

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TORNALAMADA VİDEO TABANLI YAPAY ZEKA YAKLAŞIMI İLE
TAKIM AŞINMASININ DİNAMİK TAKİBİ

DOKTORA TEZİ

Muzaffer Tacettin KÜLLAÇ

EKİM 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TORNALAMADA VIDEO TABANLI YAPAY ZEKA YAKLAŞIMI İLE
TAKIM AŞINMASININ DİNAMİK TAKİBİ**

Muzaffer Tacettin KÜLLAÇ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 / 09 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 23 / 10 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI

Trabzon 2025

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Talaşlı imalat işlemlerinde takım aşınmasının izlenmesi, hem süreç güvenilirliği hem de maliyet optimizasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Bu tez, literatürde çoğunlukla tekil fotoğraflar üzerinden yürütülen yaklaşımlara ek olarak, standart video karelerinden de anlamlı sinyal çıkarılabileceğini araştırma motivasyonu ile hazırlanmıştır. Çalışma sürecinde yöntem tasarımı, veri toplama ve değerlendirme adımlarında disiplinler arası bir bakış açısı benimsenmiş; bulgular hem mühendislik uygulamaları hem de akademik araştırmalar için sade ve tekrar edilebilir bir çerçevede sunulmuştur.

Bu süreçte yanımda olan tüm dostlarıma teşekkür ederim. Bilgisi ve tecrübesiyle her aşamada destek olan danışmanım Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI'ya en içten şükranlarımı sunarım.

Muzaffer Tacettin KÜLLAÇ

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Tornalamada Video Tabanlı Yapay Zeka Yaklaşımı İle Takım Aşınmasının Dinamik Takibi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

23/10/2025

Muzaffer Tacettin KÜLLAÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTIMLAR DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	11
2.1. Tornalama İşlemleri.....	11
2.2. Deney Düzenneđi.....	14
2.3. Görüntü Edinimleri.....	14
2.3.1. Takım Aşınmasının Ölçülmesi	15
2.3.2. İşlenmiş Yüzeyin Fotoğraflanması	17
2.4. Görüntü İşleme Yöntemleri	20
2.4.1. FFT ile Öznitelik Çıkarımı	23
2.4.2. Sinüs-Dalga Uydurma Algoritması ile Öznitelik Çıkarımı	26
2.4.3. Gauss Fonksiyonu İtarasyonu ile Öznitelik Çıkarımı	33
2.4.4. Gri Seviye Eş Dönüşüm Matrisi ile Öznitelik Çıkarımı.....	36
2.5. Destek Vektör Makinaları (SVM) ile Sınıflandırma	40
2.6. DeneySEL Çalışmaların Modellenmesi	45
3. BULGULAR VE İRDELEME	48
3.1. Aşınma.....	48
3.2. Taguchi ve Varyans Analizi(ANOVA)	56
3.3. Özniteliklerin Değerlendirilmesi	64
3.1. Destek Vektör Makinası (SVM) Sınıflandırması	83
4. SONUÇLAR.....	96
5. ÖNERİLER	99

6. KAYNAKLAR.....	100
7. EKLER	104
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

TORNALAMADA VİDEO TABANLI YAPAY ZEKA YAKLAŞIMI İLE TAKIM AŞINMASININ DİNAMİK TAKİBİ

Muzaffer Tacettin KÜLLAÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI
2025, 139 Sayfa

Tornalanmış yüzey imgelerinin aşınma izlerini taşıdığı ve görüntü işleme ile aşınma izleme amacıyla kullanılabildiği literatürde birçok kez gösterilmiştir; ancak çalışmalar çoğunlukla durağan fotoğraflara dayanmaktadır ve gerçek işlem sırasında benzer karelerin alınması yüksek hızlı görüntüleme donanımı gerektirir. Bu gereksinim maliyet ve entegrasyon güçlükleri doğurmaktadır. Bu çalışmada, sıradan video karelerinden takım aşınmasının izlenmesi amaçlanmıştır. Standart video kareleri fotoğraflara kıyasla daha bulanık ve ayrıntı bakımından sınırlıdır; bu nedenle, tornalanmış yüzeye özgü özniteliklerin tasarlanması önemlidir. Bu doğrultuda, yüzey dalgalılık profilindeki aşınmaya bağlı değişimleri yakalayabilen iki öznitelik (Sinüs E_{RMS} , Gauss E_{RMS}) geliştirilmiş; aşınmaya eşlik eden dalga genliğindeki değişimleri temsil eden Fourier genlik ortalaması ile birlikte FSG öznitelik seti oluşturulmuştur. Video karelerinden çıkarılan bu öznitelikler doğrusal SVM ile değerlendirilmiş, Video-FSG için sınıflandırma doğruluğu ve F1 skoru sırasıyla; $Acc \approx 0.65$, $F1 \approx 0.31$ elde edilmiştir. Aynı yaklaşım fotoğraflara uygulandığında Foto-FSG için $Acc \approx 0.71$, $F1 \approx 0.51$ gözlenmiştir. Fotoğraflar ile aşınmanın izlenebilirliği daha yüksek olsa da video karelerinde anlamlı ayrım gücü sunduğu görülmüştür. Karşılaştırma amacıyla literatürde yaygın üç genel amaçlı GLCM özniteliği (kontrast, homojenlik, entropi) hem video karelerinde hem durağan fotoğraflarda sınanmış; Video-GLCM'de $F1 \approx 0.24$, Foto-GLCM'de $F1 \approx 0.04$ bulunarak önerilen özniteliklerin her iki modda da GLCM'ye üstün olduğu gösterilmiştir. Bulgular, uygun özniteliklerle aşınmanın sıradan video karelerinden de izlenebileceğine dair nicel kanıt sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Takım aşınması izlenmesi, Video işleme, Tornalama, SVM, GLCM

PhD. Thesis

SUMMARY

DYNAMIC MONITORING OF TOOL WEAR IN TURNING USING A VIDEO-BASED ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPROACH

Muzaffer Tacettin KÜLLAÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI
2025, 139 Pages

It has been demonstrated many times in the literature that images of turned surfaces carry traces of wear and can be used for image-based wear monitoring; however, most studies rely on static photographs, and acquiring comparable frames during actual cutting requires high-speed imaging hardware. This entails cost and integration challenges. In this study, the monitoring of tool wear from ordinary video frames is targeted. Since standard video frames are blurrier and contain less detail than photographs, designing surface-specific features is important. Accordingly, two features that capture wear-induced changes in the surface waviness profile (Sine ERMS, Gauss ERMS) were developed and, together with the mean Fourier amplitude, formed the FSG feature set. Features extracted from video frames were evaluated with a linear SVM, and for Video-FSG the classification accuracy and F1 score were, respectively, $Acc \approx 0.65$ and $F1 \approx 0.31$. Applying the same approach to photographs yielded $Acc \approx 0.71$ and $F1 \approx 0.51$ for Photo-FSG. Although photographs provide higher monitorability, video frames also offered meaningful discriminative power. For comparison, three commonly used, general-purpose GLCM features (contrast, homogeneity, entropy) were tested on both video frames and static photographs; $F1 \approx 0.24$ for Video-GLCM and $F1 \approx 0.04$ for Photo-GLCM demonstrated that the proposed features outperform GLCM in both modalities. The findings provide quantitative evidence that wear cues can be monitored from ordinary video frames with suitable features.

Keywords: Tool wear monitoring; Video processing; Turning; SVM; GLCM.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Kesici takım ucunda meydana gelen aşınma tipleri (a) Krater Aşınması (b) Serbest Yüzey aşınması (c) Yığma kenar (d) Çentik aşınması (e) uç kütleşmesi (f) termal ve mekanik çatlaklar (Grzesik,2008).....	1
Şekil 2.	ISO 3685:1993 Takım aşınması ölçüm bölgeleri.....	2
Şekil 3.	Tornalanmış yüzey imgelerindeki aşınmaya bağlı bozunumun 3B gösterilmesi (Külleç ve Çuvalcı,2023)	7
Şekil 4.	Tezmaksan Tr251 CNC torna Tezgahı.....	12
Şekil 5.	Tezmaksan Tr251 CNC torna Tezgahı Çalışma Alan.....	12
Şekil 6.	MBC firmasına ait TTJNR 25×25 ölçülerindeki takım tutucu ile Korloy üretimi, TNMG160404–VM PC5300 kodlu talaş kırıcı geometrili, kaplamalı sinterlenmiş karbür uçlar	13
Şekil 7.	Deney Düzeneği	14
Şekil 8.	Beaverlab marka M1 model, dijital mikroskoplar ve fiktürleri	15
Şekil 9.	Aşınmanın fotoğraflandırılması	16
Şekil 10.	Aşınma ölçüm işlemleri için kalibrasyon	17
Şekil 11.	ImageJ programı ile aşınmanın ölçülmesi.....	17
Şekil 12.	Mikroskobun ve fiktürünün taret üzerinde yerleşimi	18
Şekil 13.	Örnek bir yüzey görüntüsü alma prosedürü (a) ve buna ait örnek bir yüzey fotoğrafı (b)	19
Şekil 14.	Bir video kayıt süreci.	20
Şekil 15.	Farklı aşınma seviyelerinde edinilmiş video kareleri ve bunlara karşılık gelen Fourier genlik spektrumları.....	24
Şekil 16.	Farklı aşınma seviyelerinde edinilmiş yüzey görüntüleri, bunlara karşılık gelen Fourier genlik spektrumları ve ilgili takım aşınması fotoğrafları.	25
Şekil 17.	Az aşınmış ve aşınmış takım ile işlenmiş yüzeylerden elde edilen iki gri tonlamalı video karesinin sütun projeksiyonları karşılaştırılması.....	28
Şekil 18.	Aşınmanın yineleme süreci üzerindeki yanıtıcı etkisi. Yineleme süreci, sürece bir aralık uygulanarak iyileştirilebilir.(Külleç ve Çuvalcı,2023).....	31
Şekil 19.	İki farklı aşınma duruma ait video kareleri, aşınma fotoğrafları, projeksiyonları, en iyi uyum sağlayan sinüs fonksiyonları ve değerleri.	32
Şekil 20.	Bir ilerleme izlerinin bir dalga boyu olacak şekilde kırılması ve bu kırılmış görüntünün sütun projeksiyonu.	33

Şekil 21.	Video karelerinden kırılmış az aşınmış ve çok aşınmış iki farklı ilerleme izi, bunlara karşılık gelen aşınma fotoğrafları, sütun projeksiyonları, oturtulan Gauss fonksiyonları ve elde edilen Gauss parametreleri	36
Şekil 22.	GLCM'nin oluşturulması.....	37
Şekil 23.	Az aşınmış ve çok aşınmış bir takım ile ilenen yüzey görüntüleri GLCM Matriksleri ve hesaplanan Homojenlik özneliği.....	39
Şekil 24.	Deney 6 – FSG - video özneliklerinin 3B uzayda gösterilmesi ve karar düzlemi	41
Şekil 25.	Deney 6 – video öznelikleri:- PCA ile 6B→2B izdüşümde örnek dağılımı... ..	43
Şekil 26.	Deney 6 – video (Fourier–Sinüs–Gauss): Test karışıklık matrisi. Satırlar Gerçek, sütunlar Tahmin; etiket sırası [0=Yavaş, 1=Hızlı]. Hücreler: TN (0,0), FP (0,1), FN (1,0), TP (1,1).	43
Şekil 27.	Çalışmanın Akış Şeması.....	47
Şekil 28.	Deney 1 Aşınma Grafiği	50
Şekil 29.	Deney 2 Aşınma Grafiği	50
Şekil 30.	Deney 3 Aşınma Grafiği	51
Şekil 31.	Deney 4 Aşınma Grafiği	52
Şekil 32.	Deney 5 Aşınma Grafiği	52
Şekil 33.	Deney 6 Aşınma Grafiği	53
Şekil 34.	Deney 7 Aşınma Grafiği	54
Şekil 35.	Deney 8 Aşınma Grafiği	54
Şekil 36.	Deney 9 Aşınma Grafiği	55
Şekil 37.	Kontrol faktörlerinin ortalama S/N oranları üzerindeki etkisi.	60
Şekil 38.	FSM öznelikleri (video): Deney 1–6 için Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatasının zamana bağlı eğilimleri	66
Şekil 39.	FSM öznelikleri (video): Deney 7–6 için Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatasının zamana bağlı eğilimleri	67
Şekil 40.	FSM öznelikleri (foto): Deney 7–6 için Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatasının zamana bağlı eğilimleri	68
Şekil 41.	FSM öznelikleri (foto): Deney 7–6 için Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatasının zamana bağlı eğilimleri	69
Şekil 42.	Deney 1-6 için Video karelerinden elde edilmiş GLCM özneliklerinin aşınma ile zamana bağlı değişimi ve eğilimleri.....	71
Şekil 43.	Deney 7-9 için Video karelerinden elde edilmiş GLCM özneliklerinin aşınma ile zamana bağlı değişimi ve eğilimleri.....	72
Şekil 44.	Deney 1-6 için Foto karelerinden elde edilmiş GLCM özneliklerinin aşınma ile zamana bağlı değişimi ve eğilimleri.....	73

Şekil 45.	Deney 7-9 için Foto karelerinden elde edilmiş GLCM özniteliklerinin asınma ile zamana bağlı değişimi ve eğilimleri.....	74
Şekil 46.	Özniteliklerin Düz. R^2 ve eğim değerlerinin, takım ömrü ile ilişkisinin gösterilmesi.....	78
Şekil 47.	Özniteliklerin Düz. R^2 ve eğim değerlerinin, takım ömrü ile ilişkisinin gösterilmesi.....	79
Şekil 48.	Fourier Genlik, Sinus E_{RMS} ve Gauss E_{RMS} özniteliklerinin uyum çizgilerinin deney bazında gösterilmesi.....	80
Şekil 49.	Sinus Erms ve Gauss Erms özniteliklerinin Farklı tür aşınmalara tepkileri (Külleç ve Çuvalcı,2025)	81
Şekil 50.	Özniteliklerin üçerli grup halinde(FSG vs GLCM) gösterilmesi. Üst Video Kareleri alt Fotoğraflar	82
Şekil 51.	Deney 1 e ait Video karelerinden edinilen FSG öznitelik uzayı ve sınıflandırma düzlemi	84
Şekil 52.	Deney 1 e ait Foto karelerinden edinilen FSG öznitelik uzayı ve sınıflandırma düzlemi	85
Şekil 53.	Deney 1'e ait Video karelerinden edinilen FSG öznitelik uzayında test verilerinin sınıflandırma performansı	86
Şekil 54.	Deney 1'e ait Video karelerinden edinilen FSG öznitelik uzayında eğitim verilerinin sınıflandırma performansı.....	86
Şekil 55.	Deney 1 e ait Video karelerinden edinilen GLCM öznitelik uzayı ve sınıflandırma düzlemi	87
Şekil 56.	Deney 1 e ait Foto karelerinden edinilen GLCM öznitelik uzay (sınıflandırma düzlemi linear ayrışma yapılamadığı için grafiğin dışında kalmıştır.)	88
Şekil 57.	Deney 6 ya ait 6 boyutlu öznitelik alanının 2 boyut ta projeksiyonu ve ayırım düzleminin projeksiyonu	89
Şekil 58.	Deney bazlı $\Delta f = (\text{video} - \text{foto})$ ısı haritası.....	91
Şekil 59.	Deney bazlı $\Delta acc = (\text{video} - \text{foto})$ ısı haritaları	91

TABLolar DİZİNİ

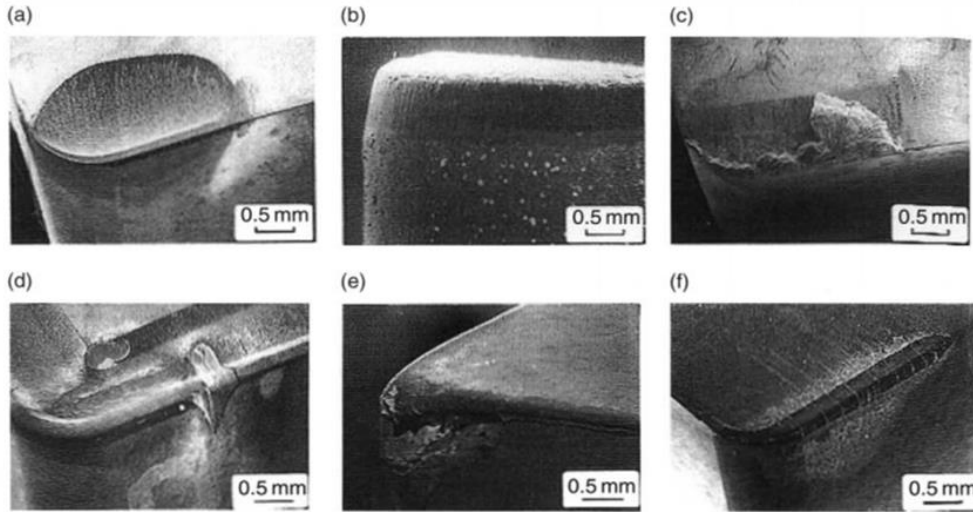
	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Tezmaksan TR-251 model CNC tezgahına ait teknik özellikler.....	11
Tablo 2. AISI 4140 Çeliğinin Farklı standartlardaki Karşılıkları Yapısal Özellikleri ...	13
Tablo 3. Taguchi L9 ortagonal dizisine göre belirlemiş Deney Parametreleri.....	46
Tablo 4. Hızlı aşınmaya geçiş anındaki zaman ve aşınma değerleri ile son ölçümün yapıldığı zaman ve aşınma miktarları.....	49
Tablo 5. Kesme parametreleri ve takım ömür bilgileri	57
Tablo 6. Belirlenen Seviye ve Faktörler	57
Tablo 7. L9 Deney Düzeni	58
Tablo 8. Deney Parametreleri ve hesaplanan S/N oranları.....	59
Tablo 9. Yanıt Tablosu	59
Tablo 10. Her bir kontrol faktörünün takım ömrüne katkısı istatistiksel olarak gösterilmesi.....	63
Tablo 11. Öznitelik Uyum Tablosu Regresyondan elde edilen Düz.R ² ve Eğim Değerleri	75
Tablo 12. Özniteliklerin dinamik davranış değerleri.....	77
Tablo 13. SVM Skorlarında setlerin sıralanması.....	92
Tablo 14. Sınıflandırma Performansı FSG ve GLCM Setleri-Video ve Foto; Tahmin, Doğruluk ve F1 değerleri	94
Tablo 15. Sınıflandırma Performansı; Tüm Altı Öznitelik için, Video Üst Foto Alt - Tahmin, Doğruluk ve F1 Değerleri	95

SEMBOLLER VE KISLTMALAR DİZİNİ

V	: Kesme Hızı
f	: Kesme İlerlemesi
a	: Kesme Derinliği
GLCM	: Gri Seviye Eş-Oluşum Matrisi
FSG	: Fourier Genlik Ortalaması, Sinüs E_{RMS} , Gauss E_{RMS}
ERMS	: Kök-ortalama-kare uyum hatası
DFT	: Ayrık Fourier Dönüşümü
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
PCA	: Başlıca Bileşenler Analizi
SVM	: Destek Vektör Makineleri
SVC	: Destek Vektör Sınıflandırıcı
CM	: Karışıklık Matrisi
LOEO	: Leave-One-Experiment-Out çapraz doğrulama
ANOVA	: Varyans Analizi
S/N	: Sinyal-Gürültü Oranı (Taguchi)
L9	: Taguchi L9 ortogonal dizi
ISO 3685	: Takım aşınması/ömür standardı
AE	: Akustik Emisyon
Düz. R^2	: Düzeltilmiş belirleme katsayısı
acc	: Doğruluk (Accuracy)
F1	: F1 skoru
TP	: Doğru Pozitif
TN	: Doğru Negatif
FP	: Yanlış Pozitif
FN	: Yanlış Negatif
RMS	: Kök-ortalama-kare değer

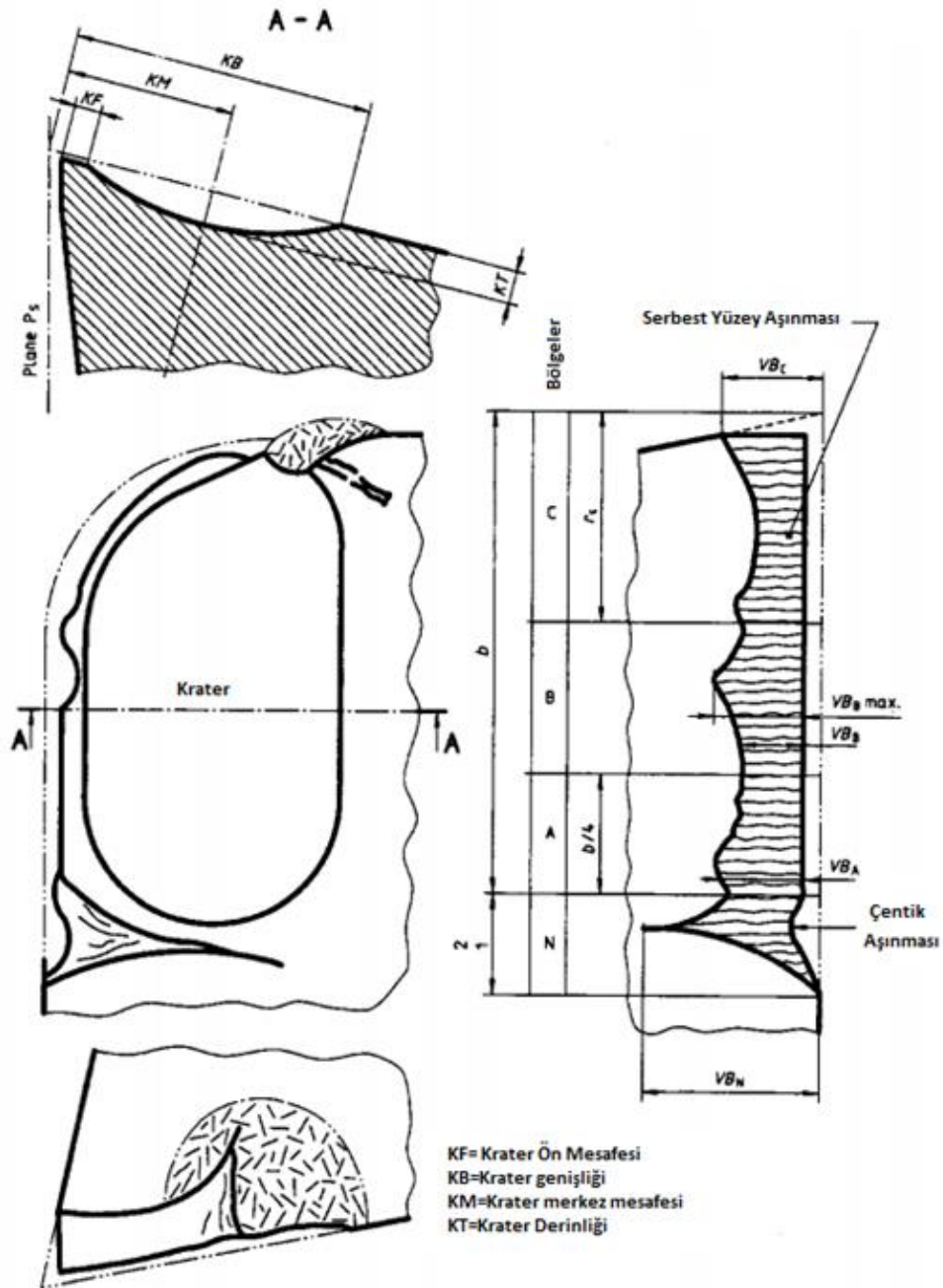
1. GENEL BİLGİLER

Talaşlı imalat işlemleri, üretim sektörünün en temel ve yaygın yöntemlerinden biridir. Günümüzde bu işlemlerin otomasyona entegrasyonu, sürdürülebilir üretim açısından büyük önem taşımaktadır. Talaşlı imalatın otomasyon sürecinde kesici takım aşınmasının gerçek zamanlı izlenmesi ve takibi kritik bir rol oynamaktadır. Verimlilik perspektifinden bakıldığında, kaba işlemlerde kesici takımların ömürlerini tamamlamadan değiştirilmesi ekonomik kayıplara neden olurken, hassasiyet gerektiren işlemlerde kesici takımın yüzey kalitesini sağlama yeteneğini kaybetmesi, parçada geri dönüşü mümkün olmayan hatalara yol açarak parçanın kullanılamaz hale gelmesine sebep olabilmektedir. Bir başka ve belkide de en önemli olumsuz senaryo ise çok sayıda parametrenin etkileşiminin öngörülemeyen hızlı bir aşınmaya zemin hazırlaması ve bunun sonucunda kesici takımın beklenmedik bir anda kırılması veya deformasyona uğramasıdır. Bu durum sadece üretilen parçanın tamamen kullanılamaz hale gelmesine değil, aynı zamanda tezgâhların zarar görmesine ve iş kazalarının yaşanmasına da yol açabilmektedir. Dolayısıyla, takım aşınmasının güvenilir yöntemlerle izlenmesi, modern üretim süreçlerinde kalite, maliyet ve iş güvenliği açısından hayati önem taşımaktadır.



Şekil 1. Kesici takım ucunda meydana gelen aşınma tipleri (a) Krater Aşınması (b) Serbest Yüzey aşınması (c) Yığma kenar (d) Çentik aşınması (e) uç kütleşmesi (f) termal ve mekanik çatlaklar (Grzesik,2008).

Kesici takım aşınması; yanak (flank), krater (crater) ve çentik (notch) gibi farklı türlerde ortaya çıkmaktadır. Tornalama işleminde görülen bu ve bunların yanı sıra birkaç farklı aşınma türüne ait örnekler Şekil 1'de sunulmuştur. Bu türler arasında, iş parçasının yüzey kalitesi ile doğrudan ilişkili olması nedeniyle yanak aşınması en kritik ve yaygın olarak takip edilen aşınma türüdür (Nath,2020).



Şekil 2. ISO 3685:1993 Takım aşınması ölçüm bölgeleri

Şekil 2'de, ISO takım ömrü standartları (ISO 3685:1993) kapsamında çeşitli takım aşınma türleri için tanımlanan ölçüm bölgeleri sunulmaktadır. Standartta, yanak(serbest yüzey) aşınmasının değerlendirilmesinde B bölgesi esas alınmakta; bu bölgede aşınma düzenli bir dağılım gösteriyorsa ortalama aşınma genişliği (VB_B), düzensiz bir dağılım söz konusuysa maksimum aşınma genişliği (VB_{Bmax}) ölçüt olarak önerilmektedir. Bununla birlikte, tanımlanan sınırların dışında kalan durumlar için bu değerlerin $\pm\%50$ sapmayla dikkate alınabileceği de ifade edilmektedir. Ayrıca standart, yanak aşınmasını iki grupta ele almaktadır: Major aşınma, genellikle kaba tornalama işlemlerinde A, B ve C bölgelerinde meydana gelirken; minor aşınma daha çok finiş tornalama işlemlerinde C bölgesinde gözlemlenmekte ve doğrudan yüzey kalitesini etkilemektedir. Minor aşınma durumlarında, VB_{max} değerinin 0.3 mm'ye ulaşmadan önce takımın işlevselliğini yitirebileceği vurgulanmakta; bu nedenle, takım ömrü kriteri olarak, işlem koşullarına bağlı şekilde yüzey pürüzlülüğü ya da belirli bir aşınma değerinin esas alınabileceği belirtilmektedir.

İşleme sırasında kesici takımın ne zaman değiştirileceği, hem üretim kalitesi hem de ekonomik gereklilikler doğrultusunda önceden belirlenebilir. Takım aşınmasının izlenmesi için uygulanan en doğrudan yöntem, takımın işleme operasyonları arasında işlem bölgesinden uzaklaştırılarak aşınma seviyesinin manuel olarak ölçülmesidir. Bu ölçümler genellikle mikroskop altında ya da takımın yüzeyinden elde edilen dijital görüntüler üzerinden gerçekleştirilir. Son yıllarda bu sürecin insan müdahalesine gerek kalmadan, makine görüşü ve karar destek sistemleri kullanılarak otomatik hale getirilmesine yönelik önemli araştırmalar yapılmaktadır. Petrovic Savić ve ark. (2025), düşük maliyetli bir USB mikroskop ve MATLAB tabanlı morfolojik segmentasyon yöntemi kullanarak kesici uçlardaki aşınma bölgelerini otomatik olarak tespit etmiş, %99 doğruluk ve %92 hassasiyet elde etmişlerdir. Çalışma, pahalı sistemlere gerek kalmadan takım aşınmasının görsel olarak izlenebileceğini göstermiştir. Kumar ve arkadaşları (2025), bir CNC freze tezgâhına entegre ettikleri mikroskop tabanlı görüntüleme sistemi ve EfficientNet-b0 modeli ile Inconel 718 işleme sırasında oluşan takım aşınma türlerini %94,11 doğrulukla sınıflandırılabilen bir sistem tasarlamışlardır. Bagga ve arkadaşları (2021), kesici takımın aşınmış yüzeylerinden elde edilen dijital görüntüler üzerinde uyguladıkları bir algoritma ile, aşınma değerini %5'in altında bir hata payı ile hesaplamayı başarmışlardır. Colantonio ve arkadaşları (2024), torna işlemleri sırasında elde edilen takım görüntüleri üzerinden VGG19, EfficientNetV2 ve Vision Transformer (ViT) modellerini transfer öğrenme ile

eğiterek takımın durumunu “yeni”, “orta aşınmış” ve “aşınmış” olarak sınıflandırmıştır. Yapılan karşılaştırmalı analizde, VGG19 modeli %94 doğruluk ile en yüksek başarıyı göstermiştir.

