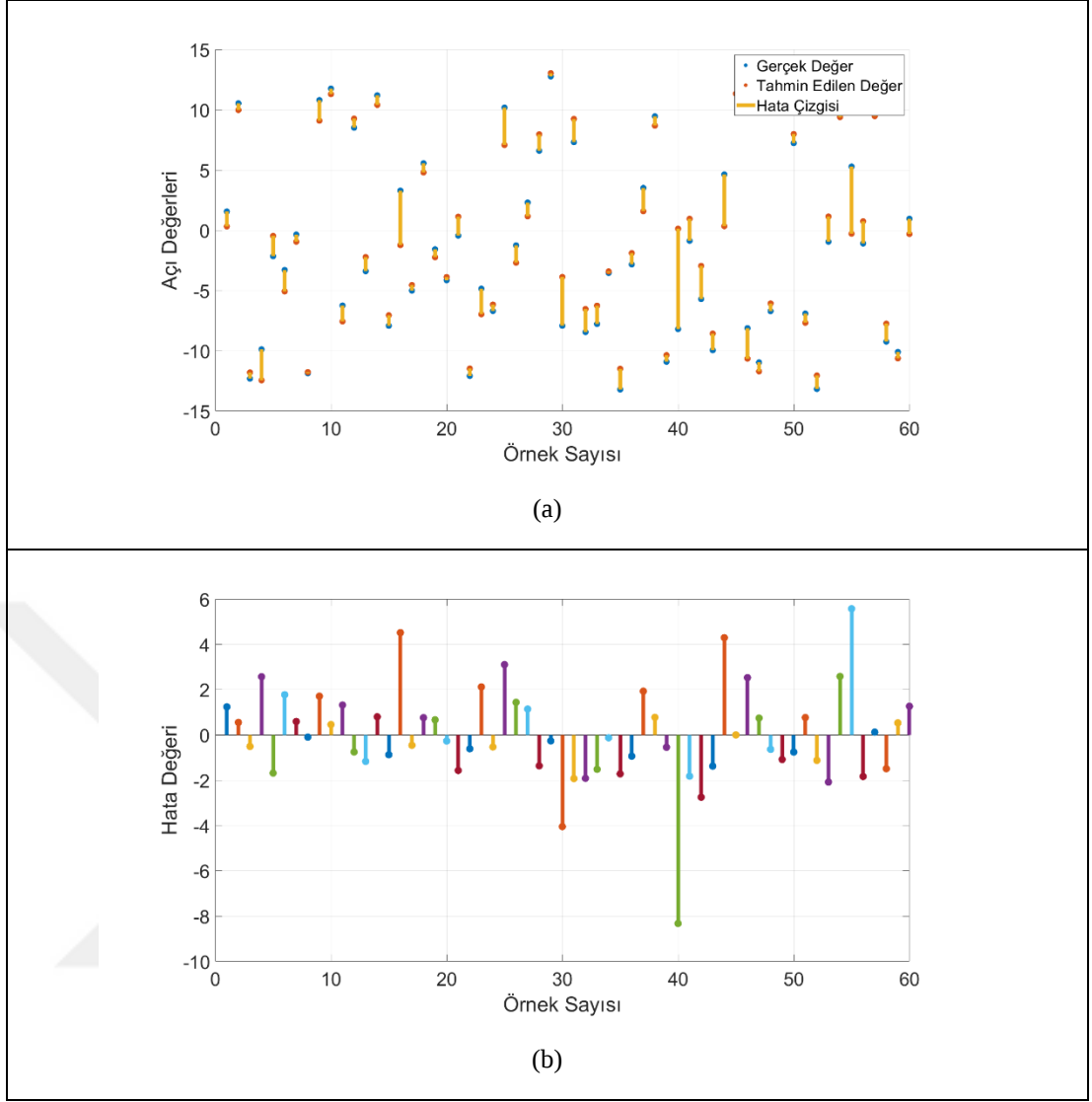
Tablo 4.20. Zaman-frekans düzleminde tüm öznelik seçim yöntemlerinde bireyler için en düşük RMSE hata metriği ve açısıl hatası

			FSRFTEST	FSRNCA	FSRMRMR	RRELIEFF	SEQUENTIALS
GPR	Yatay	RMSE	1.25(S2)	1.22(S2)	2.88(S2)	1.08(S2)	1.14(S2)
		Açısıl Hata/°	0.91(S2)	0.88(S2)	2.27(S2)	0.82(S2)	0.88(S2)
	Dikey	RMSE	2.09(S1)	2.11(S1)	3.09(S1)	3.44(S1)	2.11(S1)
		Açısıl Hata/°	1.53(S1)	1.54(S1)	2.28(S1)	2.22(S1)	1.54(S1)
	SVM	RMSE	7.27(S1)	3.29(S2)	2.78(S2)	8.43(S2)	6.23(S4)
		Açısıl Hata/°	5.79(S1)	2.47(S2)	2.12(S2)	6.43(S2)	5.02(S4)
RT	Yatay	RMSE	5.33(S2)	6.37(S2)	3.31(S2)	5.94(S2)	5.90(S2)
		Açısıl Hata/°	4.15(S2)	5.34(S2)	2.31(S2)	4.86(S2)	4.99(S2)
	Dikey	RMSE	1.27(S2)	1.17(S2)	3.07(S2)	1.69(S2)	1.11(S2)
		Açısıl Hata/°	1.00(S2)	0.96(S2)	2.47(S2)	1.30(S2)	0.89(S2)
	RTE	RMSE	3.20(S1)	3.08(S1)	3.89(S1)	3.59(S1)	3.01(S1)
		Açısıl Hata/°	2.00(S1)	1.89(S1)	2.57(S1)	2.31(S1)	1.89(S1)
RTE	Yatay	RMSE	1.19(S2)	1.17(S2)	2.84(S2)	0.96(S2)	1.09(S2)
		Açısıl Hata/°	0.93(S2)	0.88(S2)	2.10(S2)	0.77(S2)	0.89(S2)
	Dikey	RMSE	2.51(S1)	2.61(S1)	2.83(S1)	3.12(S1)	2.74(S1)
		Açısıl Hata/°	1.77(S1)	1.65(S1)	2.12(S1)	2.17(S1)	1.80(S1)