Takım aşınmasının doğrudan ölçüldüğü uygulamalar, takım üzerindeki aşınmanın gözlemlenmesine doğrudan imkân tanısa da, bu tür yöntemler genellikle belirli duraklama zamanlarına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Oysa talaşlı imalat süreçlerinde yapılan her ilave duraklama, operasyon süresini ve dolayısıyla üretim maliyetini doğrudan artırmaktadır. Ayrıca, ölçüm yapılabilen anların sınırlı olması nedeniyle, takım aşınmasının kritik sınırları aşmaması için genellikle temkinli tahminlerle takım değişimi yapılmaktadır. Bu noktada, gerçek zamanlı takım aşınma izleme sistemleri öne çıkmaktadır. Bu sistemler yalnızca denetim amaçlı duraklamalara olan ihtiyacı ortadan kaldırmakla kalmaz, aynı zamanda kesici takımların daha verimli kullanılmasına olanak tanıyarak temkinli sınırlar nedeniyle oluşan erken takım değişimlerinin de önüne geçer. Bunun yanı sıra, takım durumu hakkında anlık bilgi sağlanması, kesme parametrelerinin dinamik şekilde optimize edilmesine katkı sağlayarak üretim maliyetlerinin düşürülmesinde de önemli rol oynar (Kuntoğlu ve Sağlam,2019). Kuntoğlu ve arkadaşları (2020), AISI 5140 çeliğinin tormalanması sırasında aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve çeşitli sensör verilerini optimize etmek amacıyla beş farklı gerçek zamanlı izleme yöntemi kullanmıştır.

Yanak aşınması, aşınma ile birlikte değişen fiziksel süreçlerden elde edilen sinyaller aracılığıyla izlenebilmektedir. Gerçek zamanlı aşınma takibi amacıyla; akustik emisyon, kesme kuvvetleri, motor akımı, titreşim ve sıcaklık gibi parametreler sıklıkla kullanılmış ve literatürde birçok çalışmada bu yöntemlere başvurulmuştur (Das vd. ,2024)

Son yıllarda, torna operasyonlarında kesici takımın durumu hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlayan en yaygın yöntemlerden biri akustik emisyon (AE) olmuştur (Kuntoğlu vd.,2020). AE sinyalleri; takım kırılması, talaşın takım veya iş parçasına çarpması, yüzey sürtünmesine bağlı olarak oluşan yanak ve krater aşınmaları ile iş parçasında meydana gelen plastik deformasyonlar gibi birçok kaynaktan üretilmektedir (Siddhpura & Paurobally,2013). İlgili sensörlerle toplanan bu sinyaller, çeşitli sinyal işleme teknikleriyle analiz edilerek takım durumu hakkında bilgi sağlar. Yöntem, kırılma ve ani arızaların tespiti açısından etkili olsa da; sensör konumunun ölçüm sonuçlarına etkisi, kesme koşullarına karşı hassasiyeti ve talaş ya da soğutma sıvısından kaynaklı parazitler gibi etkenler nedeniyle aşınma izleme konusunda sınırlamalara sahiptir (Dimla,2000). Bibin ve arkadaşlarının (2018) gerçekleştirdiği çalışmada, D2 çeliğinin sert tormalanması sırasında

kaydedilen akustik emisyon (AE) sinyallerinin, takımın serbest yüzeyindeki aşınma miktarıyla yüksek düzeyde ilişkili olduğu gösterilmiştir. Özellikle, AE sinyalinin kök ortalama kare (RMS) değerinin 3 volt civarına ulaşması durumunda, takımda yaklaşık 0.3 mm seviyesinde yanak aşınması olduğu gözlemlenmiştir.

Takım aşınmasının gerçek zamanlı takibinde kullanılan bir diğer yöntem ise kesme kuvvetleridir. Kesme kuvvetlerinin izlenmesi, farklı tipte dinamometreler (örneğin gerinim ölçer (strain gauge) veya piezoelektrik tabanlı sistemler) kullanılarak gerçekleştirilebilmekte ve takım aşınmasının takibinde yaygın olarak değerlendirilmektedir. Ancak farklı aşınma türleri kesme kuvvetleri üzerinde farklı etkiler oluşturduğundan, elde edilen verilerin doğru bir şekilde işlenmesi ve yorumlanması, aşınma türlerinin ayırt edilebilmesi açısından kritik önem taşımaktadır (Oraby & Hayhurst, 1991). Bu yöntemin farklı aşınma türlerinden etkilenmesinin yanı sıra, kesme kuvvetleri çok sayıda işlem parametresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Bourdim & Kerrouz, 2017). Öyle ki, yalnızca kesme koşulları değil, kullanılan talaş kırıcı geometriler bile kuvvetleri etkileyebilmektedir (Mesquita & Barata, 1992). Kesme kuvvetlerinin izlenmesinde, parametre çeşitliliğinin oluşturduğu belirsizliklerin yanı sıra, çok eksenli dinamometrelerin endüstriyel uygulamalarını sınırlayan bazı önemli dezavantajlar da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar arasında, yüksek donanım maliyetleri, aşırı yük koruma eksikliği ve dar frekans yanıt aralığı yer almaktadır (Abellan-Nebot & Subirón, 2010).

Kesme kuvvetlerinin dolaylı izlenmesinde, motor akımları ve güç tüketimi verileri üzerinden çıkarım yapılması da mümkündür (Teti vd.,2010). Bu tür sistemler, dinamometrelere kıyasla daha ekonomik bir çözüm sunsa da, sensörlerin takım bölgesinden uzakta konumlanması nedeniyle hassasiyet kayıpları yaşanabilmektedir, ve dolayısıyla, aşınma takibi açısından değerlendirildiğinde, bu sistemlerin duyarlılığı dinamometre tabanlı ölçümlere göre daha düşüktür (Kuntoğlu vd, 2021).

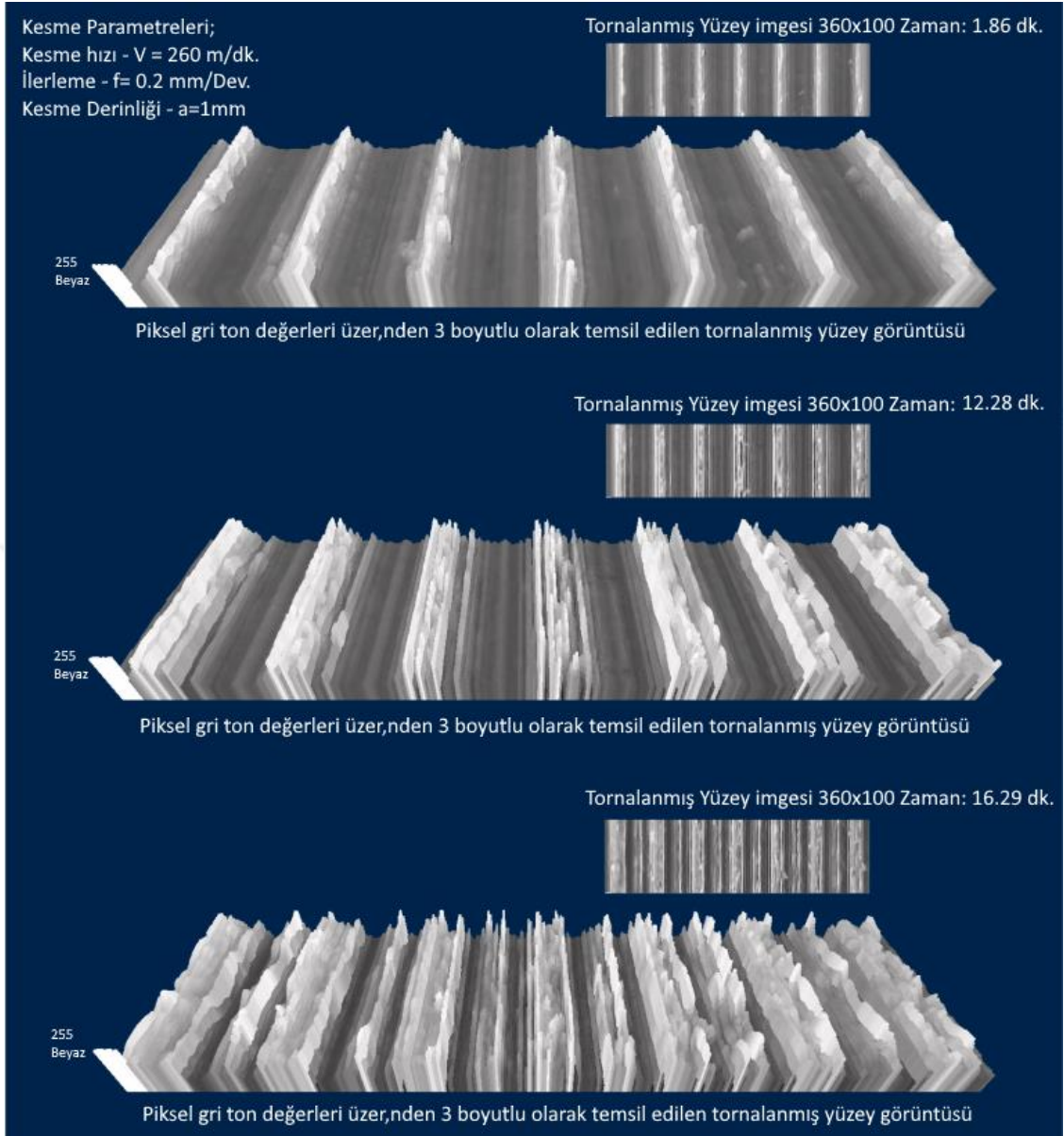
Titreşim verilerinin takım aşınmasının izlenmesinde kullanılması, literatürde yaygın olarak karşılaşılan bir yaklaşımdır (Serin vd.,2020) . Kesme işlemi sırasında elde edilen titreşim sinyalleri çok boyutlu bir yapıya sahiptir ve yalnızca kesme parametrelerine değil, aynı zamanda tezgâhın kendi dinamik davranışlarına ve çevresel titreşim etkilerine de bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Teti vd.,2010). Ayrıca sensor pozisyonlaması da sonuçları ciddi oranda etkileyebilmektedir (Serin vd.,2020). Belirtilen dezavantajlara rağmen, titreşim sensörlerinin düşük maliyetli ve kolay entegre edilebilir olması, onları

aşınma izleme uygulamalarında yardımcı sensör olarak tercih edilir kılmaktadır (Salame vd.,2024).

Kesim bölgesinin çeşitli termal ölçüm ekipmanlarıyla izlenmesi, takım aşınmasının gerçek zamanlı takibine yönelik literatürde ele alınan yöntemlerden biridir (Saatçi vd.,2023). Ancak kesme işlemi sırasında ısının; kesme bölgesi, iş parçası-takım teması ve talaş-takım teması gibi farklı bölgelerde oluştuğu dikkate alındığında, bu ısı dağılımını doğru bir şekilde yorumlamak karmaşık hâle gelmektedir. Ayrıca, bu bölgelerdeki sıcaklık dağılımı birçok işlem parametresine bağlı olarak değiştiğinden, bu durum termal ölçüm tabanlı izleme yöntemlerini yüksek derecede parametrik bağımlılığa sahip sistemler yapmaktadır.

Yukarıda da belirtildiği gibi, takım aşınmasının izlenmesinde kullanılan fiziksel sinyaller—örneğin sıcaklık, titreşim, akustik emisyon ve kesme kuvvetleri—pek çok aşınma mekanizması tarafından belirli düzeylerde üretilmektedir. Ancak bu sinyallerin yalnızca aşınmadan değil, aynı zamanda kesme parametreleri, takım geometrisi ve çevresel koşullar gibi pek çok dış etkenden de doğrudan etkilendiği bilinmektedir. Bu durum, aşınma türlerinin kesin ve güvenilir bir şekilde ayrıştırılmasını zorlaştırmakta; dolayısıyla fiziksel tabanlı izleme sistemlerinin doğruluğu ve genellenebilirliği üzerinde sınırlayıcı bir etki yaratmaktadır. Kuntoğlu ve Sağlam (2021) tarafından yürütülen ve beş farklı sensör tipinin karşılaştırıldığı kapsamlı bir çalışmada, en yüksek doğruluk oranı %74 ile akustik emisyon ve sıcaklık verilerinin birlikte kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Bu iki parametreyi sırasıyla akım (%37), titreşim (%30) ve kesme kuvveti (%23) verileri takip etmiştir.

İşlenmiş yüzeyler, kesici takım üzerinde meydana gelen aşınmanın fiziksel etkilerini doğrudan yansıtır (Kassim vd.,2000). Bu nedenle, tornalanmış yüzey üzerinden takım aşınmasını izlemek mümkündür. Son yıllarda literatürde, tornalanmış yüzey görüntülerinden elde edilen dokusal özneliliklerin kullanılmasıyla takım aşınmasının tahmin edilmesine yönelik çalışmalar yoğunlaşmıştır. Şekil 3, aşınmanın tornalanmış yüzey üzerindeki etkilerini gösteren örnek görüntüleri içermektedir. Bu çalışmalarda, gri seviye eş oluşum matrisi (gray level co-occurrence matrix - GLCM), histogram analizi , Voronoi diyagramı, dalgacık dönüşümü (wavelet transform) ve Fourier dönüşümü gibi farklı doku analizi yöntemleri kullanılmaktadır.



Şekil 3. Tornalanmış yüzey imgelerindeki aşınmaya bağlı bozunumun 3B gösterilmesi
(Külleç ve Çuvalcı,2023)

Dokusal analizde yaygın olarak kullanılan Gri Seviye Eş Oluşum Matrisi yöntemi, ilk olarak Haralick ve çalışma arkadaşları (1973) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, bir görüntüdeki piksellerin belirli yönlerde ve mesafelerde birlikte bulunma olasılıklarına dayalı olarak bir matris oluşturulmasını esas alır. Oluşturulan bu matristen, yüzeyin dokusal özelliklerini temsil eden çeşitli istatistiksel öznitelikler elde edilmektedir. Haralick'in orijinal çalışmasında, açılal ikinci moment, kontrast, korelasyon ve entropi gibi 14 farklı istatistiksel ölçüm tanımlanmış ve bu ölçütler, GLCM'lerden öznitelik çıkarımı amacıyla kullanılmıştır. Baht ve çalışma arkadaşları (Baht vd.,2016),

gerçekleştirdikleri dört farklı tornalama deneyinde, işlenmiş yüzey görüntüleri üzerinden elde ettikleri GLCM'ler yardımıyla toplamda on beş farklı dokusal öznelik çıkarmışlardır. Bu öznelikler arasından Fisher ayırt edicilik oranı analizini kullanarak, kesici takımın yanak aşınması ile en güçlü ilişkiye sahip dört tanesini seçmişlerdir. Ardından, gizli Markov modeli (HMM) tabanlı bir sınıflandırma yöntemi uygulayarak kesici takımın keskin, yarı kör ve tamamen kör aşınma durumlarını en az %94 sınıflandırma doğruluğu ile ayırt edebildiklerini raporlamışlardır. Datta ve arkadaşları (2011), GLCM yöntemiyle tornalanmış yüzey görüntülerinden elde edilen kontrast ve homojenlik gibi dokusal öznelikleri inceleyerek, bu parametrelerin yanak aşınması ile olan ilişkisini araştırmışlardır. Araştırma bulgularına göre bu öznelikler, takım durumu izleme uygulamaları için oldukça uygun adaylardır. Öte yandan, GLCM matrislerinin oluşturulmasında kullanılan piksel mesafesinin sonuçlar üzerinde belirleyici etkisi olduğu belirtilmiş; bu bağlamda, doğru piksel aralığının seçilebilmesi için otomatik bir optimizasyon sürecine ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Li ve An (2016), Shannon entropisine dayalı yeni bir öznelik önererek takım aşınmasının izlenmesinde bu entropi tabanlı yaklaşımı test etmişlerdir. Çalışmalarında, uygun piksel mesafesinin belirlenmesi durumunda bu yeni özneliğin aşınma durumunu etkili bir şekilde temsil edebileceğini göstermişlerdir.

Chethan ve arkadaşları (2018), işlenmiş yüzeylerin değerlendirilmesinde birinci mertebe istatistiksel yöntemlerden biri olan histogram analizi ile tornalanmış yüzeyleri pürüzlü ya da düzgün olarak sınıflandırmışlardır. Datta ve arkadaşları (2013), serbest yüzey aşınmasının belirlenmesine yönelik olarak Voronoi bölütleme (tessellation) yöntemini kullanarak görüntü tabanlı öznelikler elde etmişlerdir. Bu amaçla, Canny kenar tespiti uygulanan yüzey görüntülerine Voronoi bölütleme uygulanmış ve elde edilen özneliklerin aşınma ilerlemesiyle doğrusal bir ilişki gösterdiği ortaya konmuştur. Çalışma, geometrik yapıların analizine dayanan bu yöntemin, yüzeydeki aşınma etkilerini sayısal olarak yansıtmaya potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Dutta ve arkadaşları (2016), tornalanmış yüzey görüntülerini analiz etmek amacıyla Voronoi bölütleme, ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) ve GLCM tabanlı yöntemleri bir arada kullanmışlardır. Her bir teknikten farklı dokusal öznelikler çıkararak bu özneliklerin takım aşınmasının izlenmesinde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgular, her bir yöntemle elde edilen özneliklerin tek başına anlamlı sonuçlar verdiğini, ancak bu özneliklerin birlikte kullanılması durumunda aşınma tespiti performansının önemli ölçüde arttığını

göstermiştir. Danesh ve Khalili (2015), geleneksel dalgacık dönüşüm yöntemlerinden farklı olarak yeniden örnekleme yapılmadan (undecimated) dalgacık dönüşümü kullanarak oluşturdukları alt bant görüntüler üzerinde GLCM temelli bir analiz gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirdikleri tornalama deneyleri sonucunda, düşük-yüksek (Low-High) ve yüksek-yüksek (High-High) alt bant görüntülerinden elde edilen entropi özneliği ile serbest yüzey aşınması arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu bulgular, çok ölçekli dokusal analizlerin takım aşınmasının izlenmesinde etkin biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

Palani ve Natarajan (2011), yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek amacıyla geliştirilen bir yapay sinir ağı modelinde; kesme parametreleri, Fourier dönüşümünden elde edilen öznelikler ve ortalama gri seviye değeri gibi giriş verilerini kullanmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, önerilen sistemin yüzey pürüzlülüğünü ortalama %2,47 hata payıyla başarılı bir şekilde tahmin edebildiği rapor edilmiştir. Svalina ve çalışma arkadaşları (2020), farklı malzemelerin frezelenmiş yüzey görüntüleri üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada; Gri Seviye Eş Oluşum Matrisi, Çalışma Uzunluğu İstatistikleri (Run length Statistic - RLS), istatistiksel yöntemler ve Fourier dönüşümüne dayalı analizlerle elde edilen 23 farklı öznelik ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak incelemişlerdir. Genel olarak elde ettikleri bulgular, istatistiksel temelli iki öznelik—standart sapma ve entropi—her zaman en başarılı beş öznelik arasında yer alırken, geri kalan üç sıranın genellikle GLCM ve Fourier tabanlı öznelikler tarafından paylaşıldığını göstermiştir. Peng ve çalışma arkadaşları (2015), hızlı Fourier dönüşümüne (FFT) dayalı görüntüler üzerinde fraktal analiz uygulayarak, serbest yüzey aşınmasının belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, analiz edilen farklı eksenler arasında özellikle x ekseninin aşınmaya karşı diğer eksenlere kıyasla çok daha tutarlı ve anlamlı tepkiler verdiği gözlemlenmiştir. Hoy ve Yu (1991), ilerleyen takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü nedeniyle oluşan değişimlerin, işlenmiş yüzey görüntülerinin iki boyutlu genlik spektrumlarında da belirgin şekilde gözlemlendiğini ortaya koymuşlardır. Yaptıkları analizlerde, spektrumların yayılma düzeyindeki farklılıkların, takım aşınmasının yüzey üzerindeki etkilerini yansıttığını göstermişlerdir.

Literatürdeki takım durumu izleme çalışmalarının tamamı, genellikle tornalama sonrasında elde edilen durağan yüzey görüntülerine dayanmaktadır. Mevcut yayınlarda, ne yüksek hızlı ne de standart hızda çekilmiş video tabanlı yüzey görüntülerinin analizine yönelik bir yaklaşım rapor edilmemiştir.

Bu çalışmada, tornalama sürecinde oluşan dalgalı yüzeylerin video karelerinden, Fourier Dönüşümü (FFT), ile sinüs ve Gauss eğri uydurma yöntemleri kullanılarak öznitelikler çıkarılmış; bu öznitelikler kullanılarak takım aşınmasının izlenmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, büyük iş parçalarında zayıf riskine yol açan kritik takım kırılmalarının önlenmesi, takım kullanımında ekonomik verimliliğin artırılması ve üretim süreçlerindeki duraklama sürelerinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

Önerilen yöntemin merkezinde, tornalanmış yüzeyin dalgalı yapısına göre bu tez çalışması kapsamında tarafımızdan literatüre kazandırılan iki yeni öznitelik bulunmaktadır: sinüs uyum hatası (Sin_{ERMS}) ve Gauss eğrisi uyum hatası ($Gauss_{IERMS}$) (Küllaç ve Çuvalcı, 2025). Buna ek olarak, Fourier dönüşümünün genlik spektrumu ortalamasına dayalı öznitelik daha önce yüksek lisans çalışmamızda (Küllaç, 2019) literatüre kazandırılmış olup, bu tezde yeni özniteliklerle birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıca, literatürde yaygın kullanılan GLCM tabanlı öznitelikler (entropi, homojenlik ve kontrast) (Das vd.,2011; Svalinavd.,2020; Li&An,2016) de çalışmaya dahil edilerek hem fotoğraf hem de video karelerinden elde edilen özniteliklerle kıyaslamalar yapılmıştır.

Deneyisel inceleme kapsamında, video ve foto tabanlı öznitelikler kullanılarak Taguchi L9 deney tasarımına göre oluşturulan veri setinde, hızlı ve yavaş aşınma bölgeleri Destek Vektör Makineleri (SVM) ile sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda video ve foto tabanlı ayrı ayrı olmak üzere üç farklı senaryo değerlendirilmiştir: (i) yalnızca özgün öznitelikler (Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatası) kullanılarak SVM sınıflandırması, (ii) yalnızca GLCM tabanlı öznitelikler (entropi, homojenlik ve kontrast) kullanılarak SVM sınıflandırması ve (iii) her iki gruptaki toplam altı öz niteliğin birlikte kullanıldığı SVM sınıflandırması. Böylece, farklı öznitelik gruplarının takımın hızlı aşınma bölgesine geçişi tahmin etmedeki katkıları karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, tormalanmış yüzeylerden elde edilen video verilerinden öznitelik çıkarımı yapılarak makine öğrenmesi algoritmaları yardımıyla takım aşınmasının gerçek zamanlı olarak izlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, tormalama işlemleri ve görüntü alma prosedürleri içeren deneyler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen görüntüler üzerinden takım aşınmasına yönelik ölçümler yapılmış, ayrıca yüzey görüntülerine çeşitli görüntü işleme yöntemleri uygulanarak öznitelikler çıkarılmıştır. Bu öznitelikler makine öğrenmesi algoritmasına (Destek Vektör Makinaları - SVM) giriş verisi olarak kullanılarak, takım aşınmasının gerçek zamanlı izlenebilmesi hedeflenmiştir.

2.1. Tormalama İşlemleri

Tormalama deneyleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Talaşlı İmalat Laboratuvarı'nda bulunan Tezmaksan marka TR251 model CNC tormalama tezgâhında yürütülmüştür. Tezgâhın teknik özellikleri Tablo 1'de, genel görünümü ise Şekil 4'te sunulmaktadır. Tezgâhın çalışma alanının görüntüsü de Şekil 5'te sunulmuştur

Tablo 1. Tezmaksan TR-251 model CNC tezgahına ait teknik özellikler

Özellik	Değer
Maksimum Çevirme Çapı	450 mm
Maksimum Tormalama Çapı	350 mm
Maksimum Tormalama Boyu	420 mm
İş Mili Devri	4000 rpm
İş Mili Motor Gücü	15 kW
X Eksen Hareketi	200 mm
Z Eksen Hareketi	455 mm
Taret İstasyon Sayısı	12



Şekil 4. Tezmaksan Tr251 CNC torna Tezgahı

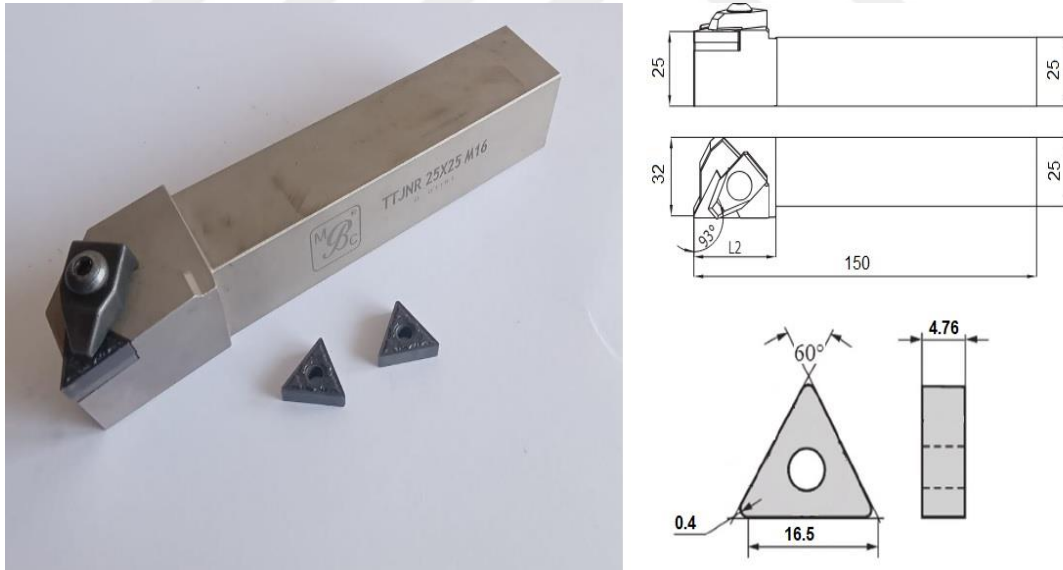


Şekil 5. Tezmaksan Tr251 CNC torna Tezgahı Çalışma Alanı

Tez çalışması kapsamında, 3 farklı kesme parametresi (kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği) dikkate alınarak toplam 9 adet tornalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneylerinde, geniş kullanım alanı ve kolay temin edilebilirliği nedeniyle AISI 4140 çeliği tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan çeliğin metalurjik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Kullanılan çelik kütükler sıcak haddelenmiş olup 100 mm çapında ve 350 mm uzunluğunda temin edilmiştir.

Tablo 2. AISI 4140 Çeliğinin Farklı standartlardaki Karşılıkları Yapısal Özellikleri

Malzemenin farklı standartlardaki karşılıkları							
AISI/SAE		DIN		EN		JIS	
4140		1.7225		42CrMo4		SCM 440(H)	
Malzemenin kimyasal bileşimi							
C	Si	Mn	P-max	S-max	Cr	Mo	V
0.38-0.45	0.15-0.40	0.50-0.80	0.035	0.035	0.90-1.20	0.15-0.30	-



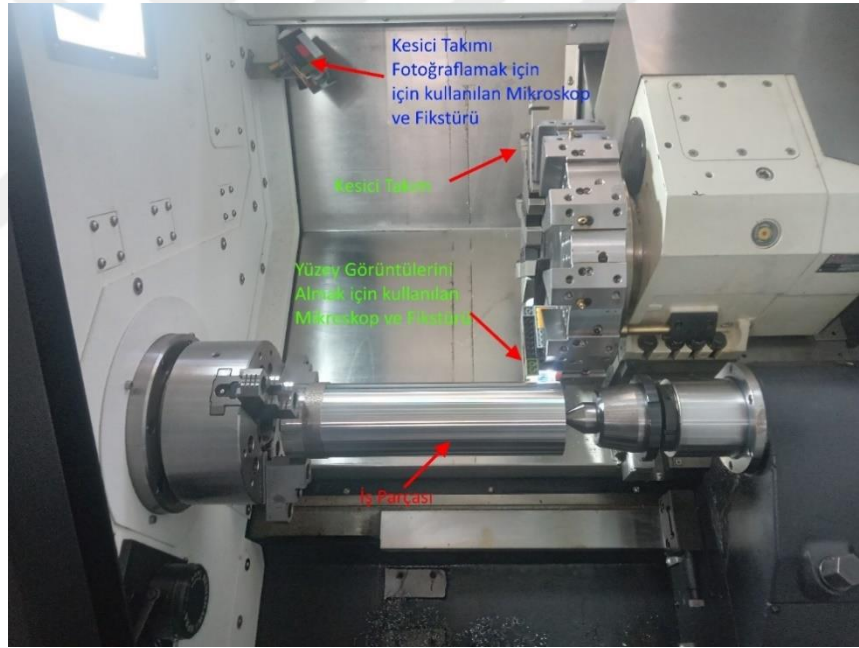
Şekil 6. MBC firmasına ait TTJNR 25×25 ölçülerindeki takım tutucu ile Korloy üretimi, TNMG160404–VM PC5300 kodlu talaş kırıcı geometrili, kaplamalı sinterlenmiş karbür uçlar

Deneylerde gerçekleştirilen tornalama işlemlerinde, MBC firmasına ait TTJNR 25×25 ölçülerindeki takım tutucu ile Korloy üretimi, TNMG160404–VM PC5300 kodlu talaş kırıcı geometrili, kaplamalı sinterlenmiş karbür uçlar tercih edilmiştir. Kullanılan takım tutucu ile kesici uca ait fotoğraf ve geometrik ayrıntılar Şekil 6’da sunulmaktadır.

2.2. Deney Düzeneği

Deney kapsamında kurulan düzenek; CNC tornalama tezgâhı, kesici takım ve işlenmiş yüzeyin görüntülenmesi için kullanılan iki adet kablosuz dijital mikroskoptan oluşmaktadır. Ayrıca, mikroskoplara ait fişktür aparatları ve görüntülerin kaydedildiği bir tablet bilgisayar da sisteme dahil edilmiştir. Bu yapı sayesinde yüzey görüntüleri yüksek çözünürlükte kaydedilebilmiş, aynı zamanda kablosuz sistem sayesinde titreşim ve kablo karmaşası gibi olası sorunlar ortadan kaldırılmıştır.

Kameraların tezgâh çalışma alanına konumlandırılmasında, hem işlenmiş yüzeyin sağlıklı bir şekilde izlenebilmesi hem de takım üzerindeki aşınmaya dair detayların net şekilde yakalanabilmesi gözetilmiştir. Kameraların deney düzeneği kapsamındaki yerleşimleri ise Şekil 7’de sunulmuştur.

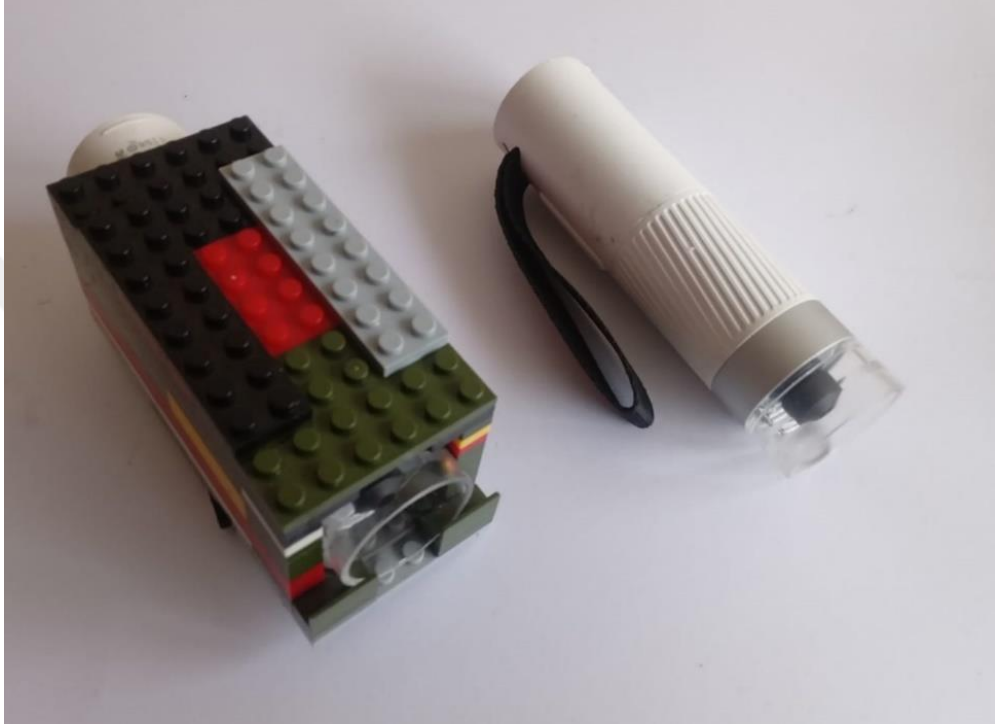


Şekil 7. Deney Düzeneği

2.3. Görüntü Edinimleri

Tez kapsamında takım ve yüzey görüntülerinin elde edilmesinde, Beaverlab marka M1 model, kablosuz görüntü aktarabilen dijital mikroskoplar kullanılmıştır. Bu mikroskoplar, kendinden aydınlatmalı, 1.0 MP CMOS sensör yapısına sahip olup, 1280 x 720 çözünürlüklü video ve fotoğraf görüntüleme kapasitesi ile deney süresince takım

aşınması ve işlenmiş yüzeyin ayrıntılı olarak gözlemlenmesine imkân sağlamıştır. Mikroskopların deney düzenine entegrasyonu için, plastik bloklardan özel tasarlanan fikstürler kullanılmıştır. Böylece mikroskopların sabit ve tekrarlanabilir bir şekilde konumlandırılması sağlanmıştır. Kullanılan mikroskoplar ve fikstürleri Şekil 8’de gösterilmektedir.

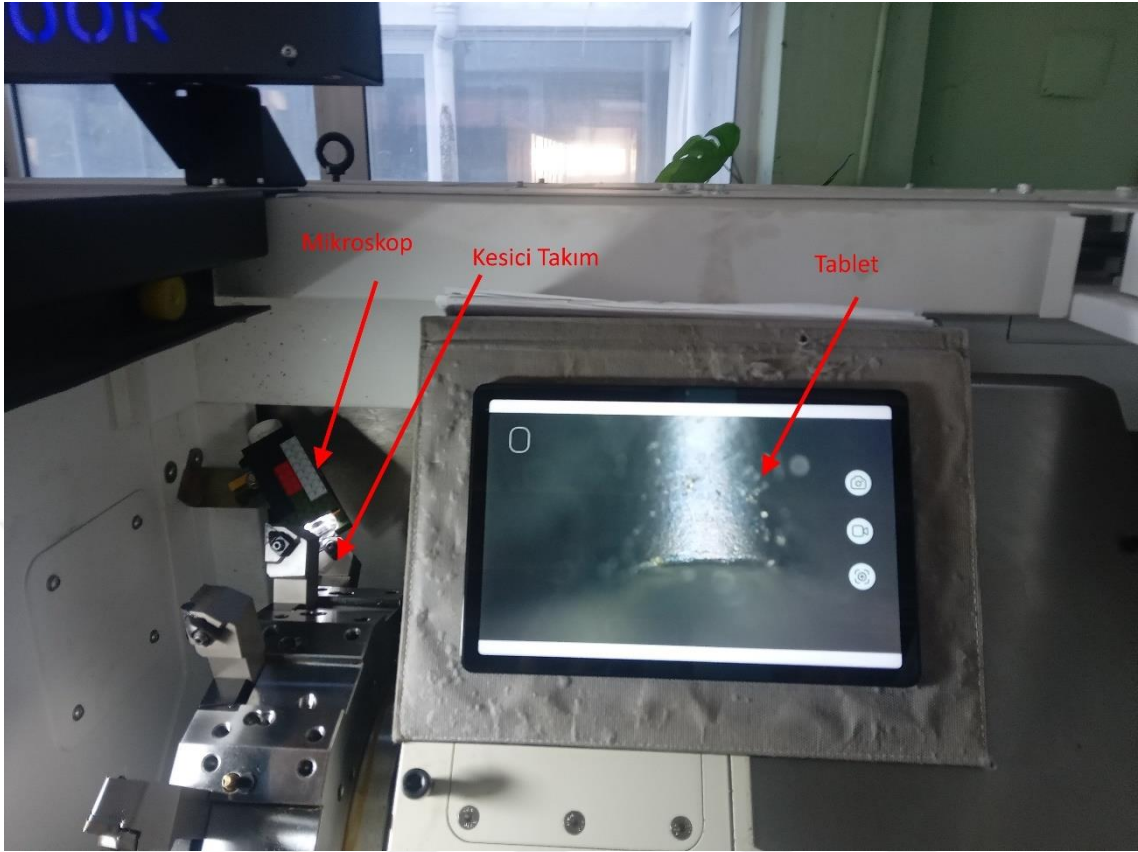


Şekil 8. Beaverlab marka M1 model, dijital mikroskoplar ve fikstürleri

2.3.1. Takım Aşınmasının Ölçülmesi

Tornalama işlemleri sırasında, her paso tamamlandıktan sonra kesici takım CNC tezgâh programı kullanılarak hassas bir şekilde konumlandırılmış ve tezgâhın uzak bir köşesine sabitlenmiş kameranın önüne getirilmiştir. Bu sayede, işlem kesintiye uğramadan her adımda standart koşullarda görüntü alınması sağlanmıştır. Kamera ile yapılan bu ölçüm prosedürü, aşınma ilerleyişinin adım adım belgelenmesine olanak vermiştir.

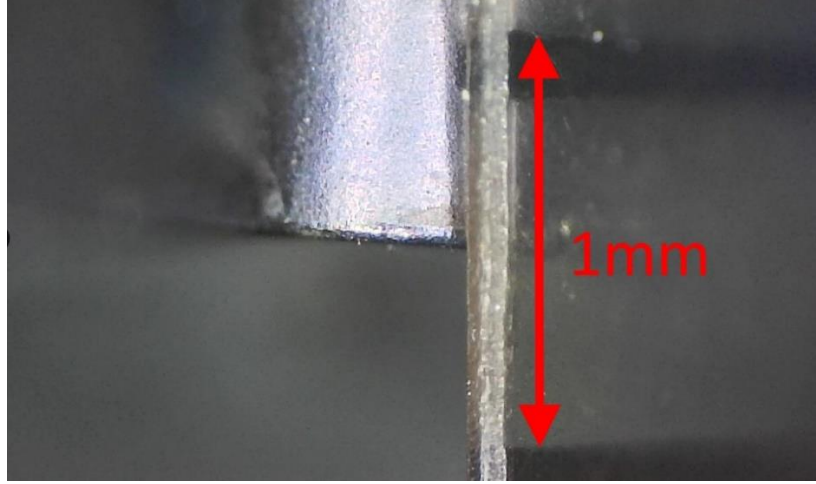
Her konumlandırma işleminde, kesici takım ucu aynı açı ve mesafeden görüntülenmiş, böylece farklı pasolar arasında karşılaştırılabilirlik korunmuştur. Bu yöntemle elde edilen görüntüler, aşınmanın düzenli aralıklarla kaydedilmesine imkân tanımış ve görsel veri tabanının oluşturulmasına katkı sağlamıştır. Şekil 9’da, kesici takımın kamera önüne getirilerek görüntü alımına ilişkin prosedür gösterilmektedir.



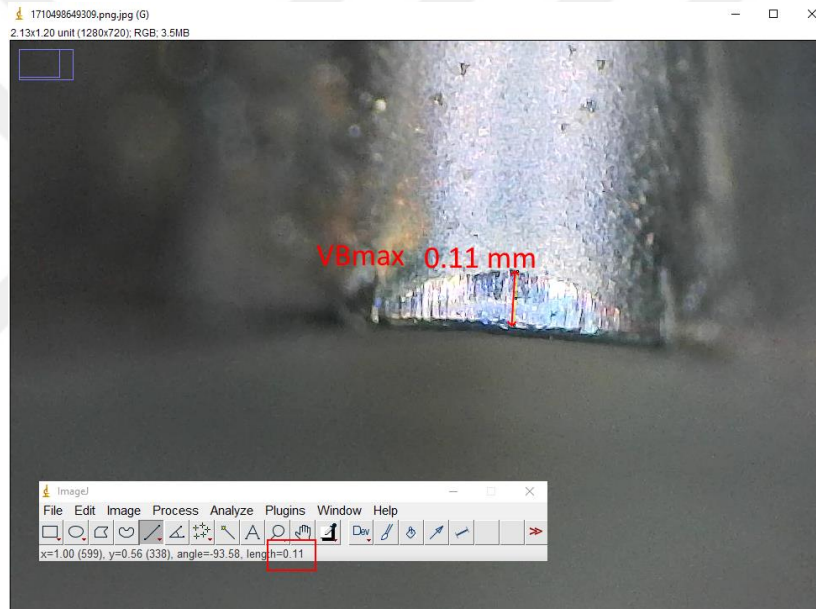
Şekil 9. Aşınmanın fotoğraflandırılması

Her deney öncesinde, kesici takımın CNC tezgâh üzerinde boyu alınmış ve bu nedenle kameranın kesici takıma göre pozisyonu değişmiştir. Bu sebeple her deney öncesinde, kesici takımın getirileceği konum belirlenmiş ve ilerleyen aşamalarda aşınma miktarının doğru şekilde ölçülebilmesi için kalibrasyon cetveli kullanılarak kalibrasyon görüntüsü alınmıştır. Bu sayede, elde edilen tüm görüntülerde ölçümler karşılaştırılabilir ve standart bir referansa dayalı hale getirilmiştir. Örnek bir kalibrasyon alım görüntüsü Şekil 10’da verilmiştir.

Kesici takımdan elde edilen fotoğraflar, açık kaynak kodlu ve serbest lisanslı ImageJ yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada, serbest yüzey aşınması takım ömrü kriteri olarak esas alınmış ve yapılan ölçümlerde serbest yüzey aşınmasının maksimum değeri dikkate alınmıştır. ImageJ programı ile gerçekleştirilen örnek bir ölçüm uygulaması Şekil 11’de sunulmaktadır.



Şekil 10. Aşınma ölçüm işlemleri için kalibrasyon

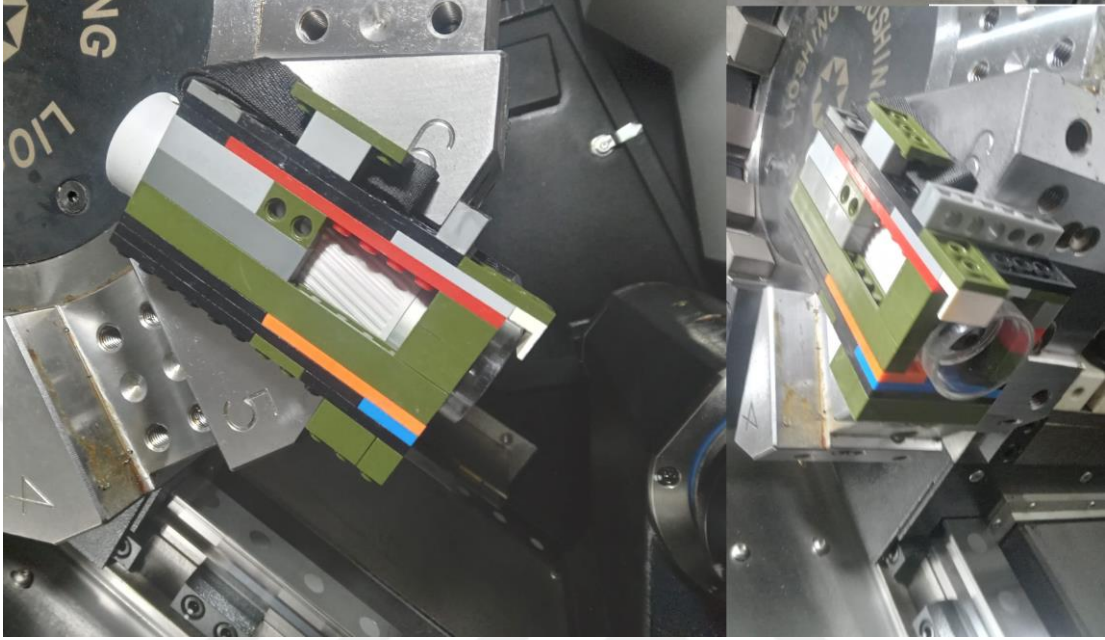


Şekil 11. ImageJ programı ile aşınmanın ölçülmesi

2.3.2. İşlenmiş Yüzeyin Fotoğraflanması

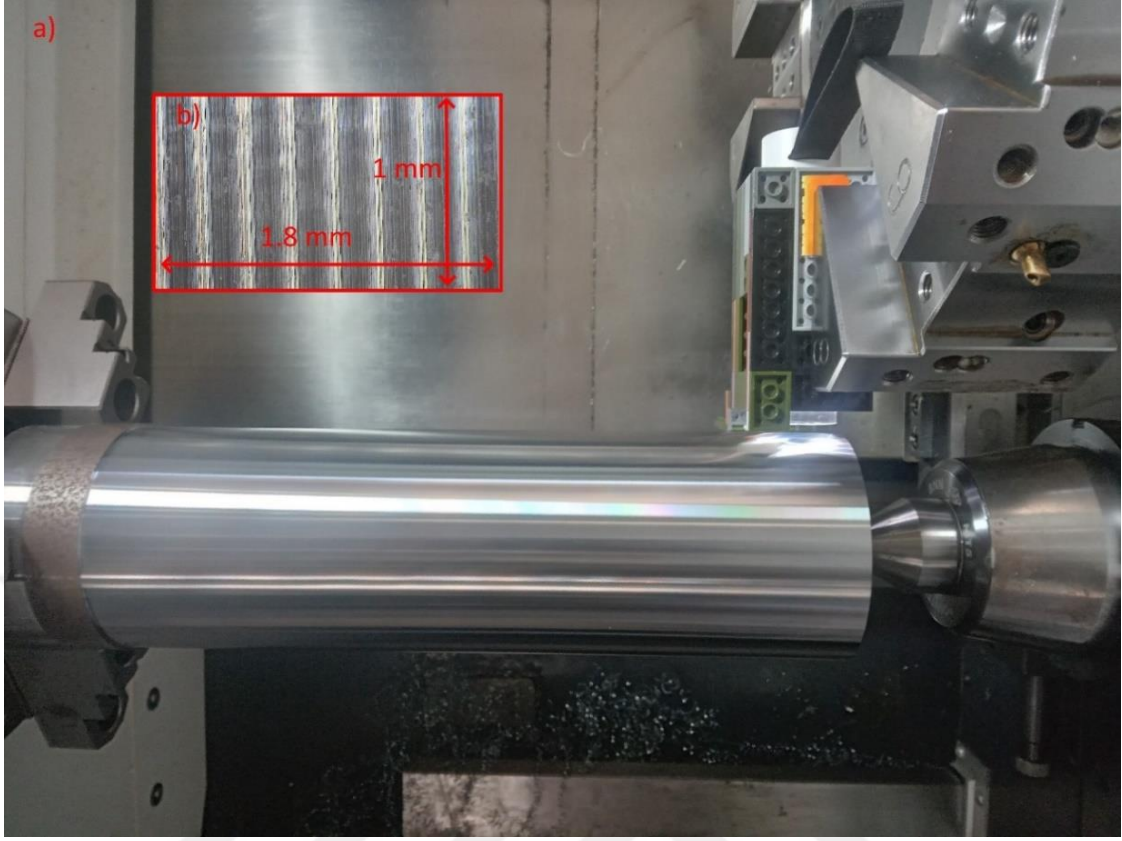
Tez kapsamında, tornalama işlemlerinin her pasosu sonunda daha sonra öznetelik çıkarımı ve analizlerde kullanılmak üzere işlenmiş yüzeylerden video kayıtları ve fotoğraflar alınmıştır. Bu amaçla yine Beaverlab marka M1 model dijital mikroskop kullanılmıştır. Video kayıtlarından elde edilen kareler ve statik görüntüler 1280×720 piksel çözünürlükte kaydedilmiştir. Mikroskop, özel olarak tasarlanan plastik bir fikstür yardımıyla CNC torna taretinde bir istasyona sabitlenmiş ve böylece her deneyde aynı

konumda, tekrarlanabilir şekilde yerleştirilmesi sağlanmıştır. Mikroskobun ve fikstürünün tarete yerleştirilmiş hâli, iki farklı açıdan çekilmiş fotoğraf ile Şekil 12’de gösterilmektedir.



Şekil 12. Mikroskobun ve fikstürünün taret üzerinde yerleşimi

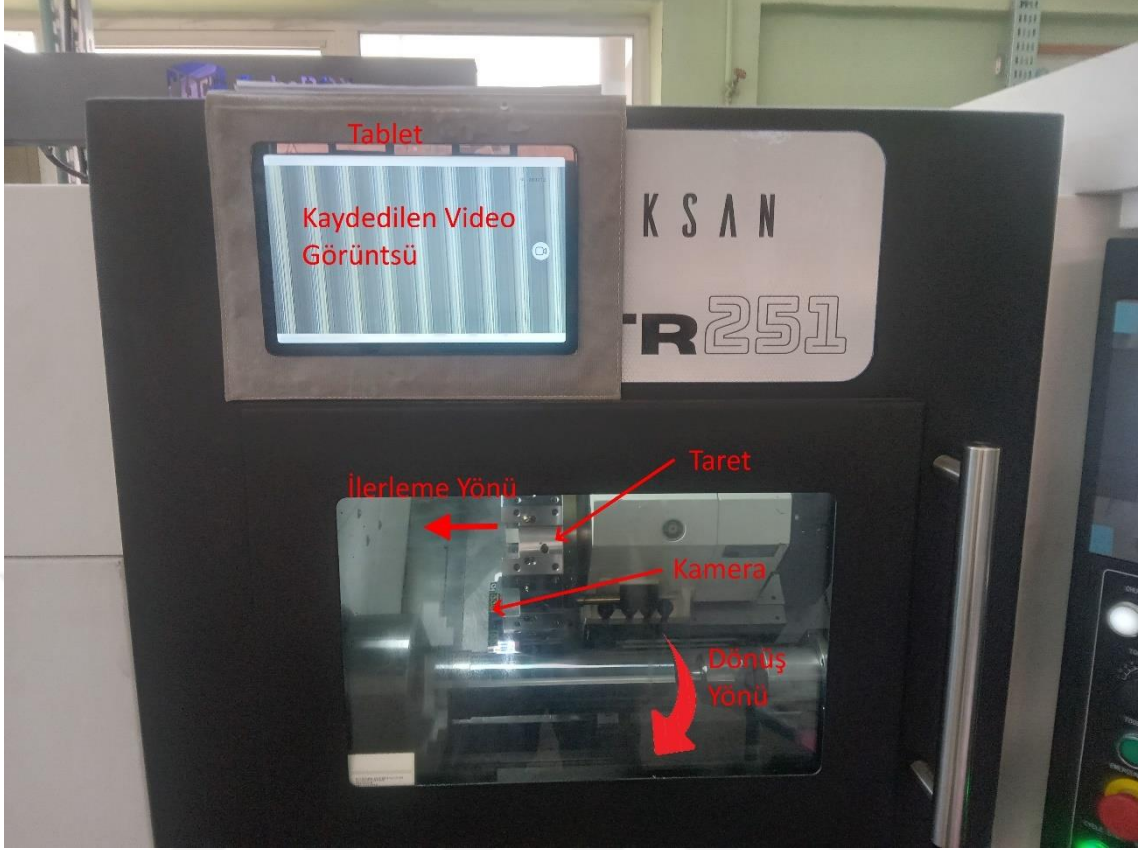
Görüntü alımı sırasında mikroskop, her paso sonrasında iş parçasına maksimum yakınlaştırma ayarında konumlandırılarak $1,8 \text{ mm} \times 1,0 \text{ mm}$ boyutlarında bir alanın gözlemlenmesi sağlanmıştır. Yüzeyin fotoğrafları, iş mili hareketsiz durumda iken çekilmiş ve her seferinde paso ortasına karşılık gelen bir noktadan alınmıştır. Örnek bir yüzey görüntüsü alma prosedürü ve buna ait örnek bir yüzey fotoğrafı Şekil 13’te gösterilmektedir.



Şekil 13. Örnek bir yüzey görüntüsü alma prosedürü (a) ve buna ait örnek bir yüzey fotoğrafı (b)

Yüzeylerden video kayıtları, her paso sonrasında 25 kare/saniye hızında ve 1280×720 piksel çözünürlükte gerçekleştirilmiştir. İlgili pasoda kullanılan kesme parametreleri korunmuş; iş parçası aynı devir sayısında döndürülmüş ve ilerleme oranı da kesme sırasında uygulanan değer ile eşit tutulmuştur. Bu şekilde iş parçasının başından sonuna kadar video kaydı alınması sağlanmıştır. Bir video kayıt süreci, iş parçasının ilerleme ve dönüş yönleriyle birlikte Şekil 14’te gösterilmektedir.

Elde edilen tüm yüzey videoları, her paso için ayrı ayrı kataloglanarak arşivlenmiştir. Böylece hangi görüntünün hangi paso ve parametre kombinasyonuna ait olduğu düzenli biçimde kayıt altına alınmıştır. Bu yapılandırma, sonraki aşamalarda yapılacak olan video işleme ve öznitelik çıkarımı çalışmalarında verilerin kolayca erişilmesini ve karşılaştırılmasını sağlamıştır.



Şekil 14. Bir video kayıt süreci.

2.4. Görüntü İşleme Yöntemleri

Deneyler kapsamında elde edilen yüzey görüntüleri, daha sonra analiz edilerek takım aşınmasını yansıtmaya potansiyeli olan özniteliklerin çıkarımı için çeşitli görüntü işleme yöntemleri ile işlenmiştir. Literatürde tornalama işlemlerinde takım aşınmasının takibine yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle yalnızca işlem sonrasında yüzeyden alınan durağan görüntüler üzerinden araştırmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak mevcut literatürde, tornalama işlemi sırasında elde edilen video kareleri üzerinden yüzey analizi yapıldığına dair bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Oysa tornalama işlemlerinde yüzeyden anlamlı çıkarımlar yapılabilmesi için, yüksek hızla dönen yüzeyin dinamik yapısının dikkate alınması önemlidir. Yüksek hızlı kameralar kullanılarak bu tür bir sistem kurulabilmesi mümkün olsa da, cihazların yüksek maliyetleri bu yaklaşımın uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bu tez çalışmasında ise, görece daha erişilebilir ve düşük maliyetli bir video yakalama cihazı kullanılarak, akan kareler üzerinden takım aşınmasının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım ile, düşük

maliyetli sistemler kullanılarak sanayiye uygulanabilir bir aşınma izleme yöntemi ortaya konulması hedeflenmiştir.

Şu ana kadar literatürde, tormalanmış yüzeylerin statik görüntüleri üzerinde öznitelik çıkarımı yapan araştırmacıların çoğu, farklı alanlarda da yaygın olarak kullanılan genel amaçlı doku analiz yöntemlerine (örneğin GLCM, histogram analizi, dalgacık dönüşümü) yönelmiştir. Ancak bu teknikler, tormalama işlemlerine özgü ilerleme izlerinin dalgalı yapısını doğrudan yansıtmamakta; yüzeyin dalgalılık profilinden bağımsız olarak yalnızca genel yüzey karakteristiği hakkında bilgi sunmaktadır. Tran ve ark.(2023), aşınma ile ilişkilendirilebilecek özniteliklerin doğru seçilmesinin çoklu sensör uygulamalarında kritik öneme sahip olduğunu belirtmiş; Kumar ve ark.(2021) ise takım koşullarının izlenmesinin özniteliklerin aşınmayı yansıtma kapasitesine doğrudan bağlı olduğunu vurgulamıştır. Dolayısıyla, tormalama sırasında oluşan özgün yüzey dokularını dikkate alan yeni özniteliklerin geliştirilmesi, mevcut sistemlerin başarısını daha da artırma potansiyeline sahiptir.