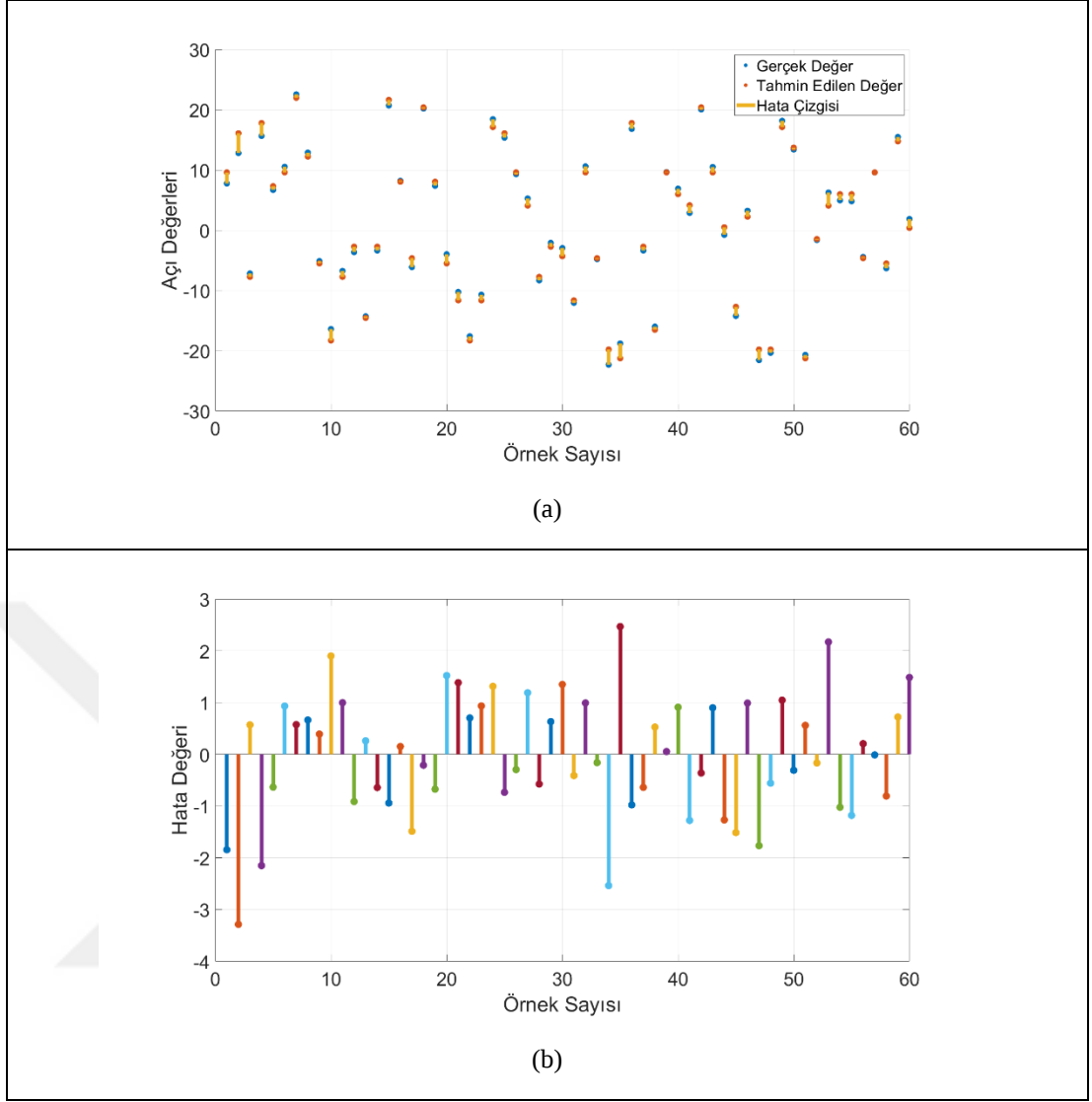
4.21., 4.22., 4.23., 4.24., 4.25., 4.26., 4.27., 4.28., 4.29. ve 4.30. nolu şekillerde, tablo 4.20.'deki öznelik seçim yöntemlerine göre en iyi yatay ve dikey EOG bileşenlerinin (a) açıl değerleri ve (b) hata değerlerinin grafikleri verilmektedir.



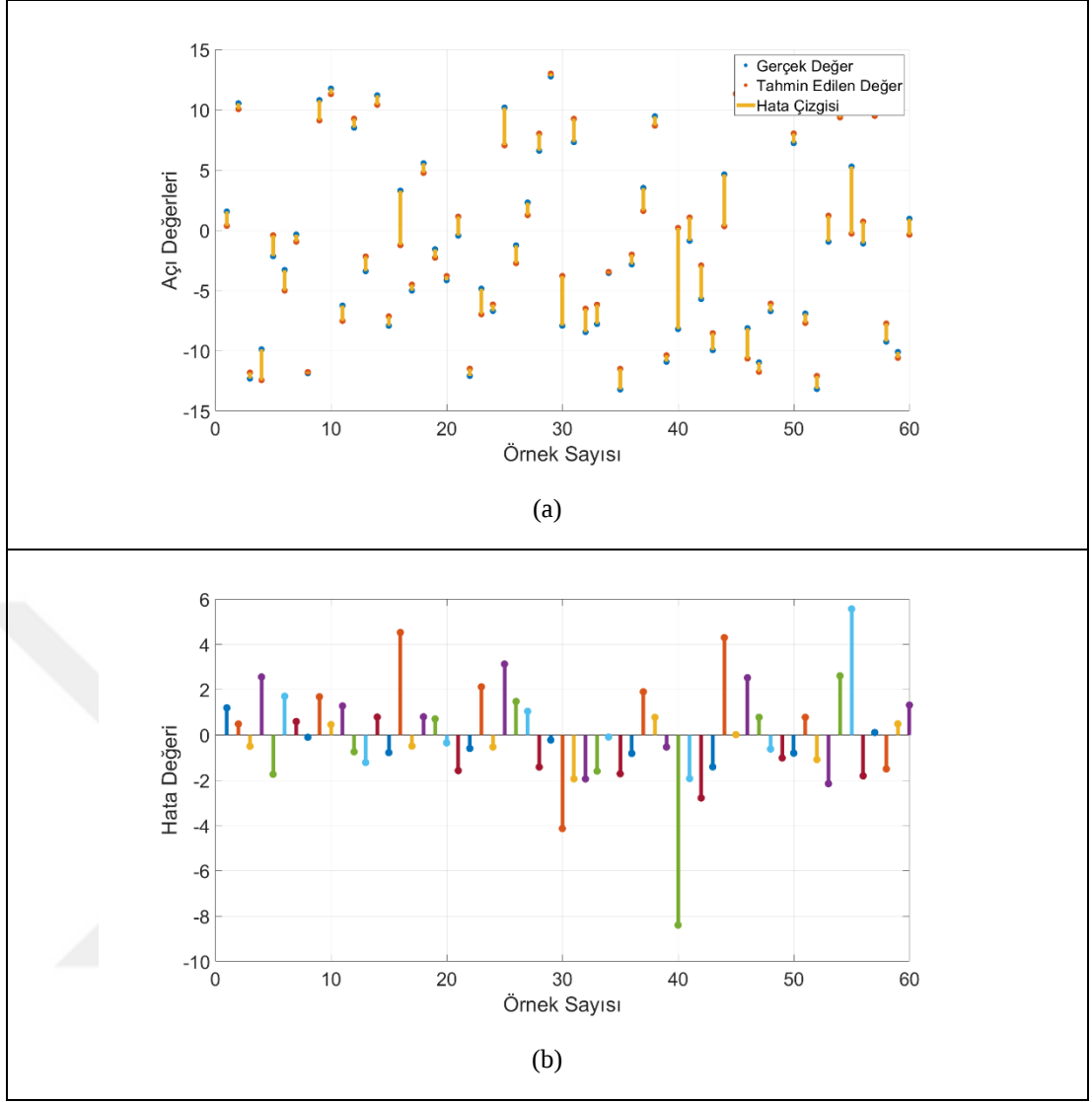
Şekil 4.21. Zaman-frekans düzleminde fsrftest için RTE algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşeninin (a) açıl değerleri (b) hata değerleri



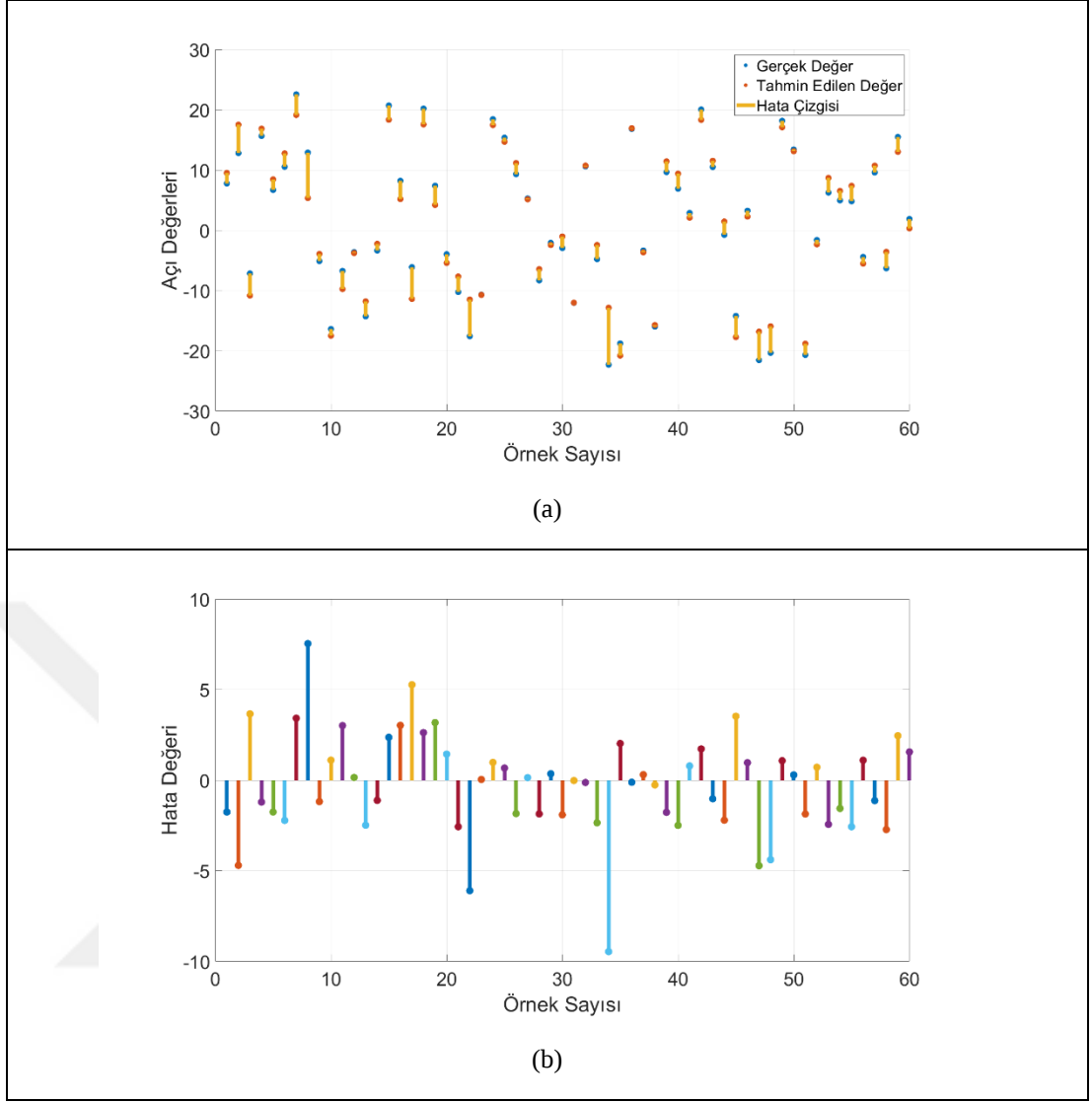
Şekil 4.22. Zaman-frekans düzleminde fsrftest için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açma değerleri (b) hata değerleri



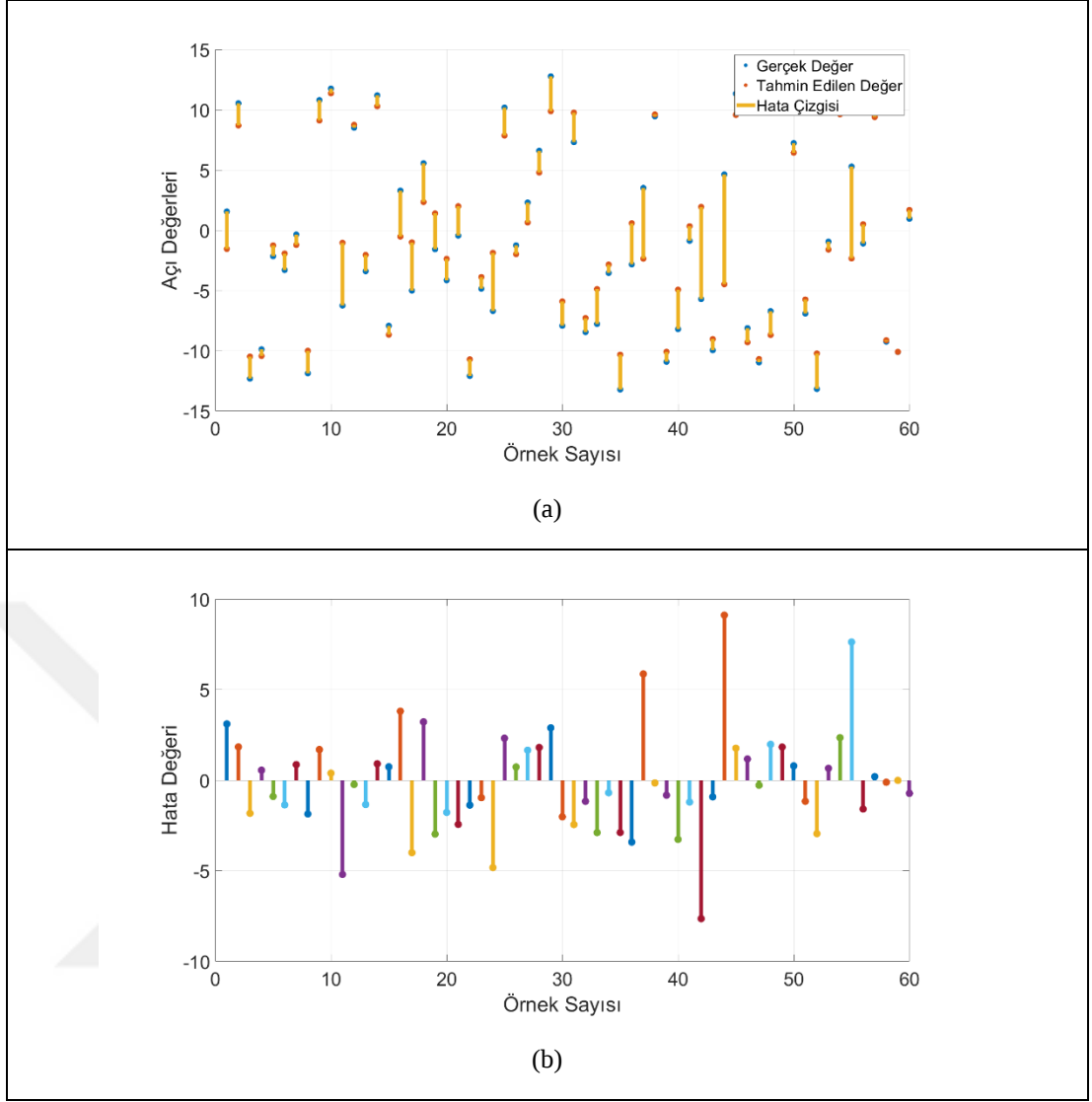
Şekil 4.23. Zaman-frekans düzleminde fsrnca için RT algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açılış değerleri (b) hata değerleri