Tormalama işleminin yüksek hızı nedeniyle kamera ile elde edilen yüzey görüntülerinde bulanıklık (blur) oluşmaktadır. Bulanıklık (blur) görüntü işleme operasyonlarında keskin detayların kaybolmasına yol açtığı için çoğu zaman istenmeyen bir durumdur (Zhang vd., 2018). Bu durumda, tormalanmış yüzeyin karakteristik dalgalı profilini esas alan öznitelikler, takım aşınmasının izlenmesinde daha güvenilir ve açıklayıcı bir yaklaşım sunma potansiyeline sahip olabilir. Bu tez kapsamında, yüzey dalgalılık yapısına dayalı üç özgün öznitelik kullanılmıştır. Bunlardan ilki, yüksek lisans çalışmaları sırasında geliştirilen Fourier genlik ortalaması, ikincisi ise bu doktora çalışması kapsamında önerilen Sinüs uyum hatası (Sinüs E_{RMS}) yöntemidir. Sinüs uyum hatası yaklaşımı, literatürde önemli bir problem olan ilerleme izlerinin bölümlenmesi ihtiyacını da ortadan kaldırmakla kalmamış, aynı zamanda bu çalışmada kullanılan üçüncü öznitelik olan Gauss uyum hatasının (Gauss E_{RMS}) da elde edilmesine imkân tanımıştır.

Ayrıca, farklı kesme parametreleri altında gerçekleştirilen ve değişik aşınma karakteristiklerinin gözlemlendiği yüksek lisans verileri üzerinde yapılan analizler sonucunda, geliştirilen özniteliklerin farklı aşınma türlerine karşı farklı tepkiler verdiği ortaya konulmuştur. Söz konusu analizler, yayımlanan çalışmada da (Küllaç ve Çuvalcı,2025) gösterildiği üzere, Gauss uyum hatasının normal aşınma karakteristiklerini daha iyi yansıttığını, buna karşın Sinüs uyum hatasının olağandışı aşınma biçimlerine

(örneğin malzeme akması(side flow), çizik ve oyuk oluşumu(plowing grooves)) karşı daha yüksek duyarlılık sergilediğini göstermektedir.

Bunlara ek olarak, literatürde yaygın biçimde kullanılan Gri Seviye Eş-Oluşum Matrisi (GLCM) tabanlı öznitelikler — entropi, homojenlik ve kontrast — de çalışmada kullanılmış ve önerilen özniteliklerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir

Bu tez kapsamında, literatürde yaygın olarak kullanılan paket programların sınırlılıkları nedeniyle özgün özniteliklerin geliştirilebilmesi için C++ dili tercih edilmiştir. Görüntü işleme adımlarında, yaygın olarak kullanılan OpenCV kütüphanesi (v4.5.4) temel araç olarak kullanılmış ve yüzey görüntülerinden öznitelik çıkarımı için gerekli algoritmalar bu ortamda geliştirilmiştir.

C++ ortamında geliştirilen kodlar daha sonra doğrulama ve çapraz kontrol amacıyla Python diline aktarılmıştır. Python'un sunduğu esnek analiz imkânları sayesinde, farklı yöntemlerin sonuçlarının karşılaştırılması kolaylaştırılmıştır. Ayrıca, veri yönetiminde pratiklik sağlamak ve bulut tabanlı analiz yapabilmek amacıyla Google Colab ortamına geçilmiş, deneysel veriler ise Google Drive üzerinde organize edilerek analiz süreci yürütülmüştür.

Python tarafında özellikle NumPy (sayısal hesaplamalar), Pandas (veri yönetimi), Matplotlib ve Seaborn (görselleştirme), SciPy (istatistiksel hesaplamalar) ve scikit-learn (makine öğrenmesi yöntemleri) kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Bu kütüphaneler, öznitelik çıkarımı sonrası verilerin düzenlenmesi, istatistiksel testlerin yapılması ve sınıflandırma algoritmalarının uygulanmasında önemli rol oynamıştır. Gri Seviye Eş-Oluşum Matrisi (GLCM) tabanlı özniteliklerin (entropi, homojenlik ve kontrast) çıkarımı ise yalnızca Python ortamında gerçekleştirilmiş olup, ilgili hesaplamalar için scikit-image kütüphanesinden yararlanılmıştır.

Çalışmanın her adımında hata ayıklama (debug) işlemleri dikkatle yürütülmüş; geliştirilen matematiksel prosedürler görselleştirilerek ara çıktılar üzerinden kontrol edilmiş ve algoritmaların doğruluğu teyit edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, özniteliklerin güvenilir biçimde elde edilmesi, sonuçların tutarlılığının sağlanması ve makine öğrenmesi algoritmalarına uygun sağlam bir veri seti oluşturulması mümkün olmuştur.

Bu çalışma kapsamında, video karelerinden çıkarılan öznitelikler kullanılarak makine öğrenmesi yardımıyla takım aşınmasının izlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, her paso sonrasında kaydedilen videolardan yalnızca orta bölgeden seçilen 1 saniyelik (25 kare) kayıt dikkate alınmış, her bir kare için öznitelik çıkarımı yapılmış ve elde edilen değerlerin

ortalaması kullanılmıştır. Bu yaklaşım, tekil karelerde oluşabilecek anlık titreşim, aydınlatma farklılığı veya görüntü bulanıklığı gibi hataların etkisini azaltmak ve daha kararlı, temsil gücü yüksek bir öznitelik değeri elde etmek amacıyla tercih edilmiştir.

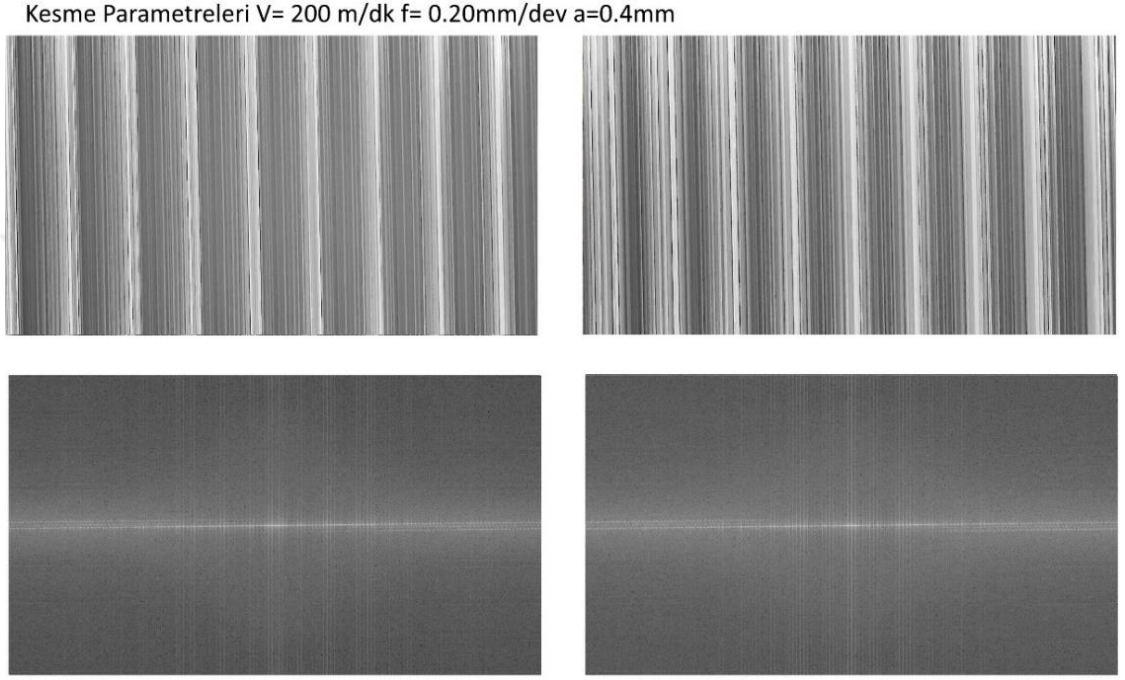
Ayrıca aynı bölgeden alınan durağan yüzey fotoğrafları üzerinde de öznitelik çıkarımı yapılmış, böylece fotoğraf tabanlı analizler ile video tabanlı analizler karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Bu iki yöntemden elde edilen sonuçlar, tez kapsamında Bulgular ve Tartışma bölümünde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Öznitelik çıkarım sürecinde, yüzey görüntülerinden yalnızca ham piksel bilgisi veya basit istatistikler (örneğin ortalama parlaklık ya da histogram değerleri) elde etmek yerine, bu görüntülere matematiksel işlemler uygulanarak takım aşınmasını yansıtan daha karmaşık ve açıklayıcı göstergeler üretilmiştir. Bu göstergeler, aşınmanın ilerlemesini daha hassas biçimde takip edebilmek ve makine öğrenmesi algoritmalarına anlamlı giriş verileri sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu tez kapsamında, yüzeyin dalgalılık profilini temel alan üç özgün öznitelik üzerinde yoğunlaşmıştır: Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası (Sinüs E_{RMS}) ve Gauss uyum hatası (Gauss E_{RMS}). Ayrıca, literatürde yaygın olarak kullanılan Gri Seviye Eş-Oluşum Matrisi (GLCM) tabanlı öznitelikler — entropi, homojenlik ve kontrast — da çalışmaya dahil edilerek özgün özniteliklerle karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır. İlerleyen alt bölümlerde, her bir özniteliğin temel mantığı, hesaplama yöntemi, kullanılan formüller ve elde edilen örnek çıktılar detaylı olarak sunulmaktadır.

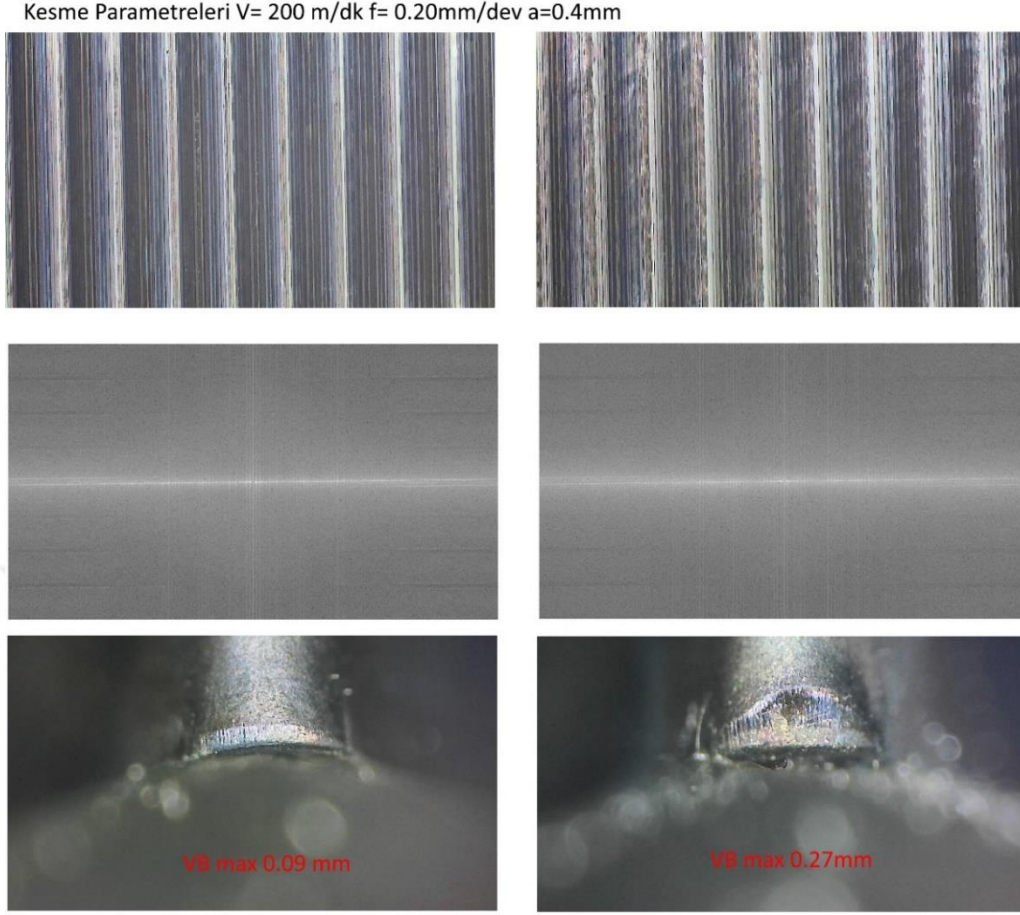
2.4.1. FFT ile Öznitelik Çıkarımı

Whitehouse (1978), işlenmiş yüzeylerin 1-boyutlu pürüzlülük profillerinin frekans alanında, takım aşınmasının ilerlemesiyle birlikte belirgin farklılıklar ortaya çıktığını ve aşınma izlerinin temiz takım izleri üzerinde frekans bileşenlerine yansıdığını göstermiştir. Hoy ve Yu(1991) ise, aşınmanın ilerlemesine bağlı olarak işlenmiş yüzeylerin 2-boyutlu görüntülerinde, genlik spektrumlarındaki dağınıklık farklılıklarının da belirginleştiğini ortaya koymuştur. Peng ve ark.(2015), hızlı Fourier dönüşümü (FFT) görüntülerinin belirli eksenlerindeki değişimleri fraktal analizle inceleyerek yan yüzey aşınması ile ilişkilendirmiş ve özellikle x-ekseni boyunca elde edilen yanıtların diğer eksenlere kıyasla daha tutarlı olduğunu rapor etmiştir. Bununla birlikte, genlik spektrumunun bütünsel olarak değerlendirilmesi, tekil eksenlerden elde edilen bilgilere göre daha fazla içerik

sunabilmektedir. Şekil 15'te farklı aşınma seviyelerinde edinilmiş video kareleri ve bunlara karşılık gelen Fourier genlik spektrumları verilmiştir. Şekil 16'da aynı konumdan alınan yüzey görüntüleri, bunlara karşılık gelen Fourier genlik spektrumları ve ilgili takım fotoğrafları sunulmuştur. Her iki durumda da, aşınmanın ilerlemesiyle birlikte genlik spektrumlarında meydana gelen değişimler açıkça görülebilmektedir.



Şekil 15. Farklı aşınma seviyelerinde edinilmiş video kareleri ve bunlara karşılık gelen Fourier genlik spektrumları



Şekil 16. Farklı aşınma seviyelerinde edinilmiş yüzey görüntüleri, bunlara karşılık gelen Fourier genlik spektrumları ve ilgili takım aşınması fotoğrafları.

FFT genlik spektrumlarının ortalama değerlerinin çıkarılması öncelikle üç kanallı (RGB) yüzey görüntülerinin, OpenCV fonksiyonları kullanılarak gri skala formata dönüştürülmesi ile başlamış ve pikseller 0–255 aralığına indirgenmiştir. Daha sonra bu gri tonlamalı görüntülere OpenCV kütüphanesinin Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) fonksiyonu uygulanmış ve dönüşüm sonucu karmaşık sayı dizisi elde edilmiştir. Bu diziler, gerçel ve karmaşık bileşenler olmak üzere iki ayrı dizi şeklinde saklanmıştır. Ardından, OpenCV'nin “magnitude” fonksiyonu kullanılarak genlik spektrumları hesaplanmış ve öznitelik çıkarımı için kaydedilmiştir. Frekans bileşenlerindeki değişimlerin etkisini yansıtabilmek amacıyla, her bir ön-işlenmiş görüntüye ait genlik spektrumlarının aritmetik ortalaması alınarak öznitelik olarak değerlendirilmiştir. Hesaplama aşağıdaki denklem ile yapılmıştır:

$$F_{ortalama} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N g[i, j] \quad (1)$$

Denklemlerde;

$F_{ortalama}$ – Genlik değerlerinin aritmetik ortalaması.

M – Genlik matrisinin satır sayısı.

N – Genlik matrisinin sütun sayısı.

$g(i,j)$ – Genlik matrisi.

Bu işlem, video kareleri için her paso ortasından kesilen 1 saniyelik kayıt (25 kare) üzerinde uygulanmış, her kareden elde edilen değerler hesaplanarak ortalama öznelik değeri oluşturulmuştur. Fotoğraflar içinse, aynı bölgeden alınan statik yüzey görüntüleri üzerinden aynı işlem gerçekleştirilmiştir.

Fourier dönüşümüne dayalı yaklaşım, yalnızca yüzey dalgalılık yapısının incelenmesine imkân vermekle kalmamakta, aynı zamanda gürültü etkileri (Liu ve Jernigan,1990) ve aydınlatma farklılıkları (Bradley ve Wong,2001) gibi faktörlere karşı da avantaj sağlamaktadır. Bu nedenlerle, Fourier genlik ortalaması özneliği takım aşınmasının izlenmesinde güvenilir bir araç olarak öne çıkmaktadır. Ancak, yüzey dalgalılık yapısını daha ayrıntılı olarak modelleyebilmek için farklı matematiksel yaklaşımların da değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda bir sonraki bölümde, Sinüs uyum hatası özneliği ele alınacaktır.

2.4.2. Sinüs-Dalga Uydurma Algoritması ile Öznelik Çıkarımı

Tornalanmış yüzey görüntülerinin karakteristik özelliklerinden biri, ilerleme izleri nedeniyle ortaya çıkan ardışık dalgalı yapıdır. Bu yapı, yüzey görüntülerinin sütun projeksiyonları üzerinde de açıkça görülebilmektedir. Sütun projeksiyonu tekniği, iki boyutlu bir görüntünün yatay piksel değerlerinin ortalamalarının alınmasıyla görüntünün tek boyutlu bir sinyale indirgenmesi esasına dayanır ve aşınma takibine yönelik öznelik çıkarımı amacıyla ilk kez Kassim ve ark. (2000) tarafından kullanılmıştır.

Şekil 17’de, az aşınmış ve aşınmış takım ile işlenmiş yüzeylerden elde edilen iki gri tonlamalı video karesinin sütun projeksiyonları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Görüntülerden de anlaşılacağı üzere, ilerleyen aşınma ile birlikte belirli bozulmalar

meydana gelse dahi, ilerleme izlerine bağı periyodik yapı hem yüzey görüntüsünde hem de sütun projeksiyonunda görülebilmektedir. Sütun projeksiyonunun gürültülü ayırık bir sinyal olarak kabul edilmesi ve üzerine yinelenen en küçük kareler tabanlı bir sinüs uyum algoritması uygulanmasıyla, yüzeylerdeki ilerleme izlerinin konumları güvenilir biçimde tespit edilebilmektedir.

Sütun projeksiyonlarına sinüs dalgası uydurma işlemi, IEEE Standard 1241-2010 kapsamında tanımlanmış standart Sinüs-Dalga Uydurma Algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu algoritma, frekans değeri bilinen ayırık bir fonksiyon için, veri noktaları ile uydurulan sinüs fonksiyonu arasındaki farkların karelerinin toplamını en aza indirmeyi hedeflemektedir (Denklem 2).

$$\sum_{i=0}^M [y_n - y_{n'}]^2 \quad (2)$$

$$y_{n'} = A_0 \cos(\omega_0 t_n) + B_0 \sin(\omega_0 t_n) + C_0$$

Denklem 2’de;

M – İmgedeki stun sayısı,

y_n – Stun projeksiyonu dizisi,

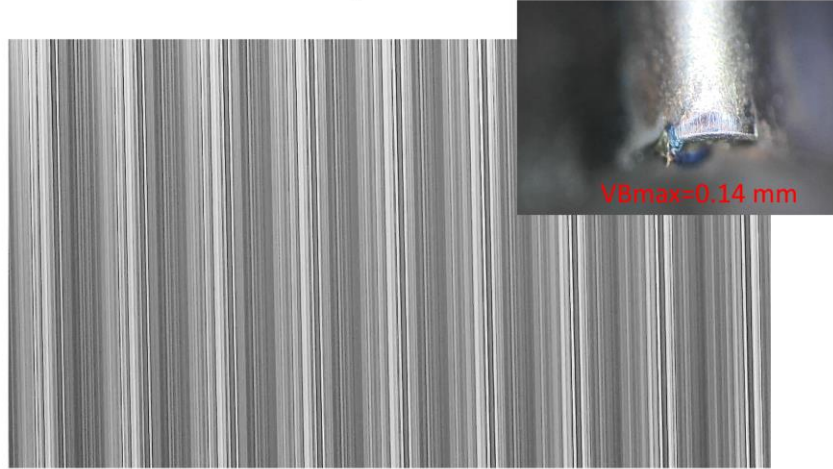
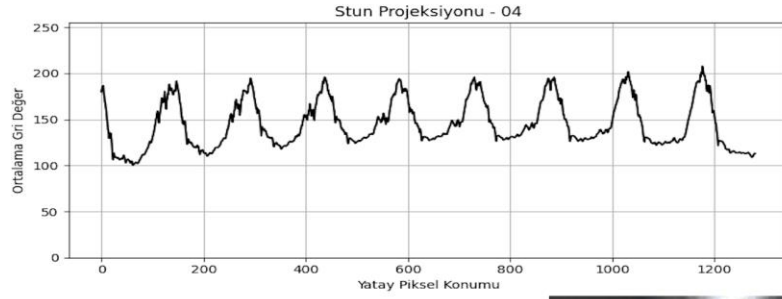
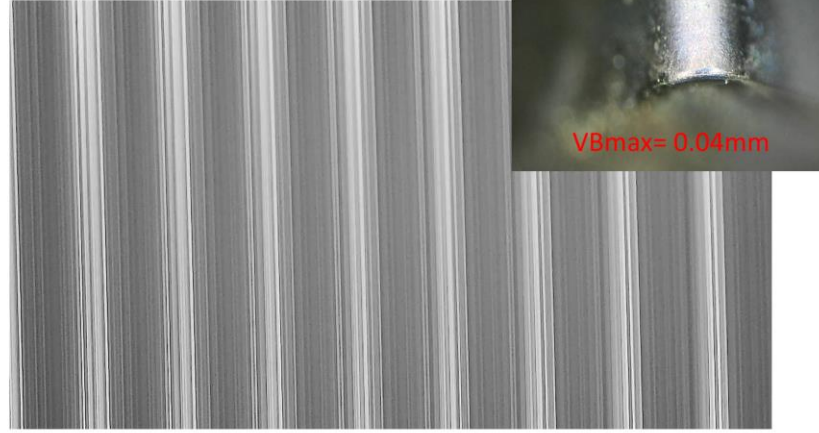
$y_{n'}$ – Stun projeksiyonu dizisi,

ω_0 – Açısal frekans ve

t_n – İmgenin stun numaraları

Kesme Parametreleri

$V=180$ m/dk. $f=0.20$ mm/dev. $a=0.3$ mm



Şekil 17. Az aşınmış ve aşınmış takım ile işlenmiş yüzeylerden elde edilen iki gri tonlamalı video karesinin sütun projeksiyonları karşılaştırılması.

Algoritma, en küçük kareler yöntemini kullanarak A_0 , B_0 , ve C_0 katsayılarını belirlemekte, böylece ölçülen veriler ile sinüs fonksiyonu arasındaki farkları en aza indirmektedir. Bu katsayılar elde edildikten sonra, fonksiyon Denklem (3)'te ki faz-genlik formuna dönüştürülmektedir.

$$y_{n'} = A \cos(\omega_0 t_n + \theta) + C \quad (3)$$

Denklem 3'te;

A – Genlik değeri,

Θ – Faz değeri ve

C -Dikey kayma

Yukarıda belirtildiği üzere, söz konusu algoritma frekansı bilinen ayrık fonksiyonlarda doğrudan uygulanabilmektedir. Ancak, standartta da ifade edildiği gibi, frekansı bilinmeyen ayrık fonksiyonlarda frekans değeri farklı aralıklarda denenerek (iterasyon) en uygun dalga fonksiyonu elde edilebilmektedir. Tornalama işlemlerinde ilerleme izlerinin frekansı, genellikle dikey çözünürlük, ilerleme mesafesi ve görüntünün gerçek yatay uzunluğu kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu tür bilgiler mevcut olmadığında ise, iteratif yaklaşım ile optimum frekans belirlenebilir.

Bu tez çalışmasında, 1 ile yatay çözünürlük değeri olan 1280 arasında yer alan frekanslar için iterasyon yapılmış ve beklenen frekans değerleri ile hesaplanan sonuçlar arasında herhangi bir tutarsızlık görülmemiştir. Bununla birlikte, yöntemin aşırı aşınma durumlarında zaman zaman yanıltıcı frekans değerleri üretebileceği göz ardı edilmemelidir. Nitekim, farklı parametreler altında gerçekleştirilen yüksek lisans çalışmasından elde edilen yüzey görüntüleri üzerinde yapılan analizlerde, yalnızca bir örnekte de olsa, aşırı aşınma nedeniyle tam bir iterasyon sonucunda beklenenden farklı bir değer elde edilmiştir (Şekil 18). Bu sorun, beklenen frekansın yaklaşık %20 altında ve üstünde ek iterasyon uygulanarak giderilmiştir.

Sinüs uydurma işlemi sonrasında, yüzeyin dalgalılık bilgisi elde edilebilmekte ve ilerleme izleri görüntüden ayrıştırılarak farklı analizlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca, elde edilen sinyal üzerinde tepe ve çukur bölgelerinin ayrı ayrı incelenmesi sayesinde, aşınmanın etkilerine dair daha ayrıntılı gözlemler

yapılabilmektedir. Literatüre kazandırılan bu uygulama, tornalanmış yüzeylerin çok daha detaylı ve kapsamlı biçimde analiz edilmesinin önünü açmıştır.

İşlem sırasında, veri profili (sütun projeksiyonu) ile uyum sağlanan sinüs fonksiyonu arasındaki farkı nicel olarak değerlendirmek için kök ortalama kare (RMS) hatası hesaplanmıştır. Bu hata değeri, elde edilen uyumun doğruluğunu göstermekle birlikte, takım aşınmasının izlenmesinde kullanılacak öznelitliklerden biri olarak değerlendirilmiştir. Hesaplama yöntemi Denklem (4)'te verilmiştir.

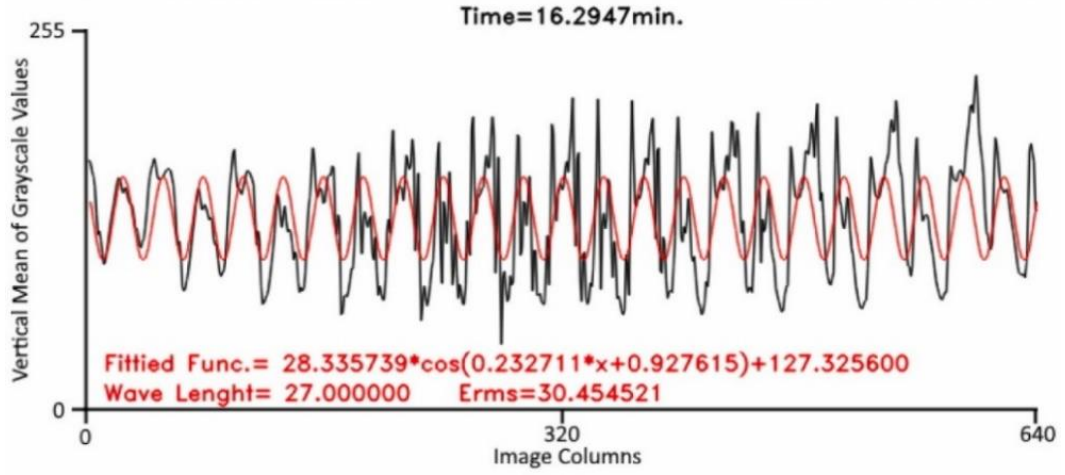
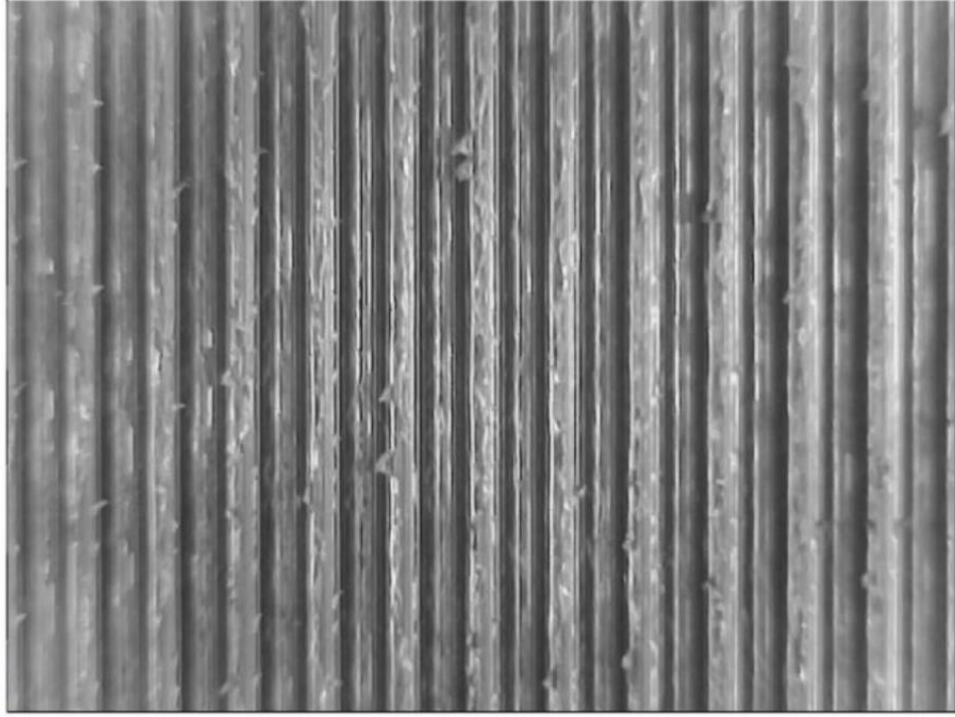
İşlem sırasında minimize edilen hata fonksiyonu Denklem (4)'te verilmiştir.