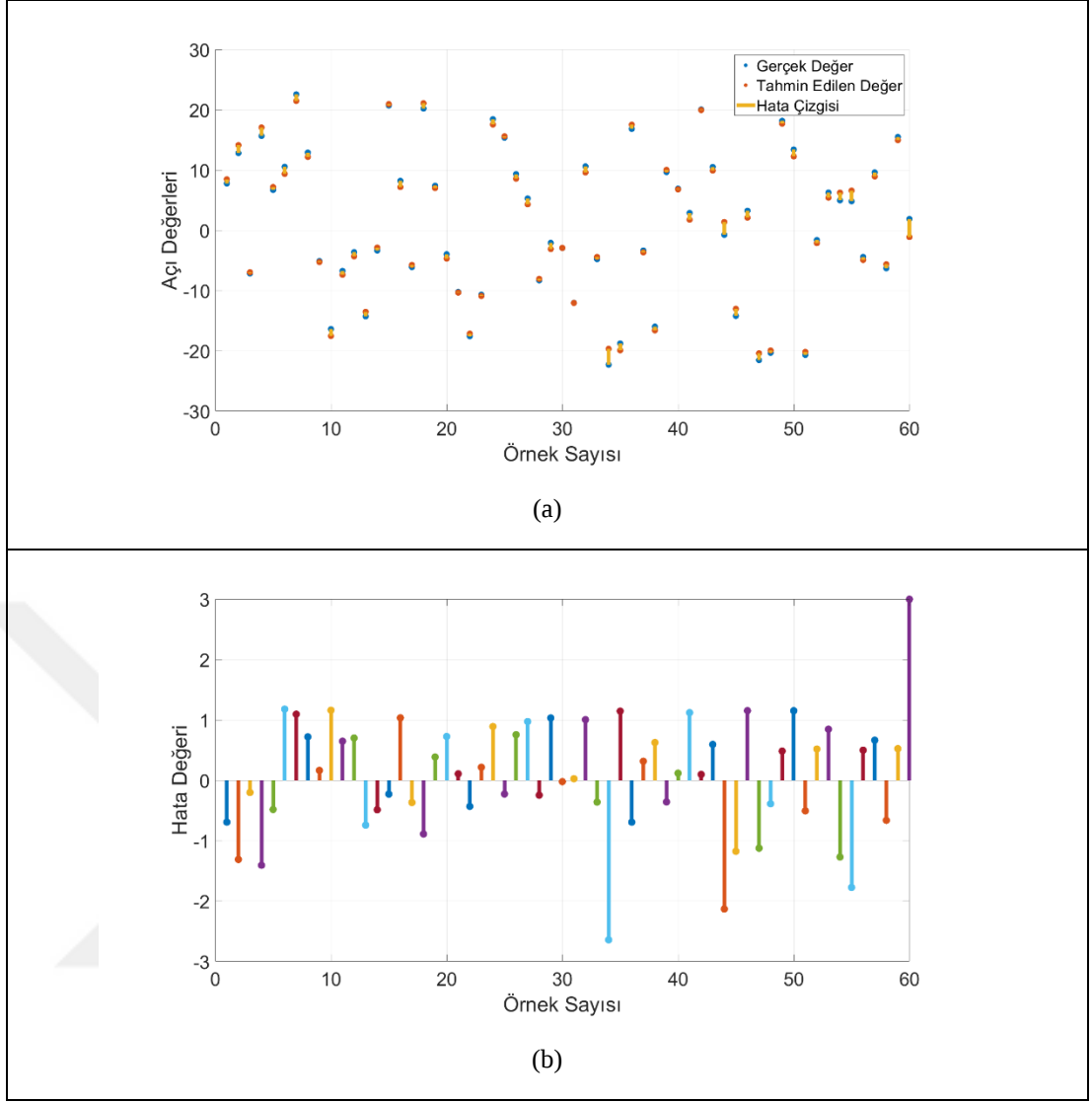
Şekil 4.24. Zaman-frekans düzleminde fsrnca için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açma değerleri (b) hata değerleri



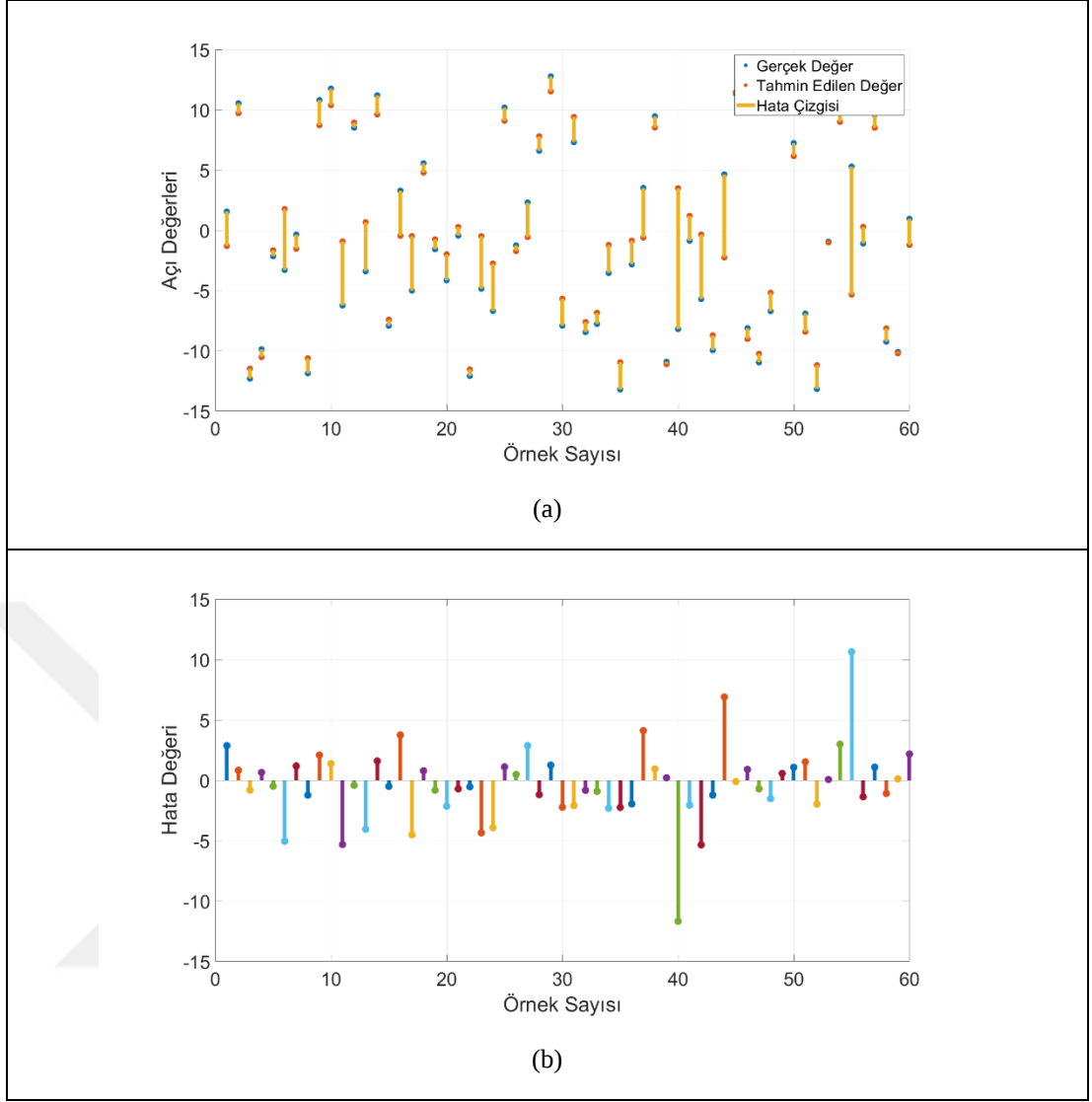
Şekil 4.25. Zaman-frekans düzleminde fsmrmr için SVM algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açma değerleri (b) hata değerleri



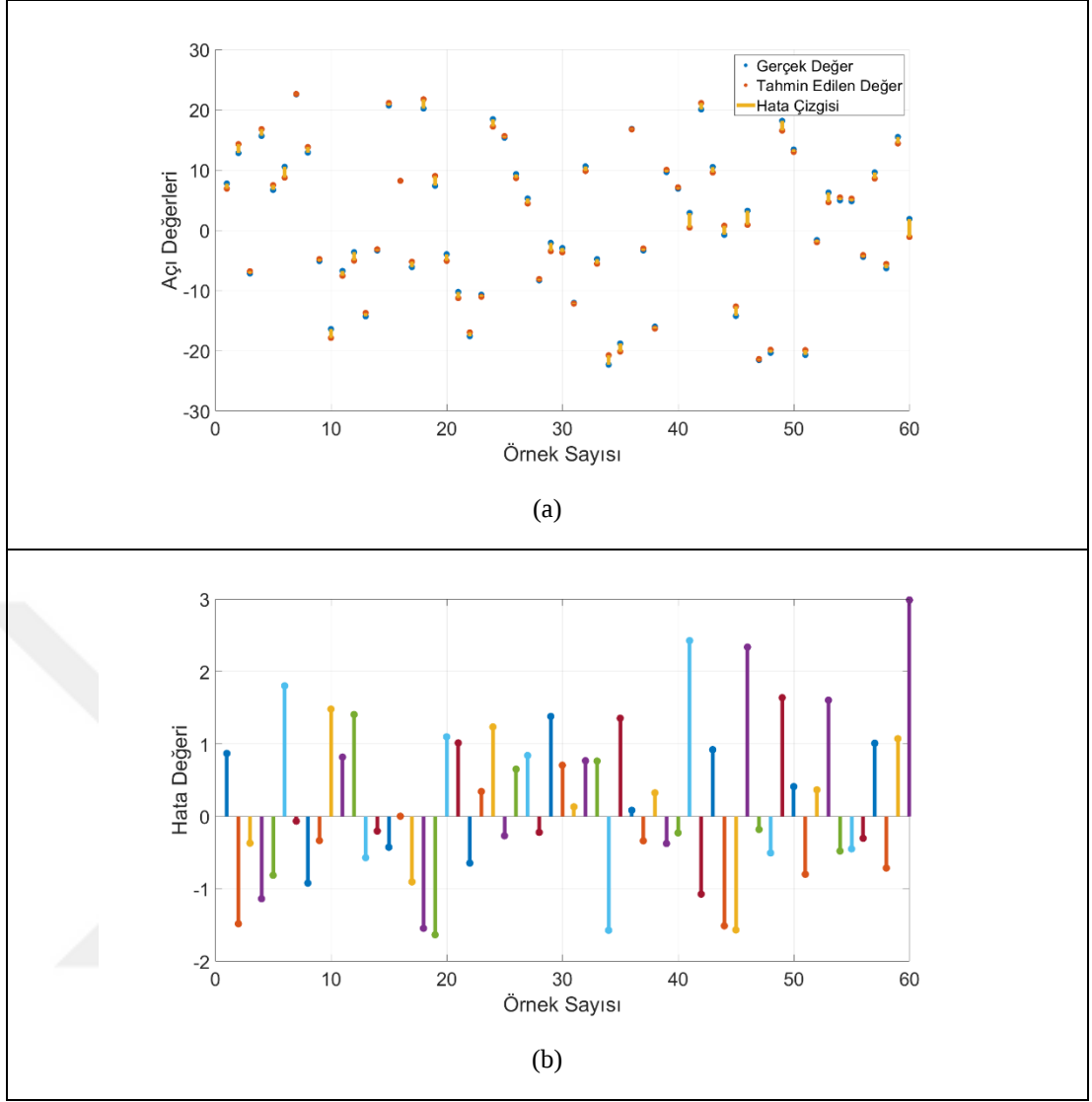
Şekil 4.26. Zaman-frekans düzleminde fsmrmr için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açılı değerleri (b) hata değerleri



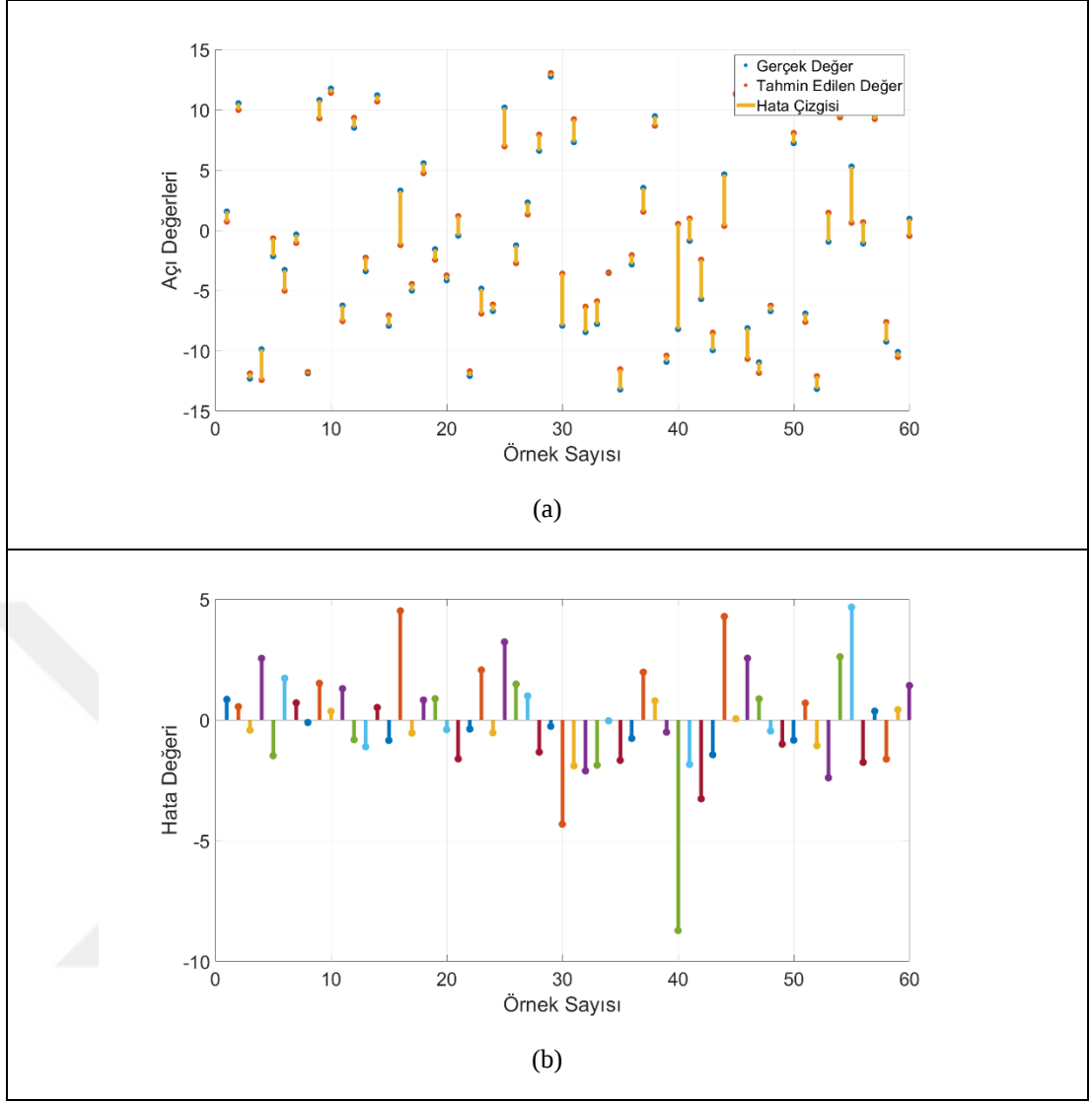
Şekil 4.27. Zaman-frekans düzleminde rrelieff için RTE algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açığı değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.28. Zaman-frekans düzleminde rrelieff için RTE algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açma değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.29. Zaman-frekans düzleminde sequentials için RTE algoritmasıyla S2 kişinin yatay EOG bileşenin (a) açma değerleri (b) hata değerleri



Şekil 4.30. Zaman-frekans düzleminde sequentials için GPR algoritmasıyla S1 kişinin dikey EOG bileşenin (a) açma değerleri (b) hata değerleri

Tablo 4.21.'de, 4.15., 4.16., 4.17., 4.18. ve 4.19. nolu tabloların ortalama ve standart sapma değerleriyle birlikte ve öznel seçim yöntemlerine göre düşük RMSE ve açılma hata değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.21.'de Fsrtest öznel seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılma hata değerleri sırasıyla 2.35 ± 0.83 , 1.58 ± 0.63 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılma hata değerleri sırasıyla 3.67 ± 0.87 , 2.61 ± 0.64 elde edilmiştir.

Fsrnc öznel seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde RTE algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılma hata değerleri sırasıyla 2.15 ± 0.73 , 1.39 ± 0.41 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılma hata değerleri sırasıyla 3.89 ± 0.91 , 2.85 ± 0.70 elde edilmiştir.

FSRmrmr öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 5.55 ± 1.38 , 4.53 ± 1.17 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 4.55 ± 1.15 , 3.51 ± 1.07 elde edilmiştir.

Rrelieff öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 2.43 ± 0.89 , 1.52 ± 0.56 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 4.27 ± 0.79 , 3.12 ± 0.79 elde edilmiştir.

Sequentials öznitelik seçim yöntemi için yatay EOG bileşeninde GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 2.28 ± 0.76 , 1.50 ± 0.52 elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise GPR algoritmasıyla en düşük RMSE ve açılal hata değlerleri sırasıyla 4.19 ± 1.21 , 3.07 ± 0.91 elde edilmiştir.