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_n^2} \quad (4)$$

$$r_n = y_n - y_n'$$

Bu hatanın minimuma indiği durum, veri profili ile sinüs fonksiyonu arasındaki en iyi uyumu göstermekte olup, aynı zamanda ilerleyen aşınma için bir gözlem metriği olma potansiyeline sahiptir. Şekil 19'da, az aşınmış ve çok aşınmış iki farklı duruma ait video kareleri, ilgili aşınma fotoğrafları, sütun projeksiyonları, en iyi uyum sağlayan sinüs fonksiyonları ve bu fonksiyonlardan elde edilen değerler sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği üzere, yüzeyin bozulmasına bağlı olarak sütun projeksiyonundaki düzen de bozulmakta ve buna paralel olarak E_{RMS} hata değerinde artış meydana gelmektedir. Dolayısıyla, E_{RMS} hata değeri sinüs uyum yönteminin aşınma takibinde etkin bir öznelitlik olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

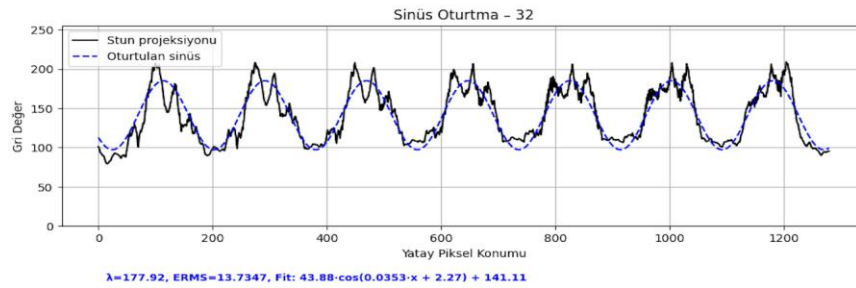
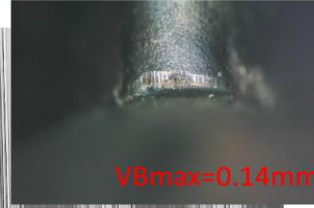
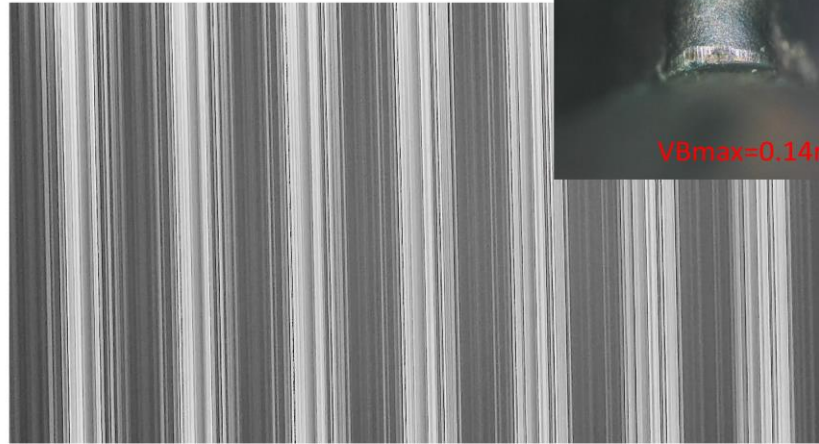
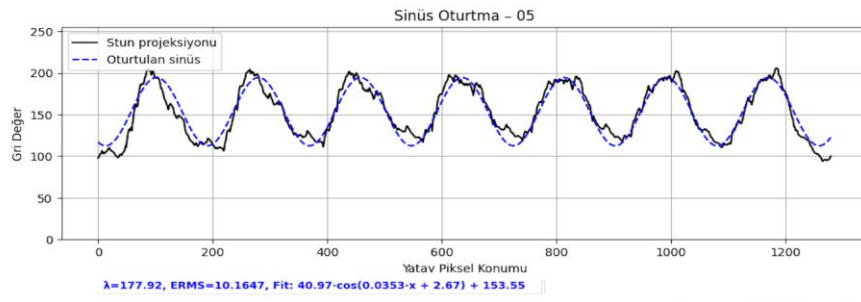
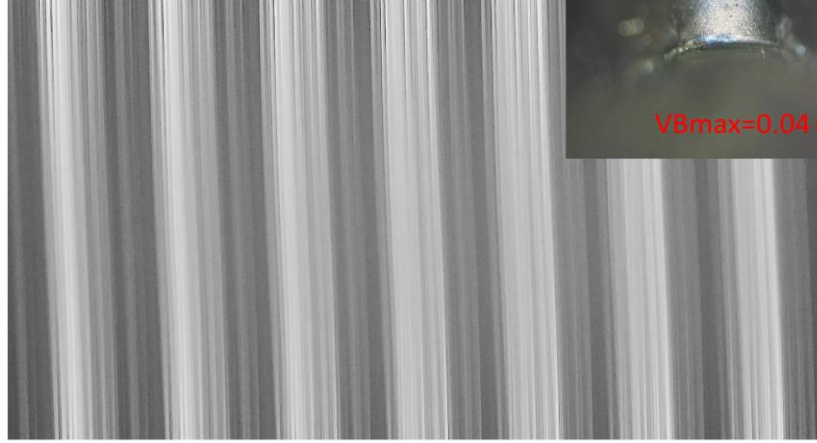
Cutting Parameters: $V=260$ m/min $f=0.20$ mm/rev $a=1$ mm
Corresponding Flank Wear (V_{bmax}) ≈ 0.36 mm



Şekil 18. Aşınmanın yineleme süreci üzerindeki yanıltıcı etkisi. Yineleme süreci, sürece bir aralık uygulanarak iyileştirilebilir.(Külleç ve Çuvalcı,2023)

Kesme parametreleri

$V=220$ m/dk. $f=0.24$ mm/rev $a=0.4$ mm

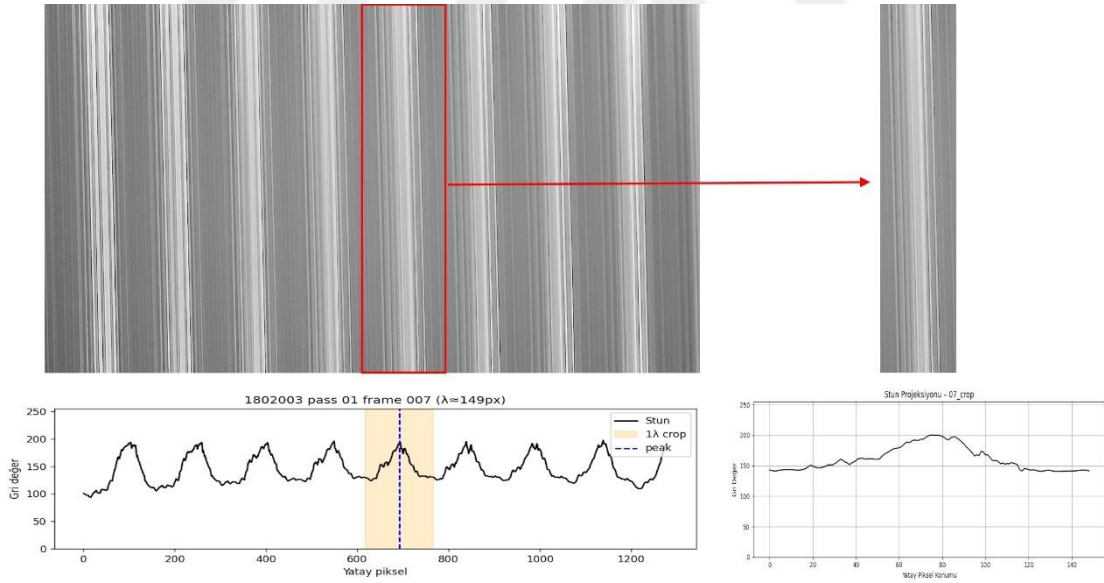


Şekil 19. İki farklı aşınma duruma ait video kareleri, aşınma fotoğrafları, sütun projeksiyonları, en iyi uyum sağlayan sinüs fonksiyonları ve değerleri.

2.4.3. Gauss Fonksiyonu İtarasyonu ile Öznitelik Çıkarımı

Tornalanmış yüzey profilleri her ne kadar dalgalı bir yapıya sahip olsa da, uç yarıçapı ve ilerleme oranına bağlı olarak bu profiller her zaman tam bir harmonik fonksiyon şeklinde oluşmamaktadır. Özellikle uç yarıçapının ilerleme oranına göre büyük olduğu durumlarda, tepe ve çukur arasındaki mesafe artmakta ve bu durum dalgalılığın tam olarak sinüs fonksiyonu ile temsil edilmesini zorlaştırmaktadır. Böyle durumlarda, sinüs fonksiyonunun yakalayamadığı farklı bozulmaların daha doğru modellenebilmesi için, sinüs uyumu sayesinde ayrıştırılabilen tekil ilerleme izlerine Gauss fonksiyonu uygulanarak ek bir analiz imkânı elde edilebilmektedir.

Bu tez kapsamında, hem video kareleri hem de statik yüzey fotoğrafları sinüs uyum algoritması ile analiz edilmiş, belirlenen orta noktadaki tepeler üzerinden ilgili ilerleme izleri bir dalga boyu olacak şekilde kırpılmış ve bu kırpılmış görüntülerin sütun projeksiyonları çıkarılmıştır. Bu işlem adımları Şekil 20’de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 20. Bir ilerleme izlerinin bir dalga boyu olacak şekilde kırpılması ve bu kırpılmış görüntünün sütun projeksiyonu.

Bu çalışmada, tekil ilerleme izlerinin sütun projeksiyonlarına Gauss fonksiyonunun oturtulması, ilgili literatürde (Küllaç & Çuvalcı, 2025) önerilen yöntem doğrultusunda gradyan azaltma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, her bir sütun projeksiyonuna

Gauss fonksiyonu uygulanmış ve fonksiyonun matematiksel ifadesi Denklem (5)'te verilmiştir.

$$f(x) = a * \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right) + d \quad (5)$$

Denklem 5'te;

a -Genlik , tepe yüksekliğini ifade eder,

b – Ortalama , eğrinin merkez konumunu gösterir,

c - Standart sapma, eğrinin genişliğini belirler ve

d -Dikey ofset, temel seviyedeki kaymayı dikkate alır.

Gauss fonksiyonunun uyum başarımını değerlendirmek için kök ortalama kare (RMS) hatası hesaplanmıştır (Denklem 6). Bu hata, veri noktalarının uydurulan Gauss eğrisinden olan ortalama sapmasını nicel olarak ifade etmektedir.

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - f(x_i))^2} \quad (6)$$

Denklem 6'da;

y_i – Girdi verileri (stun projeksiyonu),

$f(x_i)$ – Gauss fonksiyonundan tahmin edilen değerler ve

n- Toplam veri sayısı.

Gradyan azaltma yönteminin uygulanmasına geçilmeden önce, Gauss fonksiyonu belirli başlangıç parametreleri ile tanımlanmış (Denklem 7) ve optimizasyon süreci bu değerler üzerinden başlatılmıştır. Bu başlangıç değerleri, algoritmanın daha hızlı yakınsaması için makul bir referans noktası sağlamaktadır.

$$\begin{aligned} a &= \max(y) - \min(y) \\ b &= \frac{n}{2} \\ c &= \frac{n}{6} \\ d &= \min(y) \end{aligned} \quad (7)$$

Parametrelerin optimize edilmesi amacıyla, her bir parametre için sayısal gradyanlar hesaplanmıştır. Bir parametre θ_j için gradyan değeri aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$Gradyan(j) = \frac{hata(\theta_j + \epsilon) - hata(\theta_j - \epsilon)}{2\epsilon} \quad (8)$$

Denklem 8’de;

θ_j – Optimize edilecek parametre (a,b,c,d) ve

$\epsilon = 10^{-4}$ – Küçültme adımı.

Hesaplanan gradyanlar kullanılarak, parametre değerleri gradyan azaltma yöntemi ile ardışık olarak güncellenmiştir. Bu iteratif süreç, parametrelerin en uygun değerlere yakınsamasını sağlamaktadır. Güncelleme işlemi genel olarak aşağıdaki biçimde ifade edilmektedir:

$$\theta_j \leftarrow \theta_j - \alpha * Gradyan(j) \quad (9)$$

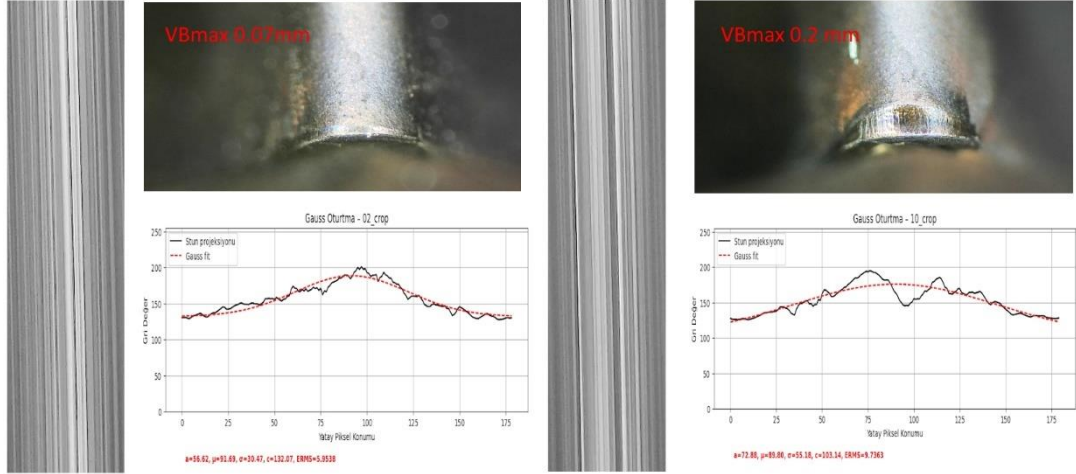
Denklem 9’da;

$\alpha = 0.01$ Parametre güncellemesi sırasında adımı ayarlayan öğrenme oranı

Optimizasyon döngüsü, ardışık iterasyonlar arasındaki RMS hata farkının 10^{-4} değerinden küçük olması ya da maksimum iterasyon sayısı olan 100’e ulaşılması durumunda sonlandırılmıştır. Belirlenen bu yakınsama ölçütleri, hem hesaplama verimliliğini hem de uyum doğruluğunu güvence altına almaktadır.

Şekil 21’de, video karelerinden kırılmış az aşınmış ve çok aşınmış iki farklı ilerleme izi, bunlara karşılık gelen aşınma fotoğrafları, sütun projeksiyonları, oturtulan Gauss fonksiyonları ve elde edilen Gauss parametreleri gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, artan aşınma ile sütun projeksiyonlarındaki bozulmalar daha belirgin hale gelmekte ve bu durum, Gauss fonksiyonuna ait E_{RMS} hata değerinde artışa yol açmaktadır. Bu bulgu, söz konusu hatanın aşınma takibinde kullanılabilecek güvenilir bir metrik olabileceğini ortaya koymaktadır.

Kesme Parametreleri V=180 m/dk. f= 0.24 mm/dev. a= 0.5mm



Şekil 21. Video karelerinden kırılmış az aşınmış ve çok aşınmış iki farklı ilerlemeizi, bunlara karşılık gelen aşınma fotoğrafları, sütun projeksiyonları, oturtulan Gauss fonksiyonları ve elde edilen Gauss parametreleri

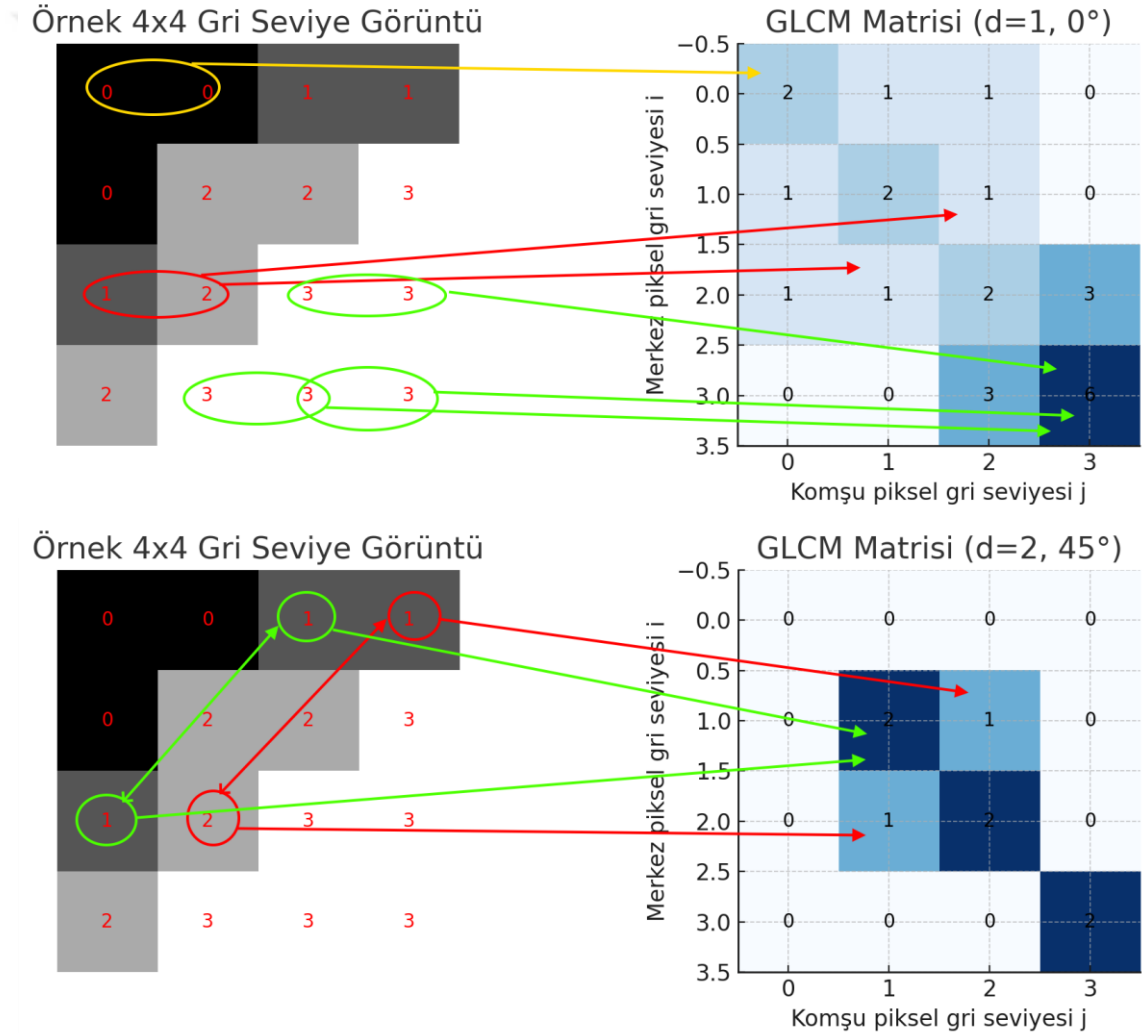
2.4.4. Gri Seviye Eş Dönüşüm Matrisi ile Öznitelik Çıkarımı

Gri Seviye Eş-Oluşum Matrisi (GLCM), bir görüntüdeki piksellerin belirli bir yön ve mesafedeki komşuluk ilişkilerini istatistiksel olarak ifade eden yöntemlerden biridir. İlk olarak Haralick ve arkadaşları (1973) tarafından tanımlanan bu yaklaşım, görüntüdeki dokusal bilgilerin sayısallaştırılmasına imkân vermektedir.

Gri Seviye Eş-Oluşum Matrisi (GLCM), bir görüntüdeki dokunun nasıl örgülendiğini, seçilen bir yön ve piksel aralığı boyunca yan yana gelen gri seviye piksel çiftlerini sayarak betimler. İşleyiş şöyle özetlenir; görüntüdeki her piksel için, belirtilen yönde ve uzaklıktaki komşusuna bakılır; merkez pikselin gri seviyesi ile komşusunun gri seviyesi bir çift olarak kaydedilir ve tüm görüntü boyunca bu çiftlerin kaç kez birlikte görüldüğü sayılır. Ortaya çıkan sayım tablosu (GLCM), i ve j gri seviyelerinin birlikte görünme düzenini gösterir. Bazı durumlarda, yön terslendiğinde aynı olay hem (i,j) hem de (j,i) olarak görülebildiğinden GLCM simetrik kabul edilip bu iki giriş birleştirilebilir; ancak bu simetrikleştirme isteğe bağlıdır—yön bilgisini korumak istendiğinde (i,j) ve (j,i) ayrı tutulur. Daha sonra bu tablodan (GLCM) kontrast, homojenlik, enerji/entropi, korelasyon gibi standart doku öznitelikleri türetilir.

Şekil 22’de GLCM’nin oluşturulma sürecinin örnek gösterimi sunulmuştur. Üst sırada, $d = 1$ ve 0° yönünde (sağa-sola komşuluk) 4×4 gri seviye yama yer almaktadır;

soldaki yamada işaretlenen her piksel-komşu çifti (i,j) sağdaki GLCM'de ilgili hücrede sayılmış, simetrik matris kullanıldığı için karşılık gelen (j,i) hücresi de artırılmıştır. Alt sırada, $d = 2$ ve 45° yönünde (sağ-üst/sol-alt komşuluk) aynı prosedür uygulanmıştır. GLCM'de satırlar merkez pikselin gri seviyesi i 'yi, sütunlar komşu pikselin gri seviyesi j 'yi göstermektedir; hücre ton yoğunluğu/üstündeki değerler, ilgili eş-oluşumların ham frekanslarını ifade eder. Bu sayımlar normalize edilerek $P(i,j)$ elde edilir ve buradan kontrast, homojenlik ve entropi gibi öznitelikler hesaplanır, Haralick ve arkadaşları (1973) bu şekilde 14 öznitelik tanımlamışlardır. Bu tezde yön bağımlılığını azaltmak amacıyla simetrik GLCM tercih edilmiş; böylece sağ-sol farkı ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 22. GLCM'nin oluşturulması

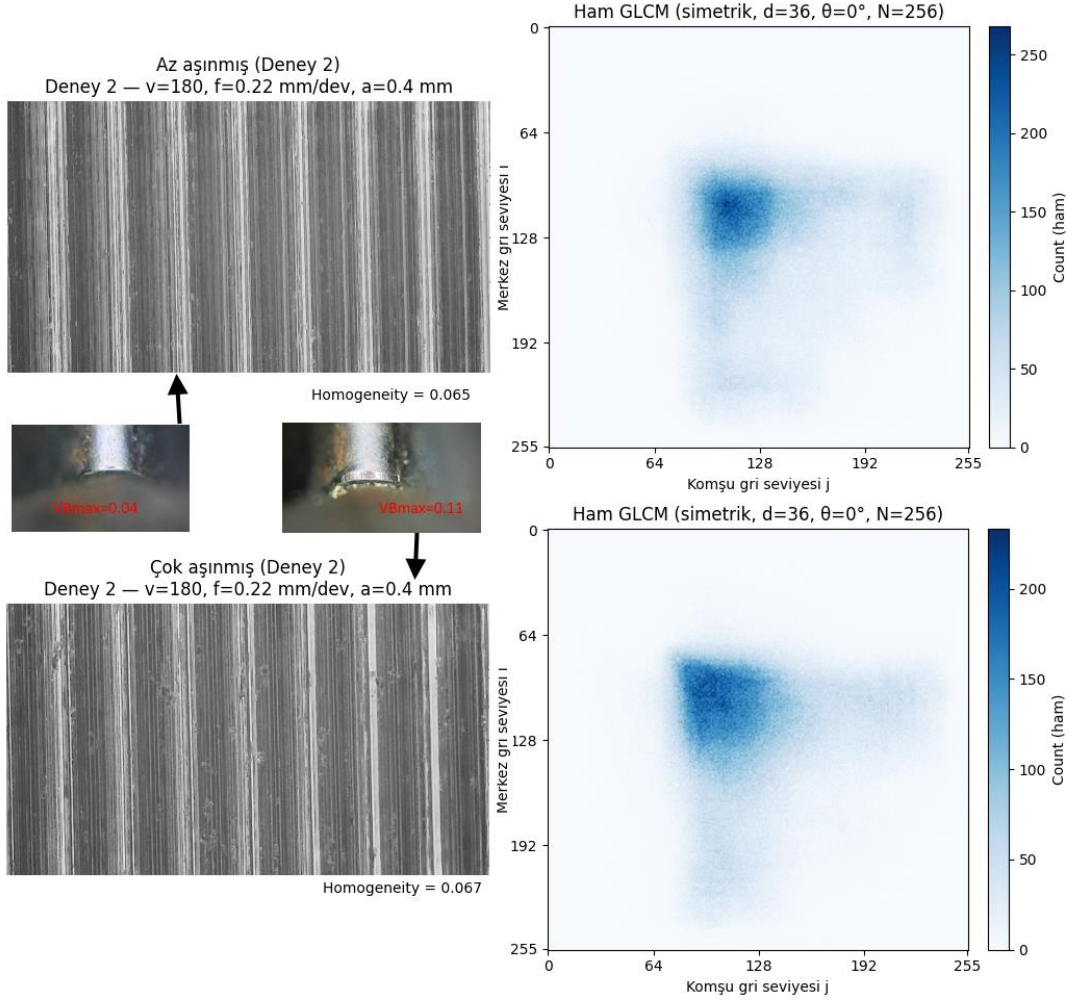
Bu tezde GLCM hesaplarında simetrik matris kullanılmış ve frekanslar normalize edilerek $P(i,j)$ elde edilmiştir. Mesafe (d) seçimi, sinüs uyum analizinden (Sin Fit) türetilen ilerleme dalga boyuna dayandırılmış; $f=0,24$ mm/dev. ilerlemeye sahip görüntüler için görüntüdeki maksimum dalga boyunu temsil eden $d=180$ piksele kadar bir aralık taranmıştır (1–180 piksel). İlerleme izleri görüntü koordinat sisteminde yatay olduğu için yalnızca yatay yön (0^0) değerlendirilmiştir. Her deney ve her mesafe için, öznelik–aşınma/zaman ilişkileri üzerinde kurulan modellerin düzeltilmiş R^2 değerlerinin ortalaması hesaplanmış; en yüksek düzeltilmiş R^2 değerini sağlayan d değerleri sonuçlarda kullanılmıştır. Aynı prosedür, video kareleri ve fotoğraf görüntüleri için aynen uygulanmıştır.

Bu tez çalışmasında, literatürde GLCM tabanlı doku analizi için sıklıkla kullanılan üç öznelik—entropi, homojenlik ve kontrast—hesaplanmış ve değerlendirilmiştir (Denklem 10–12). Entropi, normalleştirilmiş GLCM olasılık dağılımındaki düzensizliği/bilgi içeriğini ölçer; değerlerin matrise daha yaygın dağılması (ör. izlerin bozulması, çizik/oyuk, yan akma) entropinin artmasına karşılık geldiğinden, aşınma ilerlemesini duyarlı biçimde yansıtan uygun bir adaydır. Homojenlik, komşu gri seviyeleri arasındaki küçük farkları daha yüksek ağırlıkla değerlendirir; düzenli ve yönlü izlerin baskın olduğu az aşınmış yüzeylerde yüksek, düzensizlik ve pürüzlülük arttıkça düşük değerler alır; bu yönüyle “düzenin korunumu”nu nicel olarak izlemek için uygundur. Kontrast ise komşu pikseller arasındaki yoğunluk farkını vurgular; keskin geçişler ve yerel bozulmalar arttığında büyür ve özellikle aşınmaya bağlı oyuk/çentik/çizik gibi anizotropik değişimleri belirginleştirir. Bu üç öznelik birlikte kullanıldığında, yüzeyin karmaşıklık (entropi), düzenlilik (homojenlik) ve keskinlik/fark (kontrast) boyutları tamamlayıcı biçimde temsil edilerek, tormalanmış yüzeylerde aşınmanın farklı tezahürleri tek bir çerçevede karşılaştırılabilir hâle gelmektedir.

$$Kontrast = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i,j)^2 P(i,j) \quad (10)$$

$$Homojenlik = - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{P(i,j)}{1 + |i-j|} \quad (11)$$

$$Entropy = - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(i,j) \log_2 P(ij) \quad (12)$$



Şekil 23. Az aşınmış ve çok aşınmış bir takımla ilenen yüzey görüntüleri GLCM Matrisleri ve hesaplanan Homojenlik özneliği

Şekil 23'te Deney 2'ye ait iki yüzey görüntüsü ve bunlara karşılık GLCM ısı haritaları. GLCM hesaplaması simetrik, deney için optimize edilen d=36, θ=0° ve N=256 gri seviye ile gerçekleştirilmiştir. Öznelilikler, aynı GLCM'nin normalize edilmiş biçimi P(i,j) üzerinden hesaplanmış olup, ilgili Homojenlik değerleri görsel üzerinde belirtilmiştir. Sağdaki ısı haritalarında satırlar merkez piksel gri seviyesi i'yi, sütunlar komşu piksel gri seviyesi j'yi temsil eder; eksenler 0–255 aralığındadır ve renk çubuğu eş-oluşum sayısını göstermektedir. Bu bölümdeki GLCM hesaplamaları ve görselleştirmeler Google Colab

(Python 3.12) üzerinde scikit-image 0.2, NumPy, Matplotlib ve Pillow kütüphaneleri kullanılarak yapılmıştır.

2.5. Destek Vektör Makinaları (SVM) ile Sınıflandırma

Destek Vektör Makineleri (SVM), iki sınıfı ayıran karar sınırını marjı mümkün olduğunca büyük tutacak şekilde öğrenen bir yöntemdir. Bu çalışmada tüm eğitim, değerlendirme ve görselleştirme adımları scikit-learn adlı Python kütüphanesi ile gerçekleştirilmiş; sınıflandırıcı için SVC, ölçekleme için StandardScaler, indirgeme için PCA, metrikler ve karışıklık matrisi için ilgili scikit-learn fonksiyonları kullanılmıştır. SVM, kararını doğrusal bir fonksiyonun işaretine bakarak verir; sınırı belirleyen “destek vektörleri” modele en çok etki eden gözlemlerdir. Şekil 24’te üç öznitelikli durumda (Fourier genlik ortalaması, Sinus uyum hatası, Gauss uyum hatası (FSG)) ölçeklenmiş uzayda örneklerin 3B saçılımı ile bu örnekleri ayıran doğrusal karar düzlemi birlikte gösterilmiştir; renkler sınıfları, işaretçi boyutları eğitim/test ayrımını temsil eder. Bu düzlem, Denklem (13)’de tanımlanan karar fonksiyonunun sıfır seviyesine karşılık gelir; karar skorları $SVC(kernel="linear").decision_function(...)$ ile elde edilmiştir.

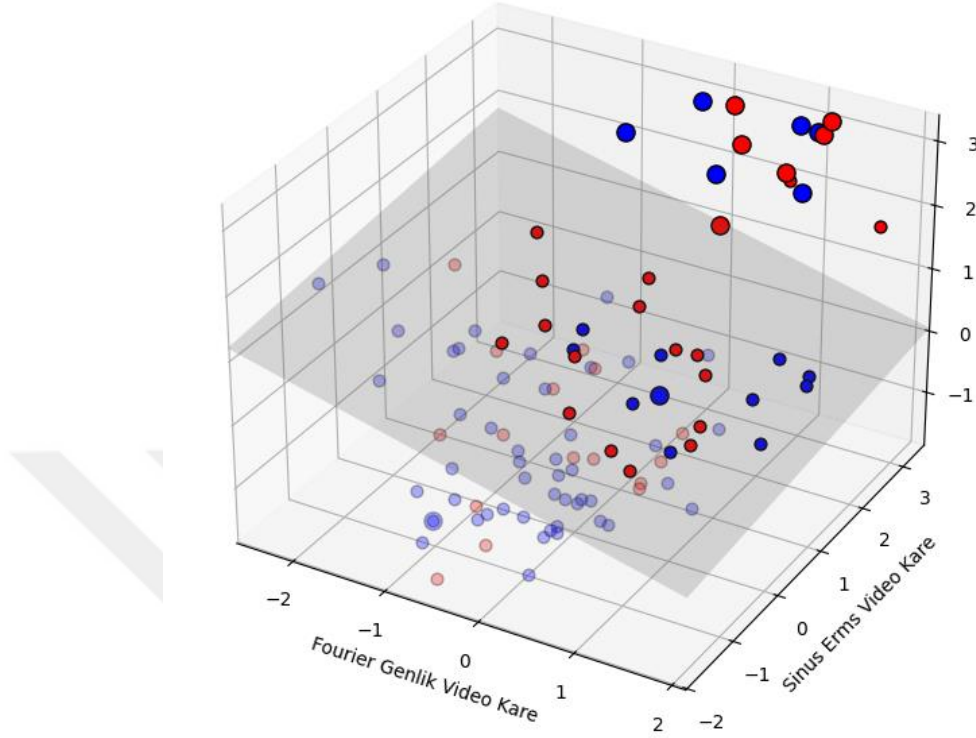
$$f(x) = \text{sign}(w^T x_s + b) \quad (13)$$

Genelleme performansını gerçekçi ölçmek için Leave-One-Experiment-Out (LOEO) protokolü izlenmiştir: Her turda bir Deney No. bütünüyle teste ayrılmış, kalan deneyler eğitimde kullanılmıştır. Bu kurguyla, deney-özel istatistiklerin öğrenilmesi engellenmiş ve veri sızıntısı olmadan daha tarafsız bir genelleme tahmini elde edilmiştir.

Öznitelik ölçek farklarının karar yüzeyini yanıltmaması için sızıntısız standartlaştırma uygulanmıştır: Her LOEO turunda yalnız eğitim verisinin ortalaması ve standart sapması hesaplanmış, aynı katsayılar test verisine uygulanmıştır. Bu adım, marj tanımının anlamlı kalmasını ve doğrusal SVM’in kararlı çalışmasını sağlar; uygulamada scikit-learn’ün Python kütüphanesindeki StandardScaler kullanılmıştır (bkz. Denklem (14)).

$$x_s = \frac{x - \mu_{\text{eğitim}}}{\sigma_{\text{eğitim}}} \quad (14)$$

Deney 6 | V=200 m/dk, f=0.24 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



Şekil 24. Deney 6 – FSG - video özneliklerinin 3B uzayda gösterilmesi ve karar düzlemi

Gerçek veride hatasız ayırım çoğu zaman mümkün olmadığından yumuşak marjlı doğrusal SVM kullanılmıştır. Yumuşak marj yaklaşımı, bazı örneklerin marjın içine girmesine veya yanlış tarafta kalmasına kontrollü olarak izin verir; her örneğin bu ihlali bir “gevşeklik” (slack) değeriyle ölçülür ve model “geniş marj” ile “toplam ihlali küçük tutma” hedeflerini C düzenleme katsayısı üzerinden dengeler (bkz. Denklem (15)). Tekil örnek maliyeti “hinge loss” ile ölçülür; bu kayıp, karar sınırının yanlış tarafındaki ve marj içindeki örnekleri cezalandırır (bkz. Denklem (16)). Bu çalışmada doğrusal SVM, scikit-learn adlı Python kütüphanesinde SVC(kernel="linear", C=1.0) ile kurulmuştur.

$$\min_{w, b, \varepsilon} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad k. s. \quad y_i(w^T x_s + b) \geq 1 - \varepsilon_i, \varepsilon_i \geq 0 \quad (15)$$

$$l(x, y) = \max(0, 1 - y(w^T x_s + b)) \quad (16)$$

Marj, doğrusal SVM’de karar hiperdüzlemine en yakın destek vektörlerine olan dik uzaklığın iki katı olarak ele alınır; bu nedenle marj genişliği ağırlık vektörünün normu ile ters orantılıdır (bkz. Denklem (17)).

$$Marj = \frac{2}{\|w\|} \quad (17)$$

Tez kapsamında, altı özniteliğin birlikte kullanıldığı durumlarda ayrımı iki boyutta görselleştirmek ve 6B’de öğrenilen karar yönünü 2B’de analitik olarak temsil etmek için PCA yöntemi uygulanmıştır. PCA (Başlıca Bileşenler Analizi), standartlaştırılmış eğitim verisinin kovaryans yapısından toplam varyansı en çok açıklayan dik (ortogonal) doğrultuları çıkaran doğrusal, gözetimsiz bir indirgeme tekniğidir; bu çalışmada PCA yalnız eğitime uyumlanmış, aynı dönüşüm test verisine aynen uygulanarak sızıntı önlenmiştir. Denklem 18’deki işlem, ölçeklenmiş 6B öznitelik vektörünün eğitimde öğrenilen PCA ortalaması etrafında merkezlendikten sonra ilk iki başlıca bileşenin tanımladığı düzleme doğrusal olarak projekte edilmesidir; burada x_s standartlaştırılmış 6B vektörü, μ PCA’nın eğitim ortalaması, P ise boyutu 2×6 olan ve satırları birinci/ikinci başlıca bileşen olan projeksiyon matrisidir; sonuç z , 2B PCA koordinatlarıdır. Ardından 6B’deki doğrusal karar hiperdüzleminin yönü 2B düzleme izdüşüm ile taşınır (bkz. Denklem 19), PCA merkezlemesi dikkate alınarak 2B’deki etkili kesme terimi belirlenir (bkz. Denklem 20) ve böylece 2B’de projeksiyon doğrusu elde edilir (bkz. Denklem 21). Uygulama scikit-learn (Python) ile gerçekleştirilmiş; $PCA(n_components=2)$ fonksiyonunun sağladığı P ve μ ile $SVC(kernel="linear")$ modelinden gelen w, b , kullanılmıştır. PCA uygulanmış bir örnek Deney 6 -video kareleri-, için Şekil 25’te sunulmuştur.

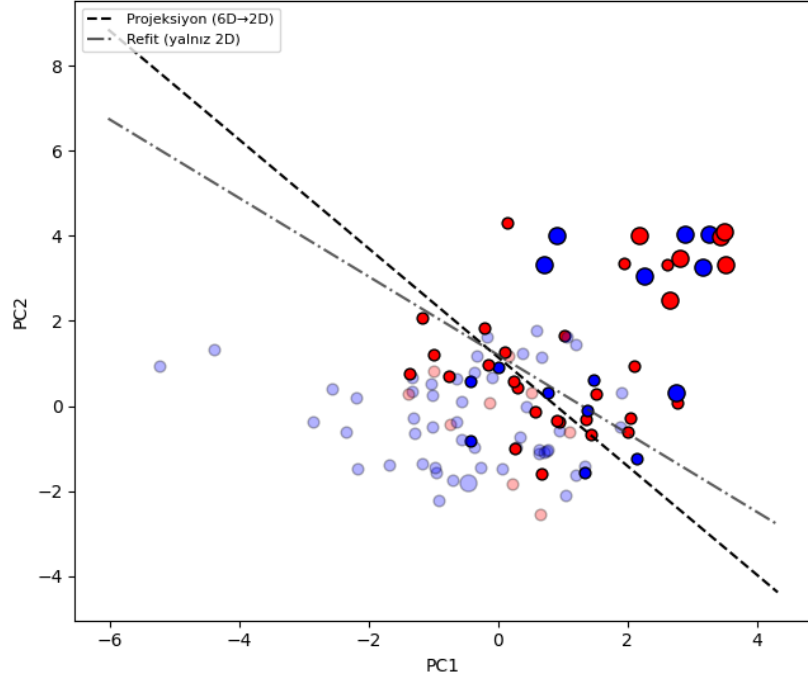
$$z = P(x_s + \mu) \quad (18)$$

$$w_p = Pw \quad (19)$$

$$b_p = w^T \mu + b \quad (20)$$

$$w_p^T z + b_p = 0 \quad (21)$$

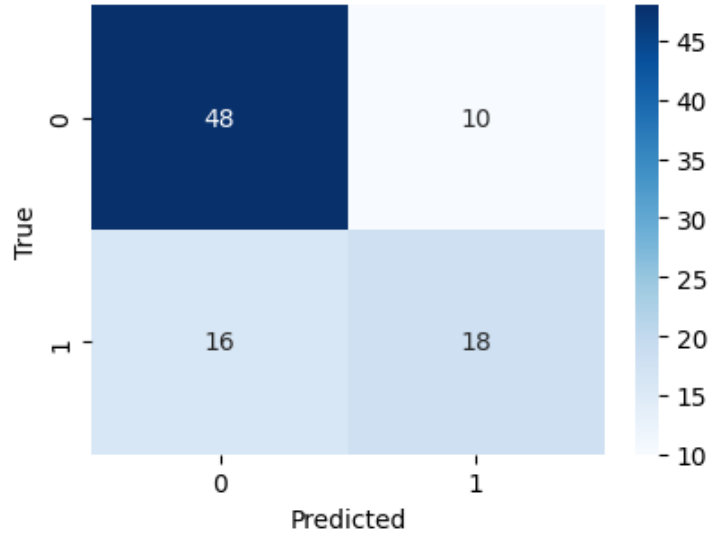
Deney 6 | V=200 m/dk, f=0.24 mm/dev, a=0.3 mm
 Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms, GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



Şekil 25. Deney 6 – video öz nitelikleri-: PCA ile 6B→2B izdüşümde örnek dağılımı.

video_3feat Train CM | Deney 6, V=200, f=0.24, a=0.3

Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



Şekil 26. Deney 6 – video (Fourier–Sinüs–Gauss): Test karışıklık matrisi. Satırlar Gerçek, sütunlar Tahmin; etiket sırası [0=Yavaş, 1=Hızlı]. Hücreler: TN (0,0), FP (0,1), FN (1,0), TP (1,1).

Bu çalışmada ikili sınıflandırma performansını değerlendirmek için karışıklık matrisi (CM – Confusion Matrix) kullanılmıştır. CM, modelin tahminlerini gerçek etiketlere karşı hücre bazında özetler ve hangi hata türlerinin baskın olduğunu gösterir. Şekil 26’da Deney 6 – Video öznitelikleri (Fourier–Sinüs–Gauss) için test koşusunun CM’si sunulmuştur. Matris satırlar; Gerçek, sütunlar; Tahmin olacak biçimde düzenlenmiş; etiket sırası [0=Yavaş, 1=Hızlı] olarak alınmıştır. Buna göre: üst-sol hücre TN (True Negative) = Gerçek 0, Tahmin 0 (yavaş’ı doğru tanıma); üst-sağ hücre FP (False Positive) = Gerçek 0, Tahmin 1 (yavaş iken yanlışlıkla hızlı deme); alt-sol hücre FN (False Negative) = Gerçek 1, Tahmin 0 (hızlı’yı kaçırma); alt-sağ hücre TP (True Positive) = Gerçek 1, Tahmin 1 (hızlı’yı doğru tanıma).

Model başarımı yalnızca “kaç tanesini doğru bildi?” sorusuyla (ham doğrular) değerlendirilemez. Çünkü yanlış pozitif ve yanlış negatif hataların maliyeti çoğu uygulamada farklıdır; ayrıca sınıf dengesizliği durumunda tek başına bir sayı gerçeği gizleyebilir. Bu yüzden modelleri yorumlamak için performans ölçütleri kullanılmaktadır. Performans ölçütleri, (i) hata türleri arasındaki dengeyi görünür kılar, (ii) deneyler/katmanlar (LOEO) arasında karşılaştırılabilir raporlar üretmemizi sağlar, (iii) model/hiperparametre seçiminde nesnel bir kriter verir ve (iv) sistemin pratikte kaçırma ile yanlış alarm arasında nerede durduğunu özetler. Bu çalışmada pozitif sınıf hızlı aşınma (1) olarak alınmıştır ve aşağıdaki metrikler scikit-learn (Python) ile hesaplanmıştır.

Doğruluk (Accuracy), tüm örnekler içinde doğru sınıflananların oranını verir; genel resmi hızlıca gösterir. Ancak sınıf dengesizliğinde yüksek görünüp kritik hataları (ör. hızlı aşınmayı kaçırma) maskeleyebilir (bkz. Denklem 22).

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (22)$$

Kesinlik (Precision), “hızlı” diye etiketlediklerimizin ne kadarının gerçekten hızlı olduğunu ölçer; yanlış pozitif (gereksiz alarm) hatalarına duyarlıdır. Uyarı/alarmların güvenilirliği için önemlidir (bkz. Denklem 23).

$$Precision = \frac{T}{TP + FP} \quad (23)$$

Çağırma (Recall), gerçekten hızlı olanların ne kadarını yakaladığımızı ölçer; yanlış negatif (kaçırma) hatalarına duyarlıdır. Güvenlik/hasar önleme gibi “kaçırma”nın kritik olduğu durumlarda öne çıkar (bkz. Denklem 24).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (24)$$

F1, kesinlik ve çağırmanın harmonik ortalamasıdır; ikisini birlikte yüksek tutmayı ödüllendirir ve dengesiz veri koşullarında tek bir özet değer olarak tercih edilir (bkz. Denklem 25).

$$F1 = \frac{2Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (25)$$

Bu bölümde çalışmanın kapsamı, deneysel düzenek ve veri edinim adımları ile video/görüntü tabanlı öznitelik çıkarımı ve sınıflandırma yaklaşımı uçtan uca tanımlanmıştır. Deney verilerinden türetilen spektral ve doku temelli özellikler, sızıntısız bir akışta ölçeklendirilmiş; sınıflandırma için doğrusal çekirdekli, yumuşak marjlı SVM kurulmuş; değerlendirme, deneyler arası bağımsızlığı koruyan LOEO kurgusunda gerçekleştirilmiştir. Altı öznitelikli durumda ayrımın yorumlanabilirliğini artırmak amacıyla PCA ile iki boyutlu izdüşümler oluşturulmuş; performansın nicel ölçümü için karışıklık matrisi üzerinden Accuracy ve F1 esas alınmıştır. Böylece yöntemsel tercihlerin dayanakları, veri işleme boru hattı ve değerlendirme protokolü açık ve tekrarlanabilir bir çerçevede sunulmuştur.

2.6. Deneysel Çalışmaların Modellenmesi

Deneysel çalışmaların güvenilir sonuçlar verebilmesi için uygun bir deney tasarımının oluşturulması büyük önem taşır. Deney tasarımı; kesme parametrelerinin deney süreci içerisindeki belirsiz etkilerinin ortaya çıkarılmasına, ayrıca değişkenler arasındaki ilişkilerin sistematik biçimde analiz edilip modellenmesine imkân tanıyan güçlü bir istatistiksel yaklaşımdır.

Klasik deney tasarım yöntemleri çoğu zaman karmaşık bir yapıya sahiptir ve istenen sonuçlara ulaşmada yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca, parametre sayısı arttıkça

gerçekleştirilecek deneylerin sayısı da önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, literatürde de önerildiği üzere (Jon vd.,2020), deney sayısını azaltmak ve parametreler arasındaki etkileşimleri daha verimli analiz edebilmek amacıyla Taguchi ortogonal deney tasarımı tercih edilmiştir.

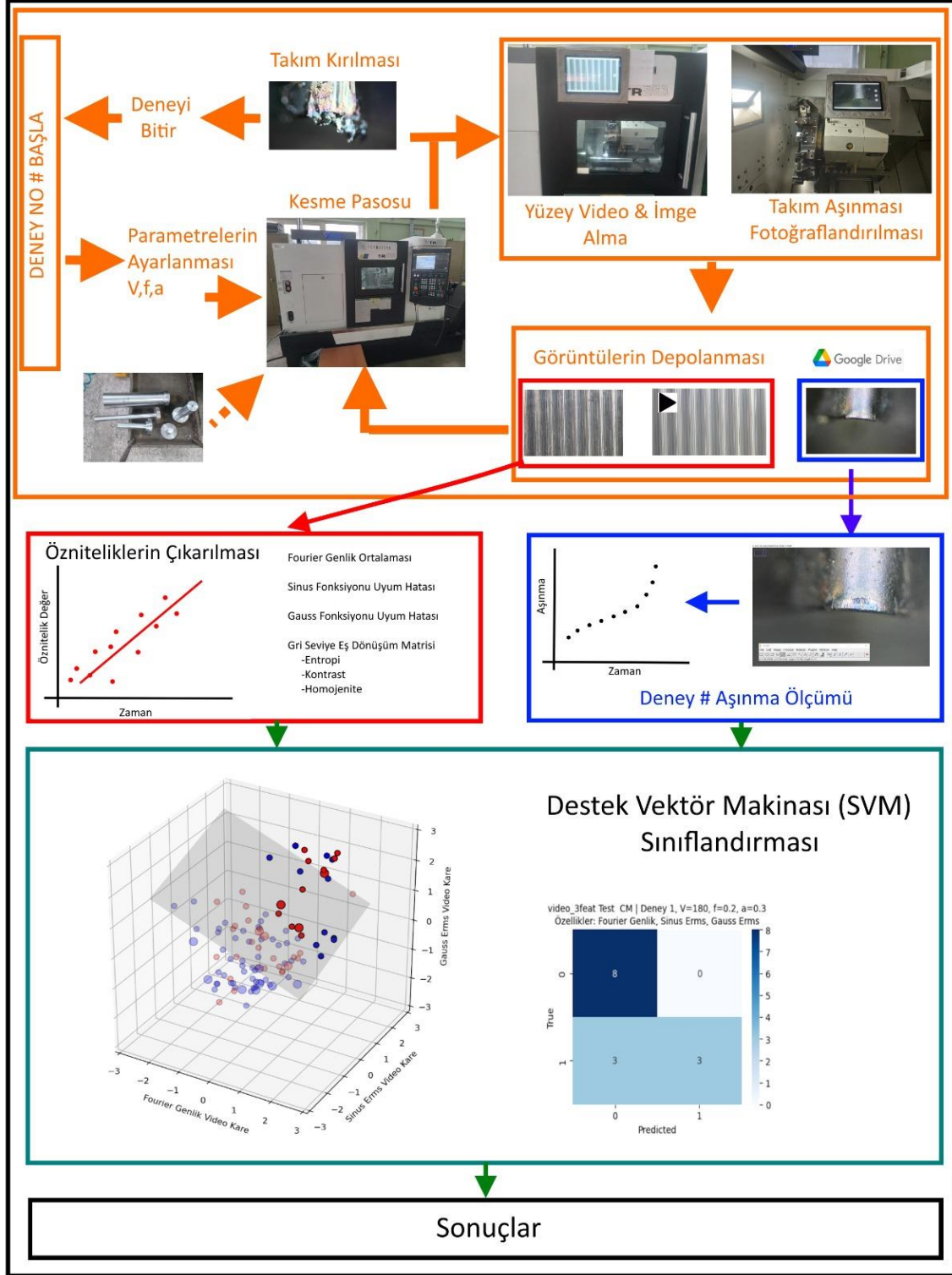
Taguchi yöntemi, Japon kalite yönetimi uzmanı Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş olup temel amacı parametre uzayının tamamını inceleyebilmek için gerekli deney sayısını en aza indirmek, elde edilen deneysel sonuçları ise kalite karakteristiklerinin hedef değerlerden sapma derecesini veya hedefe yakınlığını ifade eden sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürerek değerlendirmektir (Taguchi,2004).

Bu tez kapsamında da, üç parametre ve üç seviyeyi kapsayan L9 ortogonal dizi tercih edilmiştir. Böylece deney sayısı azaltılırken, elde edilen verilerin istatistiksel açıdan güvenilirliği korunmuş ve daha sağlıklı yorumlamalar yapılabilmesi sağlanmıştır. Ayrıca literatürde, benzer tornalama çalışmalarında da takım aşınmasının değerlendirilmesi, yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu ve kesme parametrelerinin analiz edilmesi amacıyla sıklıkla L9 tasarımının kullanıldığı görülmektedir (Özbek vd.,2017; Günay,2013). Taguchi yöntemi ile elde edilen sinyal-gürültü (S/N) oranlarının yanında, faktörlerin etki derecelerinin istatistiksel açıdan anlamlılığını incelemek amacıyla Varyans Analizi (ANOVA) da uygulanmıştır. İlgili kesici takımın üreticisinin ilgili malzeme için önerdiği değerler göz önünde bulundurularak L9 kapsamında belirlenen deney parametreleri Tablo 3'te sunulmuş olup, yöntemle ilgili daha ayrıntılı bilgiler optimum parametrelerin belirlendiği ve varyans analizi ile parametrelerin aşınma üzerindeki etkisinin incelendiği Bölüm 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3. Taguchi L9 ortogonal dizisine göre belirlemiş Deney Parametreleri

Deney No	Kesme Hızı ,V(m/dk)	İlerleme,f (mm/devir)	Kesme Derinliği,d (mm)
1	180	0.20	0.3
2	180	0.22	0.4
3	180	0.24	0.5
4	200	0.2	0.4
5	200	0.22	0.5
6	200	0.24	0.3
7	220	0.20	0.5
8	220	0.22	0.3
9	220	0.24	0.4

Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar ve sonuçlara ulaşılması Şekil 27'deki akış şemasında özetlenmiştir.



Şekil 27. Çalışmanın Akış Şeması

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu tez çalışması kapsamında, tornalama işlemlerinde takım aşınmasının izlenebilmesi amacıyla yüzeyden alınan görüntüler ve video kayıtları üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu verilerden çıkarılan öznitelikler değerlendirilmiş, istatistiksel yöntemler (Taguchi ve ANOVA) ile kesme parametrelerinin aşınmaya etkileri incelenmiş ve makine öğrenmesi yöntemlerinden Destek Vektör Makineleri (SVM) kullanılarak aşınmanın sınıflandırılması sağlanmıştır. Bu bölümde, elde edilen aşınma değerleri, istatistiksel analiz sonuçları, özniteliklerin davranışları ve SVM performansı ayrı alt başlıklar altında sunulmaktadır.

3.1. Aşınma

Bu çalışmada kullanılan L9 deney tasarımı kapsamında gerçekleştirilen tornalama işlemlerinde, kesici takımın aşınma davranışı incelenmiştir. Şekil 28-36'de deneyler sonucunda elde edilen aşınma grafikleri verilmiştir.

Aşınma ölçümleri, paso aralarında kesici takım ucundan alınan görüntüler üzerinden yapılmıştır. Bu amaçla ImageJ yazılımı kullanılmıştır. Fotoğrafların çözünürlüğü ve piksel/gerçek boyut oranı dikkate alınarak yapılan kalibrasyon sonucunda ölçümlerde 0.01 mm hassasiyet sağlanabilmektedir.

Ölçümler, 0.01 mm hassasiyet ile gerçekleştirildiğinden, birbirini takip eden adımlar arasında 0.01 mm'den daha küçük değişimler tespit edilememektedir. Bu nedenle, zaman ekseninde homojen bir dağılım sağlamak amacıyla sabit kalan ölçümler arasından yalnızca temsil edici değerler grafiklere dahil edilmiştir. Böylece, aşınma ilerlemesinin genel eğilimi daha açık şekilde gösterilmiştir.

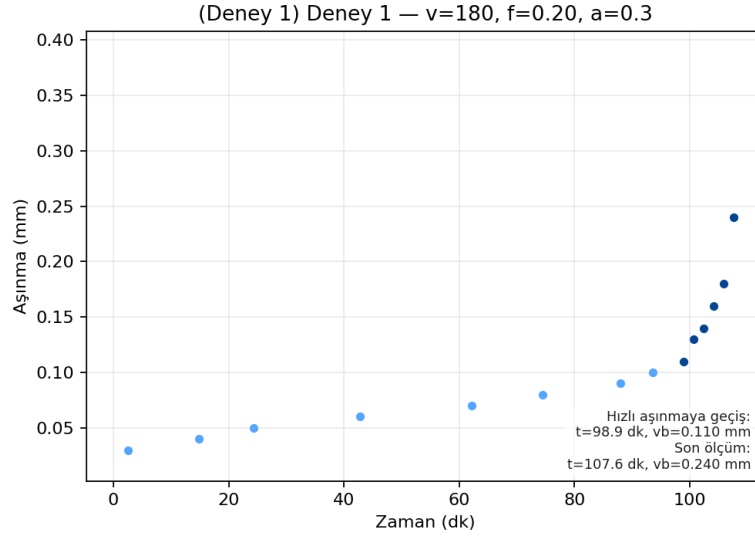
Takım aşınmasının ilerlemesi iki farklı bölgeye ayrılmıştır. Stabil aşınma bölgesi, her pasoda yaklaşık 0.01 mm artışın izlendiği kısım olarak tanımlanmıştır. Bu bölgede aşınma yavaş ve kararlı şekilde ilerlemiştir. En az 0.02 mm'lik bir artışın gözlenmeye başlaması ile hızlı aşınma bölgesine geçiş olduğu kabul edilmiştir. Bu geçişten sonra takım kırılana kadar işlemler sürdürülmüştür.