Tablo 4.21. Zaman-frekans düzleminde tüm öznitelik seçim yöntemlerinde ortalama RMSE hata metriği ve açılal hatası

			FSRFTEST	FSRNCA	FSRMRMR	RRELIEFF	SEQUENTIALS
GPR	Yatay	RMSE	2.44±0.85	2.44±0.84	5.55±1.38	2.43±0.89	2.28±0.76
		Açılal Hata/°	1.60±0.60	1.50±0.44	4.53±1.17	1.52±0.56	1.50±0.52
	Dikey	RMSE	3.67±0.87	3.89±0.91	4.55±1.15	4.27±0.79	4.19±1.21
		Açılal Hata/°	2.61±0.64	2.85±0.70	3.51±1.07	3.12±0.79	3.07±0.91
	SVM	RMSE	8.72±0.98	8.28±3.57	5.58±1.49	10.55±1.90	7.23±0.78
		Açılal Hata/°	6.61±0.50	5.95±1.81	4.58±1.34	8.10±2.44	5.88±0.63
RT	Yatay	RMSE	6.45±1.17	7.37±0.67	5.51±1.25	6.68±0.78	6.56±0.73
		Açılal Hata/°	5.22±1.01	6.09±0.70	4.37±1.13	5.59±0.84	5.51±0.70
	Dikey	RMSE	2.84±1.33	2.97±1.44	5.82±1.38	2.84±1.08	2.49±0.74
		Açılal Hata/°	1.85±0.79	1.81±0.71	4.72±1.15	1.75±0.60	1.55±0.47
	RTE	RMSE	4.83±1.20	4.99±1.12	5.04±0.90	5.03±0.88	4.69±1.12
		Açılal Hata/°	3.28±0.81	3.38±0.81	3.70±0.99	3.45±0.81	3.24±0.79
RTE	Yatay	RMSE	2.35±0.83	2.15±0.73	5.72±1.45	2.52±1.12	2.30±0.92
		Açılal Hata/°	1.58±0.63	1.39±0.41	4.68±1.30	1.59±0.63	1.43±0.51
	Dikey	RMSE	4.21±1.09	4.25±1.03	4.65±1.20	4.54±1.05	4.30±0.93
		Açılal Hata/°	3.02±0.78	3.00±0.78	3.59±1.09	3.39±0.95	3.12±0.83

Tablo 4.22.'de Göz açısı tahmini yapan literatür çalışmalarının kıyaslanması yapılmıştır. Bu tez çalışmasında, EOG bileşenlerinin bireysel olarak en iyi yatay ve dikey RMSE değlerleri sırasıyla 0.96, 1.73 elde edilmiştir. EOG bileşenlerinin ortalama olarak en iyi yatay ve dikey RMSE değlerleri ise sırasıyla 2.15 ± 0.73 , 3.67 ± 0.87 olarak

elde edilmiştir. Tablodaki RMSE metriği ile sunulan (Shah et al., 2022) çalışma incelendiğinde, bireysel performansta bu tez çalışmasında daha iyi performans elde edilmiştir. Ortalama performans kıyaslamasında ise yatay EOG bileşeninde daha iyi, dikey EOG bileşeninde ise nispeten daha kötü performans elde edilmiştir.

Tablodaki göz açısı hataları ile sunulan (Manabe et al., 2015) ve (Zhu et al., 2022) çalışmaları incelendiğinde, bu tez çalışmasının hem bireysel olarak hem de ortalama olarak daha iyi performans gösterdiği gözlenmektedir.

Tablo 4.22. Bu çalışmanın literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

Çalışma	Veri setindeki kişi sayısı	Yöntem	Örnekleme frekansı	Değerlendirme metriği RMSE	Değerlendirme metriği göz açısı hatası
(Manabe et al., 2015)	5	Estimation Based on Nonlinear Model	200 Hz		4°
(Shah et al., 2022)	30	(YOLO-V4)+(Inception-ResNet-v2) CNN model	-	Yatayda 3.61, Dikeyde 2.68	-
(Zhu et al., 2022)	18	Non-linear polynomial model	-	-	Yatayda 3.5°
Bu çalışma (bireysel)	6	Yatayda Relieff+RTE model, Dikeyde fsmca+ RTE model	256 Hz	Yatayda 0.96, Dikeyde 1.73	Yatayda 0.77°, Dikeyde 1.35°
Bu çalışma (ortalama)	6	Yatayda fsmca+RTE model, Dikeyde fsrttest+ GPR model	256 Hz	Yatayda 2.15±0.73, Dikeyde 3.67±0.87	Yatayda 1.39° ±0.41°, Dikeyde 2.61° ±0.64°

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kullanılan veri seti sayesinde veri setine katkıda bulunan deneklerin oküler pozunu tahmin etmek ve EOG sinyallerinden farklı göz açılarını tespit etmek için yeni yöntemler kullanılmıştır. Açısal bakış yer değiştirmeleri hem yatay hem dikey EOG bileşenlerinden zaman, frekans ve zaman-frekans olmak üzere üç farklı düzlemde öznitelikler çıkarılmıştır. Çıkarılan öznitelikler çeşitli öznitelik seçim yöntemleriyle seçilmiş ardından regresyon modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Zaman düzleminde toplamda 23 adet öznitelik çıkarılmıştır. Frekans düzleminde 10 adet öznitelik çıkarılmıştır. Zaman-frekans düzleminde ise 36 adet öznitelik çıkarılmıştır.

Veri setini oluşturan katılımcıların bireysel olarak en düşük hata değerleri incelendiğinde;

Zaman düzleminde yatay EOG bileşeninde bireysel olarak en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.43, 1.71 ile fsmmr öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritması kullanılarak S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise bireysel olarak en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.73, 1.35 ile fsmca öznitelik seçim yöntemiyle, RTE algoritması kullanılarak S1 kişisinde elde edilmiştir.

Frekans düzleminde yatay EOG bileşeninde bireysel olarak en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 11.21, 8.92 ile sequentials öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritması kullanılarak S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise bireysel olarak en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 5.11, 4.04 ile fsmca öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritması kullanılarak S4 kişisinde elde edilmiştir.

Zaman-frekans düzleminde yatay EOG bileşeninde bireysel olarak en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 0.96, 0.77 ile rrelieff öznitelik seçim yöntemiyle, RTE algoritması kullanılarak S2 kişisinde elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise bireysel olarak en düşük RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.09, 1.53 ile fsmtest öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritması kullanılarak S1 kişisinde elde edilmiştir.

Veri setini oluşturan tüm katılımcıların ortalama olarak en düşük hata değerleri incelendiğinde;

Zaman düzleminde yatay EOG bileşeninde bireylerin en düşük ortalama RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.94 ± 1.70 , 2.84 ± 0.92 ile fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle, RTE algoritmasında elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise bireylerin en düşük ortalama RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 4.65 ± 1.55 , 3.33 ± 1.11 ile fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle, RTE algoritmasında elde edilmiştir.

Frekans düzleminde yatay EOG bileşeninde bireylerin en düşük ortalama RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 13.22 ± 0.90 , 11.10 ± 1.23 ile fsrmrmr öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritmasında elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise bireylerin en düşük ortalama RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 6.40 ± 0.97 , 5.03 ± 0.84 ile fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritmasında elde edilmiştir.

Zaman-frekans düzleminde yatay EOG bileşeninde bireylerin en düşük ortalama RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.15 ± 0.73 , 1.39 ± 0.41 ile fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle, RTE algoritmasında elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise bireylerin en düşük ortalama RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.67 ± 0.87 , 2.61 ± 0.64 ile fsrtest öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritmasında elde edilmiştir.

Yukardaki sonuçlara göre bireysel olarak, yatay EOG bileşeninde en iyi sonuç zaman-frekans düzleminde rrelieff öznitelik seçim yöntemiyle RTE algoritmasında RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 0.96, 0.77 ile elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise en iyi sonuç zaman düzleminde fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle RTE algoritmasında RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 1.73, 1.35 ile elde edilmiştir.