Şekil 28-36'da, hızlı aşınma bölgeleri koyu mavi, stabil aşınma bölgeleri ise açık mavi ile gösterilmiştir. Ayrıca, hızlı aşınmaya geçiş anındaki zaman ve aşınma değerleri ile

son ölçümün yapıldığı zaman ve aşınma miktarı grafik üzerinde yazılmış ve deney bazında elde edilen bu değerler Tablo 4'te verilmiştir.

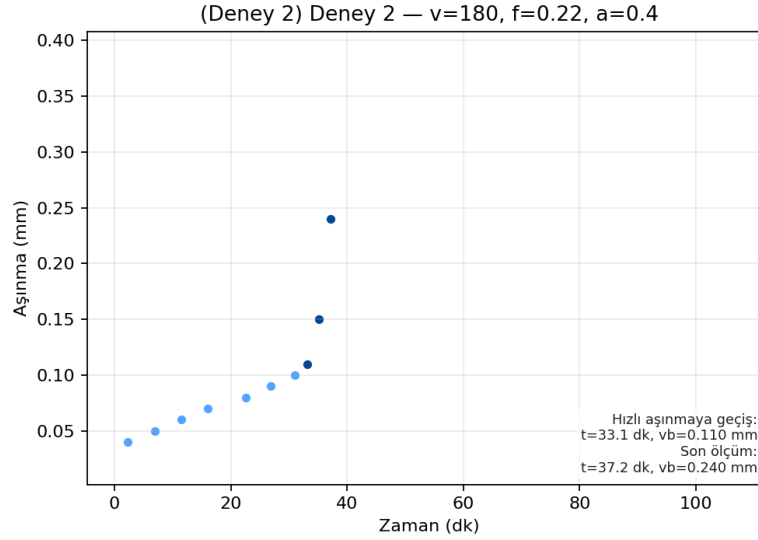
Tablo 4. Hızlı aşınmaya geçiş anındaki zaman ve aşınma değerleri ile son ölçümün yapıldığı zaman ve aşınma miktarları.

Deney No	V/f/a (m/dk)/ (mm/dev.)/ (mm)	Hızlı aşınma geçiş (dk)	Hızlı aşınmaya geçiş (mm)	Son ölçüm zamanı (dk)	Son ölçüm miktar (mm)	Hızlı Son farkı (dk)	İşlenen çaplar	Paso uzunlukları
1	180/0.20/0.3	98.9	0.110	107.6	0.240	8.7	96-64mm	300mm
2	180/0.22/0.4	33.1	0.110	37.2	0.240	4.1	98-84mm	300mm
3	180/0.24/0.5	14.0	0.120	17.2	0.200	3.2	83-74mm	300mm
4	200/0.2/0.4	73.3	0.150	78.0	0.35	4.7	62-30mm 45.dk sonrası 67-47mm	300mm
5	200/0.22/0.5	8.8	0.090	14.2	0.26	5.4	70-61mm	300mm
6	200/0.24/0.3	77.2	0.120	80.7	0.220	3.5	60-30mm 47. dk. sonrası 94-69mm	60-30 mm çaplarda 300mm 94-69 mm çaplarda 150mm
7	220/0.20/0.5	13.7	0.100	15.8	0.380	2.1	64-36mm	150mm
8	220/0.22/0.3	13.1	0.100	16.7	0.24	3.6	98-93mm	300mm
9	220/0.24/0.4	24.8	0.120	26.6	0.240	1.8	96-65mm	150mm



Şekil 28. Deney 1 Aşınma Grafiği

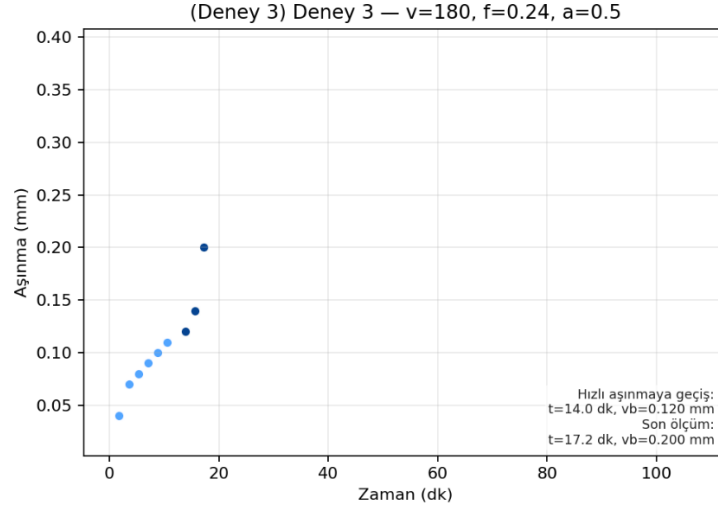
Şekil 28’de deney 1 ($V=180$ m/dk, $f=0.20$ mm/dev, $a=0.3$ mm) için elde edilen aşınma grafiği verilmiştir. Takım 98.9. dakikada hızlı aşınma bölgesine geçmiş ve bu sırada aşınma miktarı 0.11 mm olmuştur. 107.6. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.24 mm olarak belirlenmiştir. Hızlı aşınmaya geçiş ile son ölçüm arasındaki süre 8.7 dakika olup, deneyler arasında en uzun dayanım gösteren deney olmuştur.



Şekil 29. Deney 2 Aşınma Grafiği

Şekil 29’da deney 2 ($V=180$ m/dk, $f=0.22$ mm/dev, $a=0.4$ mm) için aşınma grafiği görülmektedir. Takım 33.1. dakikada 0.11 mm aşınma seviyesinde hızlı aşınmaya geçmiştir,

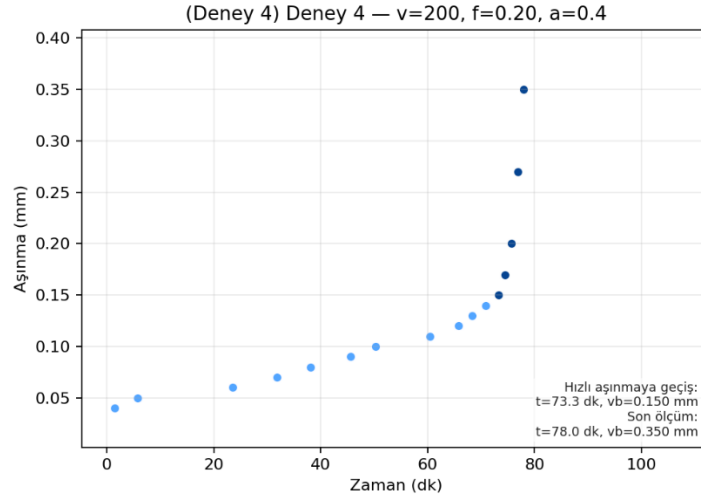
37.2. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.24 mm olmuştur. Hızlı aşınmaya geçişten sonraki dayanım süresi yalnızca 4.1 dakika olup, ilerleme ve kesme derinliğinin artışının takım ömrünü belirgin şekilde azalttığı gözlenmiştir.



Şekil 30. Deney 3 Aşınma Grafiği

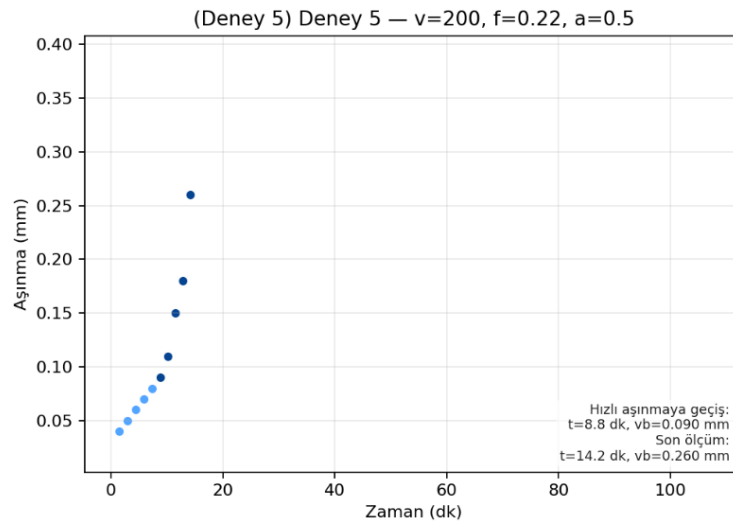
Şekil 30'da deney 3 ($V=180$ m/dk, $f=0.24$ mm/dev, $a=0.5$ mm) için elde edilen grafik sunulmuştur. Takım 14.0. dakikada hızlı aşınmaya geçmiş (0.12 mm), 17.2. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.20 mm olarak kaydedilmiştir. Hızlı aşınma sonrası dayanım süresi yalnızca 3.2 dakika ile en düşük değerlerden biri olmuştur. Bu koşullarda yüksek ilerleme ve kesme derinliğinin takım ömrünü ciddi şekilde kısalttığı ortaya çıkmaktadır.

Şekil 31'de deney 4 ($V=200$ m/dk, $f=0.20$ mm/dev, $a=0.4$ mm) için elde edilen aşınma grafiği verilmiştir. Takım 73.3. dakikada hızlı aşınma bölgesine geçmiş ve bu sırada aşınma miktarı 0.15 mm olmuştur. 78.0. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.35 mm olarak belirlenmiştir. Hızlı aşınmaya geçiş ile son ölçüm arasındaki süre 4.7 dakika olup, bu deneyde hızlı aşınma sonrasında aşınma miktarı oldukça yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu durumun temel nedeni, son ölçümlerin daha küçük çaplarda yapılmış olmasıdır. Küçük çaplarda paso süresi kısaldığından, daha sık ölçüm yapılabilmiş ve kırılmadan önceki aşınma değerleri daha yüksek kaydedilmiştir.

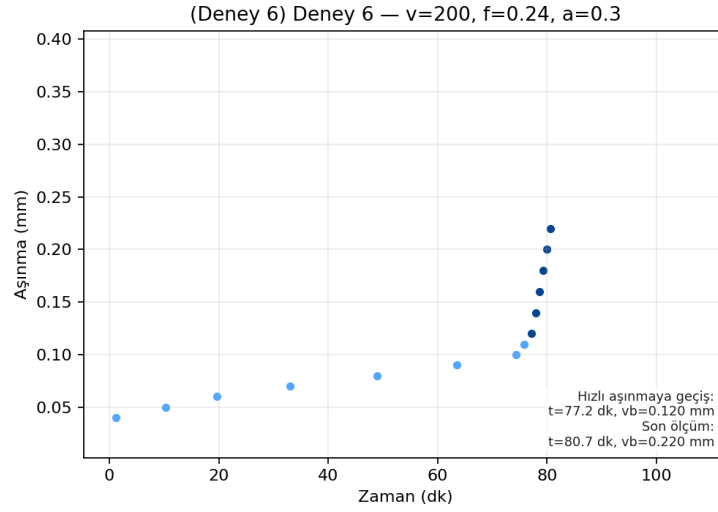


Şekil 31. Deney 4 Aşınma Grafiği

Şekil 32’de deney 5 ($V=200$ m/dk, $f=0.22$ mm/dev, $a=0.5$ mm) için aşınma grafiği sunulmuştur. Takım 8.8. dakikada hızlı aşınma bölgesine geçmiş (0.09 mm) ve 14.2. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.26 mm olarak kaydedilmiştir. Hızlı aşınma sonrası dayanım süresi 5.4 dakika ile kısa sürmüştür, ancak bu süreye rağmen son ölçüm aşınma değeri diğer deneylere kıyasla orta seviyelerde kalmıştır. Bu sonuç, kesme parametrelerinin takım ömrü üzerindeki karmaşık etkilerini göstermektedir.



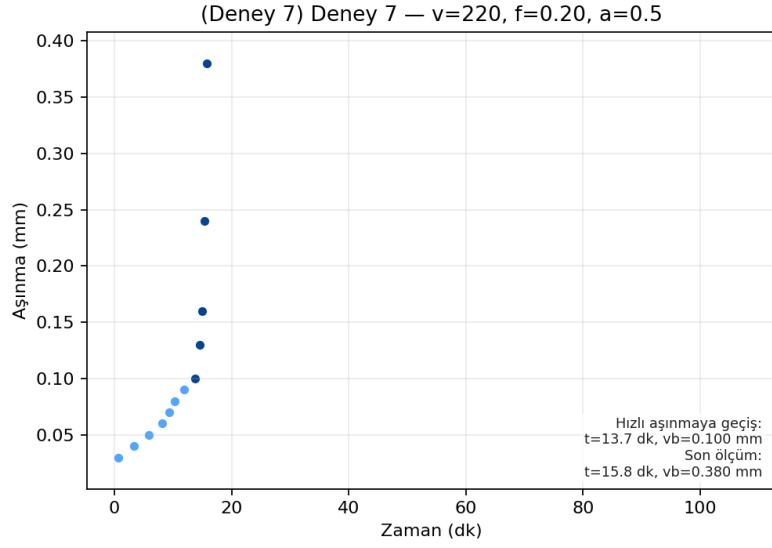
Şekil 32. Deney 5 Aşınma Grafiği



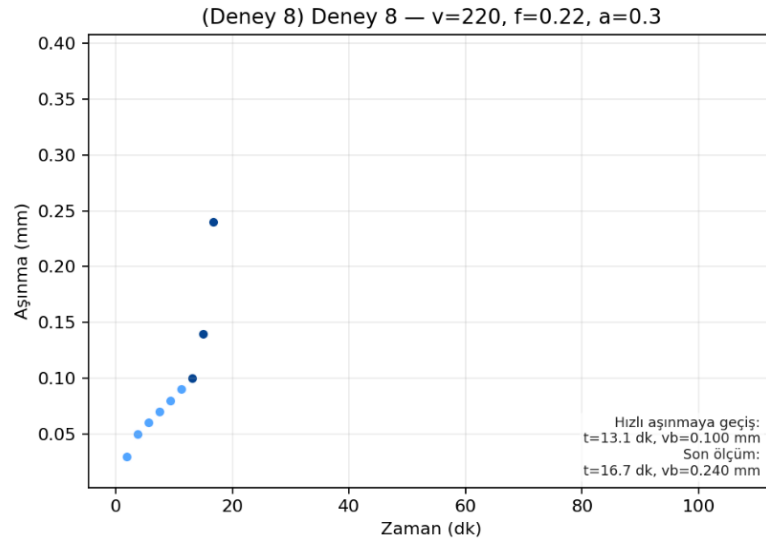
Şekil 33. Deney 6 Aşınma Grafiği

Şekil 33’de deney 6 ($V=200$ m/dk, $f=0.24$ mm/dev, $a=0.3$ mm) için elde edilen aşınma grafiği verilmiştir. Takım 77.2. dakikada hızlı aşınma bölgesine geçmiş ve bu sırada aşınma miktarı 0.12 mm olmuştur. 80.7. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.22 mm olarak kaydedilmiştir. Hızlı aşınmaya geçiş ile son ölçüm arasındaki süre yalnızca 3.5 dakika olup, takım hızlı aşınma bölgesinde kısa sürede son ölçüm değerine ulaşmıştır.

Şekil 34’te deney 7 ($V=220$ m/dk, $f=0.20$ mm/dev, $a=0.5$ mm) için aşınma grafiği sunulmuştur. Takım 13.7. dakikada hızlı aşınmaya geçmiş (0.10 mm) ve 15.8. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.38 mm olarak belirlenmiştir. Hızlı aşınma sonrası dayanım süresi 2.1 dakika ile en kısa sürenlerden biridir. Ancak son ölçüm değerinin yüksekliği (0.38mm), işlemin küçük çaplarda gerçekleştirilmesi nedeniyle paso sürelerinin kısılması ve buna bağlı olarak daha sık ölçüm yapılabilmesinden kaynaklanmaktadır.

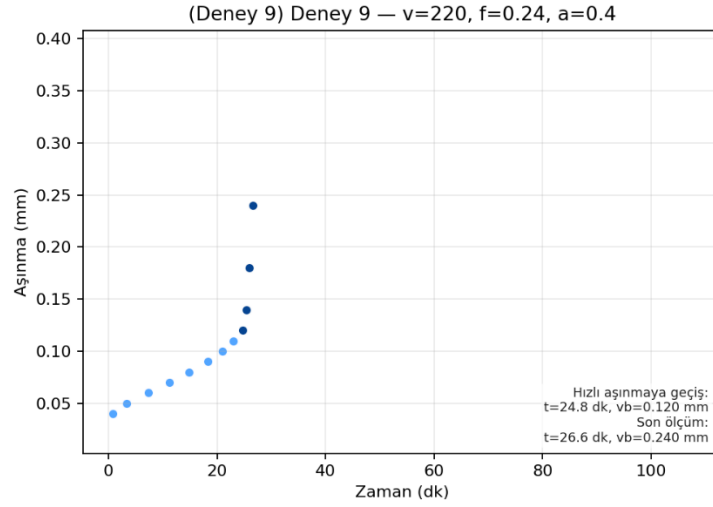


Şekil 34. Deney 7 Aşınma Grafiği



Şekil 35. Deney 8 Aşınma Grafiği

Şekil 35’de deney 8 ($V=220$ m/dk, $f=0.22$ mm/dev, $a=0.3$ mm) için elde edilen aşınma grafiği verilmiştir. Takım 13.1. dakikada hızlı aşınma bölgesine geçmiş ve bu sırada aşınma miktarı 0.10 mm olmuştur. 16.7. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.24 mm olarak kaydedilmiştir. Hızlı aşınmaya geçiş ile son ölçüm arasındaki süre 3.6 dakika olup, bu deneyde de yüksek kesme hızı nedeniyle takım ömrünün sınırlı kaldığı görülmektedir.



Şekil 36. Deney 9 Aşınma Grafiği

Şekil 36’da deney 9 ($V=220$ m/dk, $f=0.24$ mm/dev, $a=0.4$ mm) için elde edilen aşınma grafiği sunulmuştur. Takım 24.8. dakikada hızlı aşınma bölgesine geçmiştir ve bu sırada aşınma miktarı 0.12 mm olmuştur. 26.6. dakikada yapılan son ölçümde aşınma 0.24 mm olarak kaydedilmiştir. Hızlı aşınmaya geçiş ile son ölçüm arasındaki sürenin yalnızca 1.8 dakika olması, bu deneyde hızlı aşınma bölgesinde çok kısa süre dayanılabildiğini göstermektedir. Genel ömür açısından ise deney orta seviyelerde yer almıştır.

Dokuz deney için elde edilen aşınma grafiklerinin değerlendirilmesi sonucunda, kesme parametrelerinin takım ömrü üzerinde belirgin etkilere sahip olduğu görülmüştür. Düşük ilerleme ve kesme derinliğinde takım ömrü uzarken, ilerlemenin artışı özellikle yüksek kesme hızlarında hızlı aşınma bölgesine geçişi hızlandırmıştır. Bazı deneylerde (örneğin deney 4 ve 7) küçük çaplarda yapılan işlemler paso sürelerini kısaltmış, bu sayede son ölçümlerin daha yüksek aşınma değerlerinde yapılabilmesine olanak tanımıştır. Genel olarak düşük kesme hızı ve ilerleme ile daha uzun ömür elde edilirken, yüksek parametre kombinasyonlarında hızlı aşınmaya geçiş daha erken gerçekleşmiş ve ömür kısalmıştır.

Bu çalışmada üç farklı kesme parametresi (kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği) kullanılmıştır. Parametrelerin her birinin farklı seviyelerde denenmesi, bunların takım ömrüne etkisini doğrudan gözlemlemeyi sağlamıştır. Ancak üç parametrenin tüm olası kombinasyonlarını tek tek denemek hem zaman hem de maliyet açısından mümkün olmadığından, bu amaçla Taguchi L9 deney tasarımı tercih edilmiştir. Aşağıda, Taguchi

analizi ve ANOVA sonuçları sunulurken parametrelerin etkileri daha ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

3.2. Taguchi ve Varyans Analizi(ANOVA)

Takım ömrünü etkileyen kesme parametrelerinin belirlenmesi talaşlı imalat süreçlerinde hem üretim maliyetleri hem de yüzey kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, deneysel çalışmalarda kullanılan parametre kombinasyonlarının sistematik bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Ancak tüm olası kombinasyonların denenmesi zaman ve maliyet açısından mümkün olmadığından, bu çalışmada Taguchi L9 deney tasarımı tercih edilmiştir. Taguchi yöntemi sayesinde üç farklı parametre (kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği) üç seviyede ele alınmış ve toplam dokuz deney ile parametrelerin etkileri analiz edilmiştir.

Bu çalışmada takım ömrü, takımın hızlı aşınmaya geçtiği kritik aşınma değerine ulaşma süresi üzerinden tanımlanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda hızlı aşınmaya geçiş değerlerinin ortalaması 0.11 mm olarak bulunmuştur. Deneysel gözlemler, hiçbir deneyde bu değer aşılmadan takımın tamamen kullanılamaz hale gelmediğini göstermiştir. Dolayısıyla 0.11 mm, çalışmada takım ömrünü temsil eden uygun bir eşik olarak kabul edilmiştir. Böylece yanıt değişkeni, her deneyde 0.11 mm aşınmaya ulaşma süresi (dakika) olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak, her deney için gerçek hızlı aşınma geçiş zamanları ve geçişteki aşınma değerleri de kaydedilmiş ve Tablo 5'te verilmiştir. Bu tablo, hem 0.11 mm kriterine göre elde edilen takım ömrü sürelerini hem de hızlı aşınmaya geçiş verilerini göstermesi açısından çalışmaya kapsamlı bir bakış sağlamaktadır.

Taguchi yönteminde deney sonuçlarının değerlendirilmesinde yalnızca ortalama değerler değil, aynı zamanda varyans da dikkate alınmaktadır. Burada varyans, ölçümlerin birbirinden farklılaşma eğilimini ve sistemin kararlılığını temsil etmektedir. Bu nedenle sinyal/gürültü oranı (S/N, Signal-to-Noise ratio) hesaplanmıştır. Bu çalışmada yanıt değişkeni olarak 0.11 mm aşınma değerine ulaşma süresi dikkate alınmıştır. Bu sürenin uzun olması, takımın daha geç aşındığını ve dolayısıyla daha uzun süre kullanılabildiğini göstermektedir. Başka bir deyişle, takım ömrü ne kadar uzun olursa o kadar iyidir.

Tablo 5. Kesme parametreleri ve takım ömür bilgileri

Deney No	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev.)	Kesme Derinliği (mm)	Takım Ömrü (VBmax mm)	VB max 0.11'e ulaşma süresi (dk.)	Hızlı aşınmaya geçiş zamanı (dk.)	Hızlı aşınmaya geçiş değeri (mm)
1	180	0.2	0.3	0.11	95.36	98.9	0.11
2	180	0.22	0.4	0.11	33.15	33.1	0.11
3	180	0.24	0.5	0.11	10.59	14	0.12
4	200	0.2	0.4	0.11	60.41	73.3	0.15
5	200	0.22	0.5	0.11	10.17	8.8	0.09
6	200	0.24	0.3	0.11	75.77	77.2	0.12
7	220	0.2	0.5	0.11	14.18	13.7	0.1
8	220	0.22	0.3	0.11	14	13.1	0.1
9	220	0.24	0.4	0.11	22.94	24.8	0.12

Bu nedenle S/N oranı hesaplamalarında Taguchi'nin “daha büyük – daha iyi (Larger-the-better)” kriteri tercih edilmiştir. Bu yaklaşımda S/N oranı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır:

$$\frac{S}{N} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (26)$$

Burada y_i , deneylerde ölçülen 0.11 mm'ye ulaşma sürelerini, n ise tekrar sayısını göstermektedir. Bu formül, büyük süre değerlerini ödüllendirmekte, küçük süreleri ise cezalandırmaktadır. Dolayısıyla optimum parametre seviyelerinin belirlenmesinde güvenilir bir ölçüt sunmaktadır.

Bu çalışmada üç kontrol faktörü incelenmiştir: kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği. Her bir faktör üç seviyede değerlendirilmiş olup Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Belirlenen Seviye ve Faktörler

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme hızı (m/dk)	180	200	220
İlerleme (mm/dev.)	0.20	0.22	0.24
Kesme derinliği (mm)	0.3	0.4	0.5

Seviyeler Tablo 6’de belirtildiği şekilde düzenlenmiş ve Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak dokuz deney planlanmıştır. Deney düzeni Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. L9 Deney Düzeni

Deney No	Faktör A	Faktör B	Faktör C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Deneylerden elde edilen 0.11 mm’ye ulaşma süreleri kullanılarak S/N oranları hesaplanmış ve Tablo 8’de verilmiştir. Tabloya göre, takım ömrü en uzun olan deney 1 numaralı deney (95,36 dk, 39,59 dB) iken, en kısa olan deney 5 numaralı deneydir (10,17 dk, 20,15 dB). Bu durum, S/N oranı hesaplamalarının takım ömrüyle uyumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. Böylece faktör seviyelerinin ortalama etkilerinin belirlenmesi ve varyans analizine geçilmesi için gerekli veriler elde edilmiştir.

Bu aşamada Taguchi yöntemi kapsamında Yanıt Tablosu oluşturulmuştur. L9 dizisinde her faktörün her seviyesi için, o seviyeye karşılık gelen deneylerin *larger-the-better* ölçütüyle hesaplanan S/N değerleri gruplanmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır (dengeli ortogonal dizi sayesinde her seviye üç kez gözlenir). Elde edilen seviye-ortalama S/N’ler kullanılarak her faktör için Δ (en büyük seviye ortalaması – en küçük seviye ortalaması) hesaplanmış ve etki sırası belirlenmiştir; Δ ne kadar büyükse faktörün yanıt üzerindeki etkisi o kadar belirgindir. Ayrıca her faktörde ortalama S/N’nin en yüksek olduğu seviye ‘optimum seviye’ olarak atanmış ve böylece önerilen optimum kombinasyon elde edilmiştir (bkz. Tablo 9). Yanıt Tablosu, faktörlerin göreceli etkilerini ve tercih edilmesi gereken seviye kombinasyonunu pratik biçimde gösterirken, istatistiksel anlamlılık ve katkı yüzdelerinin değerlendirilmesi için bir sonraki adımda ANOVA uygulanmıştır.

Tablo 8. Deney Parametreleri ve hesaplanan S/N oranları

Deney No	Kesme Hızı, V(m/dk)	İlerleme, f (mm/devi r)	Kesme Derinliği, a (mm)	VB max 0.11'e ulaşma süresi(dk.)	S/N (dB)
1	180	0.2	0.3	95.36	39.58733
2	180	0.22	0.4	33.15	30.40967
3	180	0.24	0.5	10.59	20.49792
4	200	0.2	0.4	60.41	35.62218
5	200	0.22	0.5	10.17	20.14642
6	200	0.24	0.3	75.77	37.58995
7	220	0.2	0.5	14.18	23.03353
8	220	0.22	0.3	14	22.92256
9	220	0.24	0.4	22.94	27.21187

Tablo 9. Yanıt Tablosu

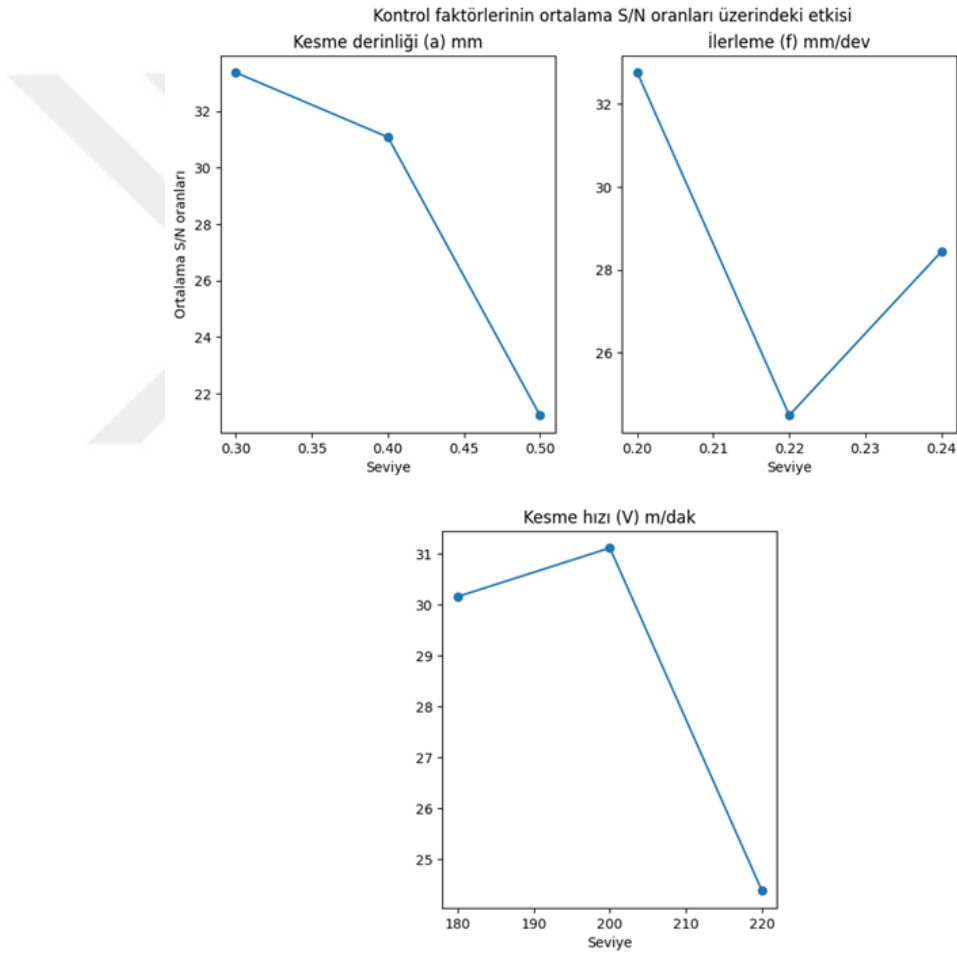
Yanıt Tablosu					
Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Delta Δ	Sıra
Kesme hızı (m/dk)	30.16	31.12	24.39	6.73	3
İlerleme (mm/dev.)	32.75	24.49	28.43	8.25	2
Kesme derinliği (mm)	33.37	31.08	21.23	12.14	1

Tablo 9’da verilen yanıt tablosu incelendiğinde, en yüksek etkiye sahip faktörün kesme derinliği olduğu görülmektedir ($\Delta=12,14$). İkinci sırada ilerleme ($\Delta=8,25$), üçüncü sırada ise kesme hızı ($\Delta=6,73$) yer almaktadır. Bu sonuçlara göre takım ömrü üzerinde en baskın parametre kesme derinliği olmuştur. Faktörlerin optimum seviyeleri ise; kesme hızı için 200 m/dk (Seviye 2), ilerleme için 0,20 mm/dev (Seviye 1) ve kesme derinliği için 0,3 mm (Seviye 1) olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla optimum kombinasyon $V=200$ m/dk, $f=0,20$ mm/dev, $a=0,3$ mm şeklinde elde edilmiştir.