Ortalama değerlerde ise en iyi sonuçlar, yatay EOG bileşeninde zaman-frekans düzleminde RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 2.15 ± 0.73 , 1.39 ± 0.41 ile fsrnca öznitelik seçim yöntemiyle, RTE algoritmasında elde edilmiştir. Dikey EOG bileşeninde ise zaman-frekans düzleminde RMSE ve açısal hata değerleri sırasıyla 3.67 ± 0.87 , 2.61 ± 0.64 ile fsrtest öznitelik seçim yöntemiyle, GPR algoritmasında elde edilmiştir. Zaman-frekans düzlemindeki sonuçların ortalamada açıkça daha düşük hata oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu yapılan çalışma sayesinde EOG verilerinin daha düşük hata ile göz açısı değerlerinin tahmin edilmesi gereken çalışmalara yardımcı olacağı ve engelli bireylere günümüz teknolojik aletlerinin ara yüzlerini kullanımında büyük kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışması hasta bireylerin klavye kullanabilmesi, bilgisayar ara yüzündeki menü seçenekleriyle basit kontrolleri (ışık açma, yardım çağırma, ihtiyaç bildirme gibi...) gerçekleştirebilmesi ve sürücü yorgunluk tespiti gibi gelecekte çeşitli çalışmalar ile devam ettirilebilir.



KAYNAKLAR

- Acuña, O. V., Aqueveque, P., & Pino, E. J. (2014, 26-30 Aug. 2014). Eye-tracking capabilities of low-cost EOG system. 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,
- Al-Zubaidi, M. L. A., & Aras, S. (2022, 15-18 May 2022). Investigation of Appropriate Classification Method for EOG Based Human Computer Interface. 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU),
- Ayoubipour, S., Hekmati, H., & Sho'ouri, N. (2020, 26-27 Nov. 2020). Analysis of EOG Signals Related to ADHD and Healthy Children Using Wavelet Transform. 2020 27th National and 5th International Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME),
- Barbara, N., Camilleri, T. A., & Camilleri, K. P. (2019). EOG-based eye movement detection and gaze estimation for an asynchronous virtual keyboard. *Biomedical Signal Processing and Control*, 47, 159-167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.07.005>
- Barbara, N., Camilleri, T. A., & Camilleri, K. P. (2020a). A comparison of EOG baseline drift mitigation techniques. *Biomedical Signal Processing and Control*, 57, 101738. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101738>
- Barbara, N., Camilleri, T. A., & Camilleri, K. P. (2020b). *EOG-Based Ocular and Gaze Angle Estimation Using an Extended Kalman Filter* ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications, Stuttgart, Germany. <https://doi.org/10.1145/3379156.3391357>
- Berger, S., Wagner, U., & Schwand, C. (2012). Assessing Advertising Effectiveness: The Potential of Goal-Directed Behavior. *Psychology & Marketing*, 29(6), 411-421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mar.20530>
- Borchardt, A. R., Schiavon, L. S., Silva, L. G. L., Souza Junior, A. A., & Lucas, M. G. (2022, 2022/). Acquisition and Comparison of Classification Algorithms in Electrooculogram Signals. XXVII Brazilian Congress on Biomedical Engineering, Cham.
- Bulling, A., Roggen, D., & Tröster, G. (2009). *Wearable EOG goggles: eye-based interaction in everyday environments* CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Boston, MA, USA. <https://doi.org/10.1145/1520340.1520468>
- Bulling, A., Ward, J. A., Gellersen, H., & Tröster, G. (2011). Eye Movement Analysis for Activity Recognition Using Electrooculography. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33(4), 741-753. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.86>
- Cruz, A., Garcia, D., Pires, G., & Nunes, U. (2015). Facial Expression Recognition based on EOG toward Emotion Detection for Human-Robot Interaction. *Biosignals*,
- Deeb, J., Zakaria, F., & Kamali, W. (2017, 19-21 Oct. 2017). Method of detection of early falling asleep while driving using EOG analysis. 2017 Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME),

- Djeha, M., Sbargoud, F., Guiatni, M., Fellah, K., & Ababou, N. (2017, 29-31 Oct. 2017). A combined EEG and EOG signals based wheelchair control in virtual environment. 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Bumerdes (ICEE-B),
- Do, T. T., Nguyen, T. H., Le, T. A., Nguyen, S. A. T., Nguyen, Q. T. N., Tran, T. Q. V., Nguyen, K. N. K., Dang, K. T. T., Luong, T. H., Trinh, C. M. N., Cao, H. H., Le Truong, H. Q., Tran, K. A., Nguyen, N. H. V., Nguyen, P. N., Vo, Q. H. Q., & Ha, H. T. T. (2022, 2022//). Automated EOG Removal from EEG Signal Using Independent Component Analysis and Machine Learning Algorithms. 8th International Conference on the Development of Biomedical Engineering in Vietnam, Cham.
- Estrany, B., Fuster, P., Garcia, A., & Luo, Y. (2008). *Human computer interface by EOG tracking* Proceedings of the 1st international conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, Athens, Greece. <https://doi.org/10.1145/1389586.1389694>
- Ette, H., & Komalla Ashoka, R. (2021). Use of Transforms in Biomedical Signal Processing and Analysis. In A. Juan Manuel Velazquez (Ed.), *Real Perspective of Fourier Transforms and Current Developments in Superconductivity* (pp. Ch. 9). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98239>
- Gessner, U., Machwitz, M., Conrad, C., & Dech, S. (2013). Estimating the fractional cover of growth forms and bare surface in savannas. A multi-resolution approach based on regression tree ensembles. *Remote Sensing of Environment*, 129, 90-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.026>
- Goldberg, J. H., Stimson, M. J., Lewenstein, M., Scott, N., & Wichansky, A. M. (2002). *Eye tracking in web search tasks: design implications* Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications, New Orleans, Louisiana. <https://doi.org/10.1145/507072.507082>
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). 3 - Data Preprocessing. In J. Han, M. Kamber, & J. Pei (Eds.), *Data Mining (Third Edition)* (pp. 83-124). Morgan Kaufmann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381479-1.00003-4>
- Henderson, J. M. (2003). Human gaze control during real-world scene perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 498-504. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.006>
- Holland, C., & Komogortsev, O. (2012). *Eye tracking on unmodified common tablets: challenges and solutions* Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications, Santa Barbara, California. <https://doi.org/10.1145/2168556.2168615>
- Hossieny, R. R., Tantawi, M., Shedeed, H., & Tolba, M. F. (2023). Development of electrooculogram based human computer interface system using deep learning. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(4), 2410-2420.
- Hutton, S. B. (2008). Cognitive control of saccadic eye movements. *Brain and Cognition*, 68(3), 327-340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.08.021>

- Ileri, R., Latifoğlu, F., & Demirci, E. (2022). A novel approach for detection of dyslexia using convolutional neural network with EOG signals. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 60(11), 3041-3055. <https://doi.org/10.1007/s11517-022-02656-3>
- Ishiguro, Y., & Rekimoto, J. (2012, 18-22 June 2012). GazeCloud: A Thumbnail Extraction Method Using Gaze Log Data for Video Life-Log. 2012 16th International Symposium on Wearable Computers,
- Itakura, N., & Sakamoto, K. (2010). A new method for calculating eye movement displacement from AC coupled electro-oculographic signals in head mounted eye-gaze input interfaces. *Biomedical Signal Processing and Control*, 5(2), 142-146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bspc.2009.12.002>
- Jamei, M., Ahmadianfar, I., Olumegbon, I. A., Karbasi, M., & Asadi, A. (2021). On the assessment of specific heat capacity of nanofluids for solar energy applications: Application of Gaussian process regression (GPR) approach. *Journal of Energy Storage*, 33, 102067. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102067>
- Khan, A., & Rasool, S. (2022). Game induced emotion analysis using electroencephalography. *Computers in Biology and Medicine*, 145, 105441. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105441>
- Kim, C., Cha, H.-S., Kim, J., Kwak, H., Lee, W., & Im, C.-H. (2023). Facial Motion Capture System Based on Facial Electromyogram and Electrooculogram for Immersive Social Virtual Reality Applications. *Sensors*, 23(7), 3580. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/7/3580>
- Kose, M. R., Ahirwal, M. K., & Kumar, A. (2021). A new approach for emotions recognition through EOG and EMG signals. *Signal, Image and Video Processing*, 15(8), 1863-1871. <https://doi.org/10.1007/s11760-021-01942-1>
- Kuo, C. E., & Chen, G. T. (2020). A Short-Time Insomnia Detection System Based on Sleep EOG With RCMSE Analysis. *IEEE Access*, 8, 69763-69773. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986397>
- Lee, K. R., Chang, W. D., Kim, S., & Im, C. H. (2017). Real-Time “Eye-Writing” Recognition Using Electrooculogram. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(1), 37-48. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2542524>
- Ließ, M., Glaser, B., & Huwe, B. (2012). Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: Comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, 170, 70-79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.010>
- Liversedge, S. P., & Findlay, J. M. (2000). Saccadic eye movements and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(1), 6-14. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01418-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01418-7)
- López, A., & Ferrero, F. (2023). Biomedical Signal Processing and Artificial Intelligence in EOG Signals. In S. M. Qaisar, H. Nisar, & A. Subasi (Eds.), *Advances in Non-Invasive Biomedical Signal Sensing and Processing with Machine Learning* (pp. 185-206). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23239-8_8

- López, A., Ferrero, F., Yangüela, D., Álvarez, C., & Postolache, O. (2017). Development of a Computer Writing System Based on EOG. *Sensors (Basel)*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/s17071505>
- López, A., Ferrero, F. J., Qaisar, S. M., & Postolache, O. (2022, 22-24 June 2022). Gaussian Mixture Model of Saccadic Eye Movements. 2022 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA),
- López, A., Villar, J. R., Fernández, M., & Ferrero, F. J. (2023). Comparison of classification techniques for the control of EOG-based HCIs. *Biomedical Signal Processing and Control*, 80, 104263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104263>
- Lu, Y., Wang, H., Feng, N., Jiang, D., & Wei, C. (2022). Online interaction method of mobile robot based on single-channel EEG signal and end-to-end CNN with residual block model. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101595. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101595>
- Malaekah, E., Patti, C. R., & Cvetkovic, D. (2014, 8-10 Dec. 2014). Automatic sleep-wake detection using electrooculogram signals. 2014 IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES),
- Manabe, H., & Fukumoto, M. (2006). *Full-time wearable headphone-type gaze detector* CHI '06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Montréal, Québec, Canada. <https://doi.org/10.1145/1125451.1125655>
- Manabe, H., Fukumoto, M., & Yagi, T. (2015). Direct Gaze Estimation Based on Nonlinearity of EOG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(6), 1553-1562. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2394409>
- MATLAB. (2010). *relieff*. MATLAB. Retrieved 12.05.2022 from <https://www.mathworks.com/help/stats/relieff.html>
- MATLAB. (2016). *NCA Feature Selection for Regression*. <https://www.mathworks.com/help/stats/neighborhood-component-analysis.html>
- MATLAB. (2020). *fsrftest*. MATLAB. Retrieved 12.05.2022 from <https://www.mathworks.com/help/stats/fsrftest.html>
- MATLAB. (2022). *fsrmrmr*. MATLAB. [https://www.mathworks.com/help/stats/fsrmrmr.html#:~:text=%3D%20fsrmrmr\(____\),Description,the%20response%20variable%20in%20Tbl%20.](https://www.mathworks.com/help/stats/fsrmrmr.html#:~:text=%3D%20fsrmrmr(____),Description,the%20response%20variable%20in%20Tbl%20.)
- Meeravali, S., Rajitha, S., Sai, U. T., Sri, M. D., & Gundugonti, K. K. (2022, 29-31 July 2022). Design and Analysis of an Efficient Stationary Wavelet-Transform for EOG Signal Denoising. 2022 Second International Conference on Next Generation Intelligent Systems (ICNGIS),
- Miyashita, H., Hayashi, M., & Okada, K.-i. (2008). Implementation of EOG-based gaze estimation in HMD with head-tracker. 18th Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence,
- Murugan, S., Sivakumar, P. K., Kavitha, C., Harichandran, A., & Lai, W.-C. (2023). An Electro-Oculogram (EOG) Sensor's Ability to Detect Driver Hypovigilance Using Machine Learning. *Sensors*, 23(6), 2944. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/6/2944>

- Ohno, T., Mukawa, N., & Yoshikawa, A. (2002). *FreeGaze: a gaze tracking system for everyday gaze interaction* Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications, New Orleans, Louisiana. <https://doi.org/10.1145/507072.507098>
- Özşen, S., Güneş, S., & Ş, Y. (2010, 21-24 April 2010). Examining the effect of time and frequency domain features of EEG, EOG, and Chin EMG signals on sleep staging. 2010 15th National Biomedical Engineering Meeting,
- Panigrahi, P. K., & Bisoy, S. K. (2023, 2023/). An EOG-Based Human–Computer Interface in Solving 24-Puzzle. *Ambient Intelligence in Health Care*, Singapore.
- Rahman, M. M., Bhuiyan, M. I. H., & Hassan, A. R. (2018). Sleep stage classification using single-channel EOG. *Computers in Biology and Medicine*, 102, 211-220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2018.08.022>
- Salcedo-Sanz, S., Rojo-Álvarez, J. L., Martínez-Ramón, M., & Camps-Valls, G. (2014). Support vector machines in engineering: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 4(3), 234-267.
- Sedik, A., Marey, M., & Mostafa, H. (2023). WFT-Fati-Dec: Enhanced Fatigue Detection AI System Based on Wavelet Denoising and Fourier Transform. *Applied Sciences*, 13(5), 2785. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/5/2785>
- Shah, S. M., Sun, Z., Zaman, K., Hussain, A., Shoaib, M., & Pei, L. (2022). A Driver Gaze Estimation Method Based on Deep Learning. *Sensors*, 22(10), 3959. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/10/3959>
- Sharma, M., Darji, J., Thakrar, M., & Acharya, U. R. (2022). Automated identification of sleep disorders using wavelet-based features extracted from electrooculogram and electromyogram signals. *Computers in Biology and Medicine*, 143, 105224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105224>
- Shi, J., & Wang, K. (2023). Fatigue driving detection method based on Time-Space-Frequency features of multimodal signals. *Biomedical Signal Processing and Control*, 84, 104744. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.104744>
- Sibert, L. E., & Jacob, R. J. K. (2000). *Evaluation of eye gaze interaction* Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems, The Hague, The Netherlands. <https://doi.org/10.1145/332040.332445>
- Sunyer-Grau, B., Quevedo, L., Rodríguez-Vallejo, M., & Argilés, M. (2023). Comitant strabismus etiology: extraocular muscle integrity and central nervous system involvement—a narrative review. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 261(7), 1781-1792. <https://doi.org/10.1007/s00417-022-05935-9>
- Tangsuksant, W., Aekmunkhongpaisal, C., Cambua, P., Charoenpong, T., & Chanwimalueang, T. (2012, 5-7 Dec. 2012). Directional eye movement detection system for virtual keyboard controller. The 5th 2012 Biomedical Engineering International Conference,
- Tepe, C. (2009). EKG Sinyalinde Gürültü Gidermede Dalgacık Dönüşümü Kullanılması. *Yüksek Lisans Tezi*.

- Usakli, A. B., & Gurkan, S. (2010). Design of a Novel Efficient Human–Computer Interface: An Electrooculagram Based Virtual Keyboard. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(8), 2099-2108. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2030923>
- Wen-Bing, H., Chih-Yuan, C., Yi, C., & Chun-Hai, F. (2004, 21-23 March 2004). Driver fatigue detection based on eye tracking and dynamic template matching. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004,
- Yagi, T., Kuno, Y., Koga, K., & Mukai, T. (2006, 8-11 Oct. 2006). Drifting and Blinking Compensation in Electro-oculography (EOG) Eye-gaze Interface. 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,
- Yamagishi, K., Hori, J., & Miyakawa, M. (2006, 30 Aug.-3 Sept. 2006). Development of EOG-Based Communication System Controlled by Eight-Directional Eye Movements. 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,
- Zengin, İ., Bozkurt, M. R., Ucar, M. K., & Elektrik-Elektronik, S. Ü. M. F. (2019). Determining effective features to use the EOG sign as a source sign. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 2(3), 134-144.
- Zhu, Y., Tao, L., Zeng, Z., Zhu, H., Chen, C., & Chen, W. (2022, 2022//). An Accurate and Cost-Effective Approach Towards Real-Time Eye Movement Angle Estimation. *Wireless Mobile Communication and Healthcare*, Cham.