Şekil 37’de kontrol faktörlerinin ortalama S/N oranları üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde:

- Kesme derinliği (a): S/N değerleri kesme derinliği arttıkça belirgin şekilde düşmektedir. En yüksek ortalama S/N, 0.3 mm seviyesinde elde edilmiştir. Bu durum, takım ömrü açısından düşük kesme derinliğinin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.

- İlerleme (f): En yüksek ortalama S/N, 0.20 mm/dev seviyesinde elde edilmiştir. İlerleme değeri arttıkça S/N oranında azalma gözlenmekte, 0.22 mm/dev seviyesinde belirgin bir düşüş gerçekleşmektedir. Bu sonuç, takım ömrü açısından düşük ilerleme değerlerinin avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.
- Kesme hızı (V): S/N oranı 200 m/dk seviyesinde en yüksek değerine ulaşmıştır. 220 m/dk seviyesinde ise S/N değerinde keskin bir düşüş gözlenmektedir. Bu nedenle takım ömrü açısından optimum kesme hızının orta seviyede olduğu söylenebilir.



Şekil 37. Kontrol faktörlerinin ortalama S/N oranları üzerindeki etkisi.

Genel olarak grafik, kesme derinliği > ilerleme > kesme hızı sıralamasında faktörlerin etkili olduğunu ve optimum kombinasyonun $V = 200$ m/dk, $f = 0.20$ mm/dev, $a = 0.3$ mm olduğunu doğrulamaktadır.

S/N oranları kullanılarak optimum parametre seviyeleri belirlendikten sonra, her bir kontrol faktörünün takım ömrü üzerindeki göreceli etkisini daha ayrıntılı incelemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA, yanıt değişkeni üzerindeki toplam varyansı faktörlere ve hata terimine ayırarak, her bir faktörün istatistiksel önemini ve katkı yüzdesini ortaya koymaktadır.

ANOVA analizi için öncelikle Toplam Kareler (SST) hesaplanır. SST, tüm deneylerde ölçtüğümüz 0.11 mm'ye ulaşma sürelerinin genel ortalama etrafında toplam ne kadar saçıldığını gösterir; başka bir deyişle, modelin açıklamaya çalıştığı toplam değişkenliği temsil eder. Bu toplam değişkenlik, ilerleyen adımlarda kontrol faktörlerinin seviye ortalamalarından kaynaklanan pay (faktör kareleri; her faktör için SS) ile ölçüm belirsizlikleri ve etkileşimlerin de içinde yer aldığı açıklanamayan paya (hata karesi; SSE) ayrıştırılacaktır. Böylece her bileşen için serbestlik dereceleri (df) tanımlanacak, ortalama kare (MS = SS/df) hesaplanacak ve F testi ile faktör etkilerinin istatistiksel önemi değerlendirilecektir. SST'nin açık biçimde tanımlanması, bu ayrıştırmanın aynı toplam üzerinde tutarlı şekilde yapılmasını sağlar.

Matematiksel olarak toplam kareler toplamı (SST) şu şekilde ifade edilir:

$$SST = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (27)$$

Burada y_i her bir ölçümü, $\bar{y}$ genel ortalamayı, N toplam gözlem sayısını göstermektedir.

Faktör kareleri (SS), toplam değişkenliğin her bir kontrol faktörü tarafından tek başına açıklanan kısmını gösterir. Burada amaç, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği seviyeleri arasında gözlenen ortalama farkların sürelerde yarattığı değişkenliği ayırmaktır. L9 dizisinde her seviye üç gözlem içerdiği için, her faktörün seviye toplamlarından/ortalamlarından yararlanarak bu “açıklanan pay” ayrı ayrı hesaplanabilir. Böylece her faktör için bir SS değeri elde edilir (ör. “kesme hızı için SS”, “ilerleme için SS”, “kesme derinliği için SS”).

Bir faktörün kareler toplamı (SS_f) ise:

$$SS_f = \sum_{j=1}^k \frac{T_j^2}{n_j} - \frac{T^2}{N} \quad (28)$$

şeklinde hesaplanır. Burada T_j , faktörün j . seviyesindeki toplamı, n_j o seviyedeki gözlem sayısını (L9’da 3); k seviye sayısını (3); T tüm deney sürelerinin toplamını; N ise toplam gözlem sayısını (9) ifade eder. Bu ifade her faktör için ayrı ayrı uygulanır ve elde edilen faktör SS değerleri ileride Ortalama kareler (MS (SS/df)), F testi ve katkı yüzdesi hesaplarında kullanılır.

Hata kareleri (SSE), faktörlerle açıklanamayan değişkenliği temsil eder. Bu kısım; ölçüm belirsizliklerini, modelde yer verilmeyen kaynakları ve L9 düzeninde ayrı ayrı tahmin edilmeyen etkileşimlerin havuzlandığı kalıntıyı içerir. SSE’yi, toplam değişkenlikten (SST) her bir faktör için hesaplanan SS değerlerini çıkararak elde ederiz.

Hata kareler toplamı ise:

$$SSE = SST - \sum SS_f \quad (29)$$

şeklinde bulunur.

Burada sağ taraftaki ilk terim Denklem (27) ile tanımlanan toplam değişkenlik (SST), ikinci terim ise kontrol faktörleri için hesaplanan kareler toplamlarının (SS) toplamıdır; bu iki terim arasındaki fark, faktörlerle açıklanamayan kalıntı/hata değişkenliğini (SSE) verir. L9 düzeninde üç faktörün üçer seviyesi bulunduğundan toplam serbestlik derecesi 8, hata serbestlik derecesi 2’dir. SST’nin faktör SS’leri ve SSE’ye bu biçimde ayrıştırılması, izleyen kısımda ortalama karelerin (SS/df) hesaplanması ve faktör etkilerinin F karşılaştırması ile sınanması için temel çerçeveyi sağlar.

ANOVA’da karşılaştırmalar, kareler toplamlarının (SS) kendi serbestlik derecelerine bölünmesiyle elde edilen ortalama kareler üzerinden yapılır. Bu amaçla her bileşen için $MS = SS/df$ tanımlanır; özelde hata terimi için $MS_{hata} = SSE/df_{hata}$ hesaplanır.

Ortalama kareler (MS) ise:

$$MS = \frac{SS}{df} \quad (30)$$

ifadesiyle elde edilmektedir. Burada df serbestlik derecesini ifade etmektedir. Bu tanım, biraz sonra kullanılacak F karşılaştırmasının temelini oluşturur; faktörlerin etkisi, kendi MS değerlerinin MS_{hata} ile oranlanmasıyla test edilecektir.

F istatistiği, bir faktörün ortalama karesini ($MS_{faktör}$) hata ortalama karesine (MS_{hata}) oranlayarak, faktör seviyeleri arasındaki farkların “gürültü”ye kıyasla ne kadar belirgin olduğunu gösterir.

Her faktörün F değeri:

$$F = \frac{MS_{faktör}}{MS_{hata}} \quad (31)$$

ile hesaplanır. F değerleri hesaplandıktan sonra, katkı yüzdelerini raporlamadan önce etkilerin ne kadar anlamlı olduğunu değerlendirmek amacıyla $\alpha = 0.10$ (%90 güven düzeyi) esas alınmıştır. Bu amaçla her faktörün p-değeri kullanılmıştır; p-değeri, elde edilen F büyüklüğünün yalnızca rastlantı ile ortaya çıkma olasılığını özetler. p 0.10’un altındaysa etki istatistiksel olarak anlamlı, 0.10’un üzerindeyse kanıt zayıf kabul edilmiştir. Bu değerlendirme yapıldıktan sonra, faktörlerin katkı yüzdeleri toplam değişkenlik içindeki payları olarak sunulmuştur.

Son olarak, faktörlerin toplam varyans içerisindeki görece etkilerini göstermek amacıyla katkı yüzdesi hesaplanmıştır:

$$\%Katkı = \frac{SS_{faktör}}{SST} * 100 \quad (32)$$

Bu şekilde, her bir kontrol faktörünün takım ömrüne katkısı istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 10. Her bir kontrol faktörünün takım ömrüne katkısı istatistiksel olarak gösterilmesi

Faktör	SS	df	F	p (PR(>F))	Katkı (%)
Kesme hızı (m/dk)	1873.5	2	5.00	0.167	23
İlerleme (mm/dev.)	2118.4	2	5.66	0.15	26
Kesme derinliği (mm)	3768.8	2	10.06	0.09	46.3
Hata (Residual)	374.5	2	–	–	4.6

ANOVA hesaplamaları Python ortamında, başta pandas ve statsmodels olmak üzere standart istatistik kütüphaneleriyle yürütülmüştür. Analiz, 0,11 mm’ye ulaşma süresi yanıt değişkeni esas alınarak yapılmış; SS, df, MS, F ve p değerleri ile katkı yüzdeleri, metinde

verilen (27)–(32) numaralı adımlarla uyumlu biçimde yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 10’da raporlanmıştır.

Tablo 10, takım ömrü üzerinde en belirgin etkinin kesme derinliğinden geldiğini göstermektedir (%46,3; $F=10,06$; $p\approx 0,09$). İlerleme (%26,0; $F=5,66$; $p\approx 0,15$) ve kesme hızı (%23,0; $F=5,00$; $p\approx 0,17$) daha düşük katkılar sunmuştur. Hata (residual) satırındaki %4,6’lık pay, modelin açıklayamadığı kısmı temsil eder; ölçümdeki doğal dalgalanmalar ve bu çalışmada modele alınmamış etkiler bu paya yansır. Bulgular, S/N yanıt tablosundaki Kesme Derinliği(a) > İlerleme(f) > Kesme Hızı(V) sıralamasıyla uyumludur ve $V=200$ m/dk, $f=0,20$ mm/dev., $a=0,3$ mm kombinasyonunu desteklemektedir.

Taguchi analizi ve ANOVA sonuçları, kontrol faktörlerinin takım ömrü üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Ancak bu yaklaşım, aşınmayı yalnızca ölçüm sonuçları üzerinden değerlendirmektedir. Bu çalışmada ise, ölçümlere ek olarak video karelerinden çıkarılan öznitelikler kullanılarak aşınma ile ilişkili sayısal göstergeler elde edilmiştir. Böylece, ileride gerçek zamanlı olarak yalnızca görüntüler üzerinden takım aşınmasının tahmin edilebilmesini sağlayacak bir sistemin temelleri atılmaktadır. Bir sonraki bölümde, video kareleri ve deney sonunda alınan takım fotoğrafları kullanılarak hesaplanan öznitelikler sunulmuş ve yorumlanmıştır.

3.3. Özniteliklerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, çıkarılan özniteliklerin zaman eksenindeki değişimleri deneyler arası karşılaştırmalı biçimde yorumlanmıştır. Şekil 38-45’te, grafikler Deney 1–9’u temsil etmekte ve her grafik başlığında kesme parametreleri (V, f, a) verilmektedir. Tüm değerler global ölçekte normalize edilmiştir. Şekil 38-41’de Fourier Genlik, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatası öznitelikleri (FSG) sırasıyla video ve fotoğraf verilerinden; Şekil 42-45’te GLCM Kontrast, GLCM Homojenlik ve GLCM Entropi öznitelikleri yine video ve fotoğraf verilerinden sunulmuştur. Her öznitelik için saçılım noktaları üzerine yerleştirilen doğrusal eğilim çizgileri görselleştirilmiştir; bu eğilimlerin yönü ve büyüklüğüne ilişkin nicel göstergeler ise eğim ve düzeltilmiş R^2 (Düz. R^2) değerleri olarak Tablo 11’de raporlanmıştır.

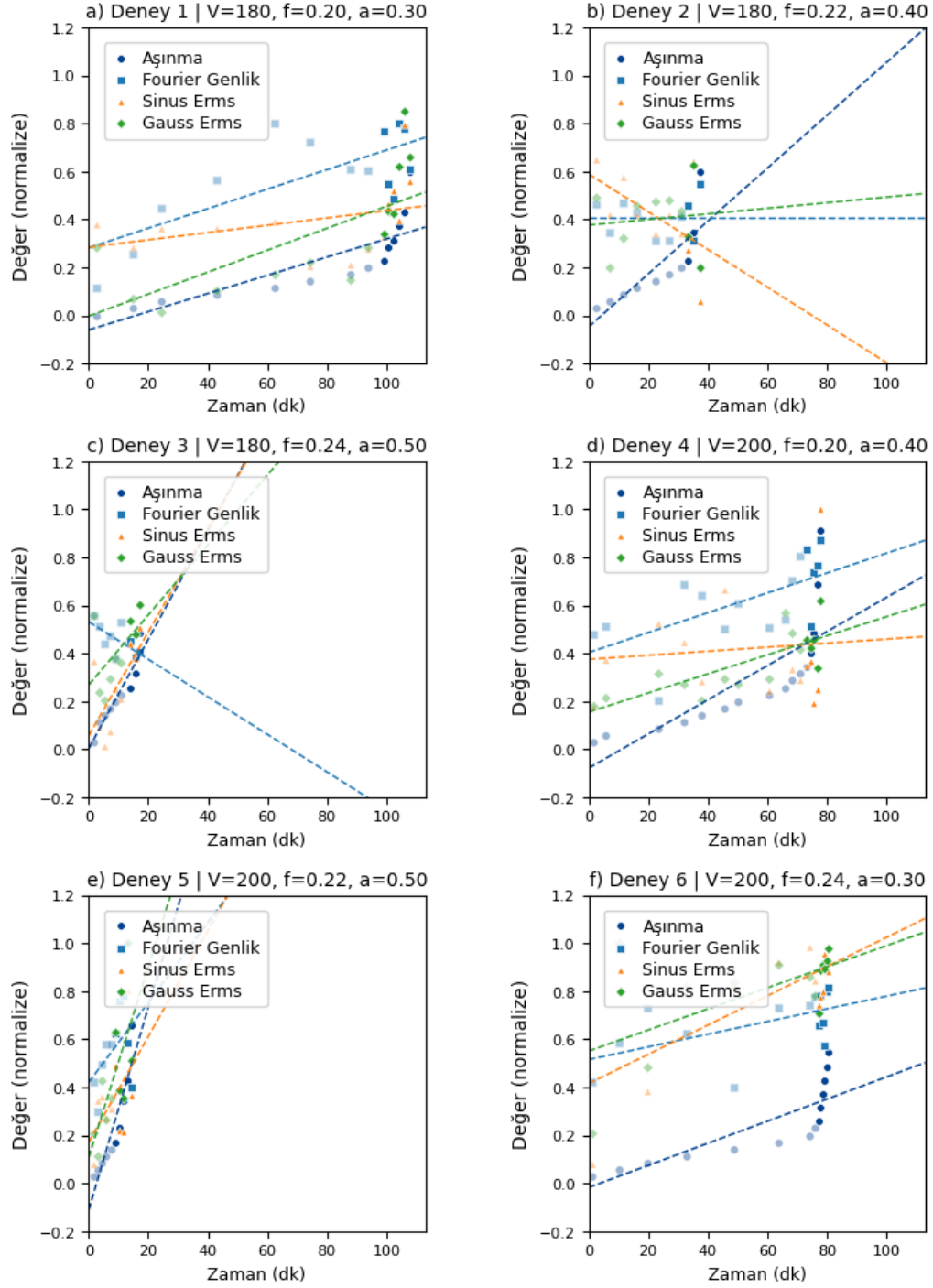
Şekil 38-39’da FSG özniteliklerinin (Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası, Gauss uyum hatası) video temelli zamana bağlı eğilimleri sunulmuştur. Şekil 38.a (Deney 1) altında üç özniteliğin eğilim çizgileri yukarı yönlü bir yerleşim sergilemekte olduğu

görülmektedir. Şekil 38.b (Deney 2) koşullarında Sinüs çizgisi aşağı yönlü konumlanırken Gauss ve Fourier çizgileri az da olsa artı yönde seyrini sürdürmektedir. Şekil 38.c (Deney 3) kapsamında Sinüs ve Gauss çizgileri birlikte yukarı yönlenmiş, Fourier çizgisi ters yönde yer almıştır. Şekil 38.d (Deney 4) için üç çizgi de artış yönünü korumakta; grafiğin ilerleyen kısmında çizgiler arası ayrışma güçlenmekte ve noktalar üst bölgelere doğru yoğunlaşmaktadır. Şekil 38.e (Deney 5) hızlı aşınmaya hızlı yaklaşan karakterdedir; üç gösterge eşzamanlı yükseliş sergilemekte, veri bulutu kısa sürede üst seviyelere toplanmaktadır. Şekil 39.f (Deney 6) kapsamında genel artış yönü sürdürülmekte; noktasal dağılım eğilim çizgileri çevresinde düzenli kalmaktadır. Şekil 39.a (Deney 7) altında Sinüs çizgisi aşağı yönde, Gauss ve Fourier çizgileri yukarı yönde konumlanmıştır; Sinüs boyutunda yer yer aşağı sapmalar seçilmektedir. Şekil 39.b (Deney 8) için Sinüs çizgisi aşağı yönlü, Gauss ve Fourier çizgileri artı yönlü ilerlemiştir. Şekil 39.c (Deney 9) kapsamında Fourier çizgisi belirgin bir artış sunmakta; Gauss çizgisi yataya yakın kalırken Sinüs çizgisi yataya yakın hafif aşağı yönde yerleşmektedir. Video karelerinden çıkarılan özniteliklerin dokuz deney için düzeltilmiş R kare (Düz. R^2) ortalaması 0,196 bulunmuştur. Video-FSG için düzeltilmiş R kare ortalamaları Fourier 0,1960; Sinüs 0,1917; Gauss 0,2465 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 40-41'de FSG özniteliklerinin (Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası, Gauss uyum hatası) fotoğraf temelli zamana bağlı değişimleri gösterilmiştir. Şekil 40.a (Deney 1) içinde Fourier artış yönlü, Sinüs yataya yakın, Gauss artış yönlüdür; noktalar üst bölgelere doğru toparlanma eğilimi sunar. Şekil 40.b (Deney 2) koşullarında Fourier artış yönünü korur; Sinüs'teki değişim zayıf, Gauss'ta ise artış kararlıdır. Şekil 40.c (Deney 3) kapsamında Fourier azalış eğilimindeyken, Sinüs ile Gauss artış eğilimindedir; iki çizgi arasındaki ayrışma belirgindir. Şekil 40.d (Deney 4) için Fourier ve Sinüs yataya yakın seyretmekte, Gauss artış göstermektedir. Şekil 30.e (Deney 5) altında Fourier belirgin, Sinüs hafif, Gauss ise belirgin artış sergiler; kısa sürede üst seviyelere kümeleşme görülür. Şekil 40.f (Deney 6) bağlamında Fourier azalış yönlü, Sinüs yataya yakın, Gauss artış yönlüdür; dağılım eğilim çizgileri çevresinde düzenlidir. Şekil 41.a (Deney 7) kapsamında Fourier belirgin biçimde artarken, Sinüs azalış yönündedir; Gauss artışını sürdürür ve Sinüs ekseninde yer yer aşağı sapmalar seçilir. Şekil 41.b (Deney 8) için Fourier ve Sinüs birlikte belirgin yükseliş gösterir; Gauss da artış yönlü ilerler ama Fourier ve Sinüs kadar baskın değildir. Şekil 41.c (Deney 9) kapsamında Fourier artış yönlüdür; Sinüs yataya

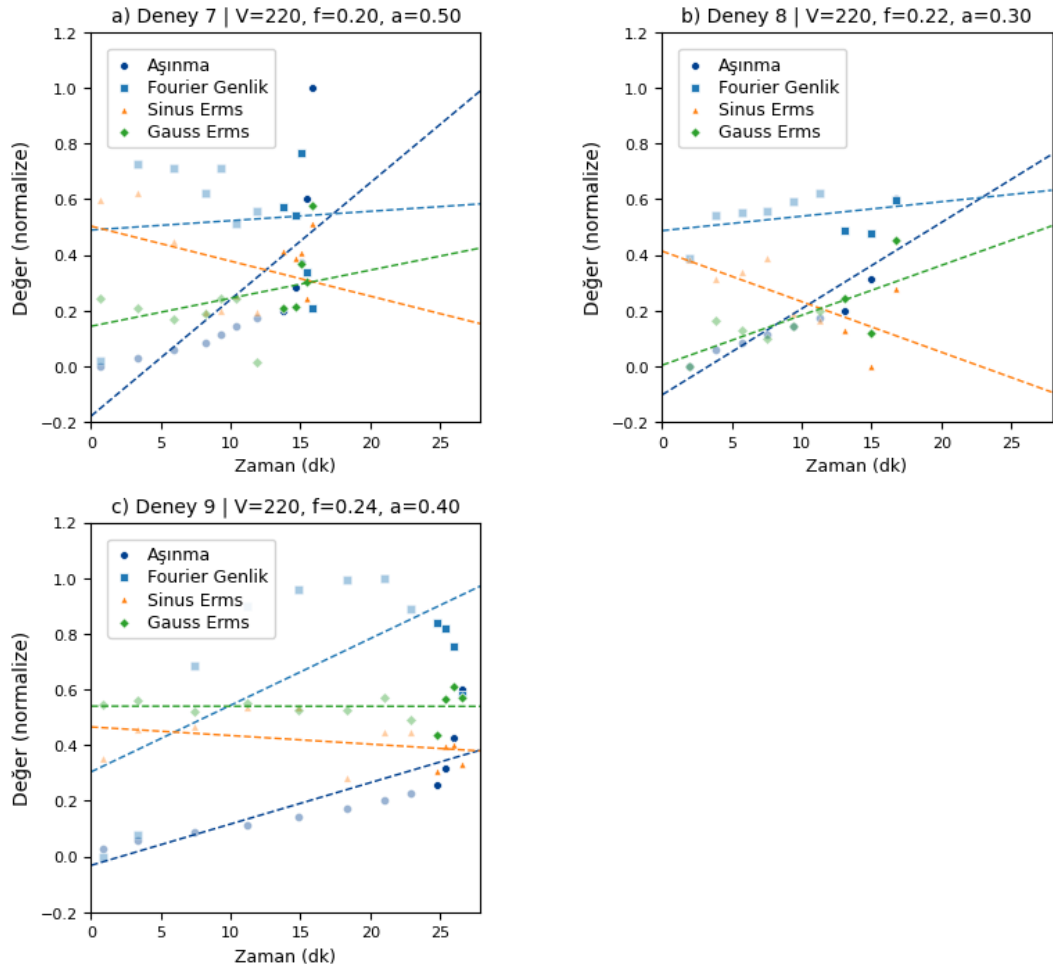
yakındır; Gauss artışıını korur. Foto-FSG için düzeltilmiş R^2 ortalamaları Fourier 0,2559; Sinüs 0,1787; Gauss 0,2245 olarak hesaplanmıştır.

FSG (video) — normalize=global — 3x2 [[1, 2, 3, 4, 5, 6]]



Şekil 38. FSM öznelikleri (video): Deney 1–6 için Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatasının zamana bağlı eğilimleri

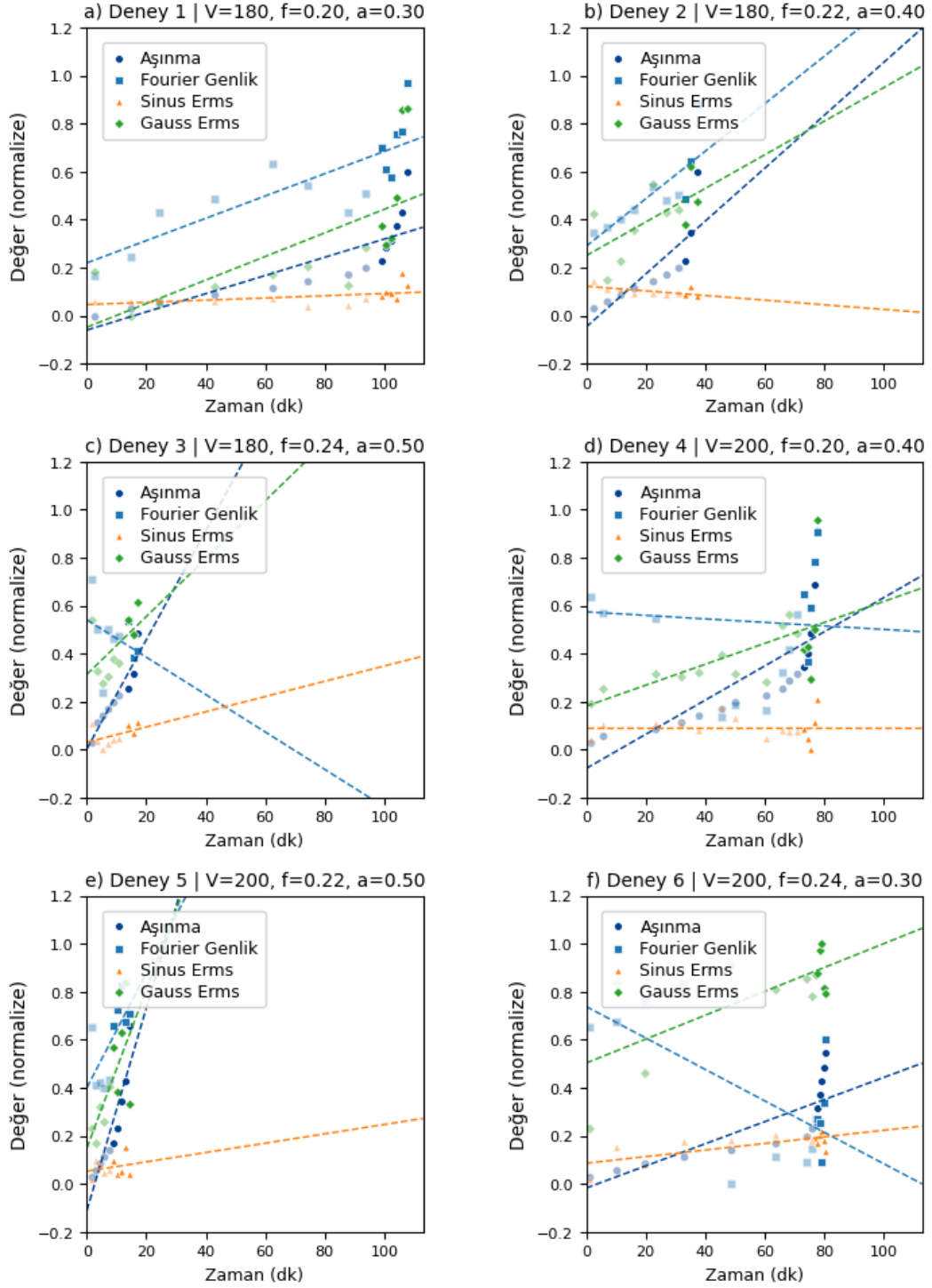
FSG (video) — normalize=global — 2x2 [[7, 8, 9]]



Şekil 39. FSM öznelikleri (video): Deney 7–6 için Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatasının zamana bağlı eğilimleri

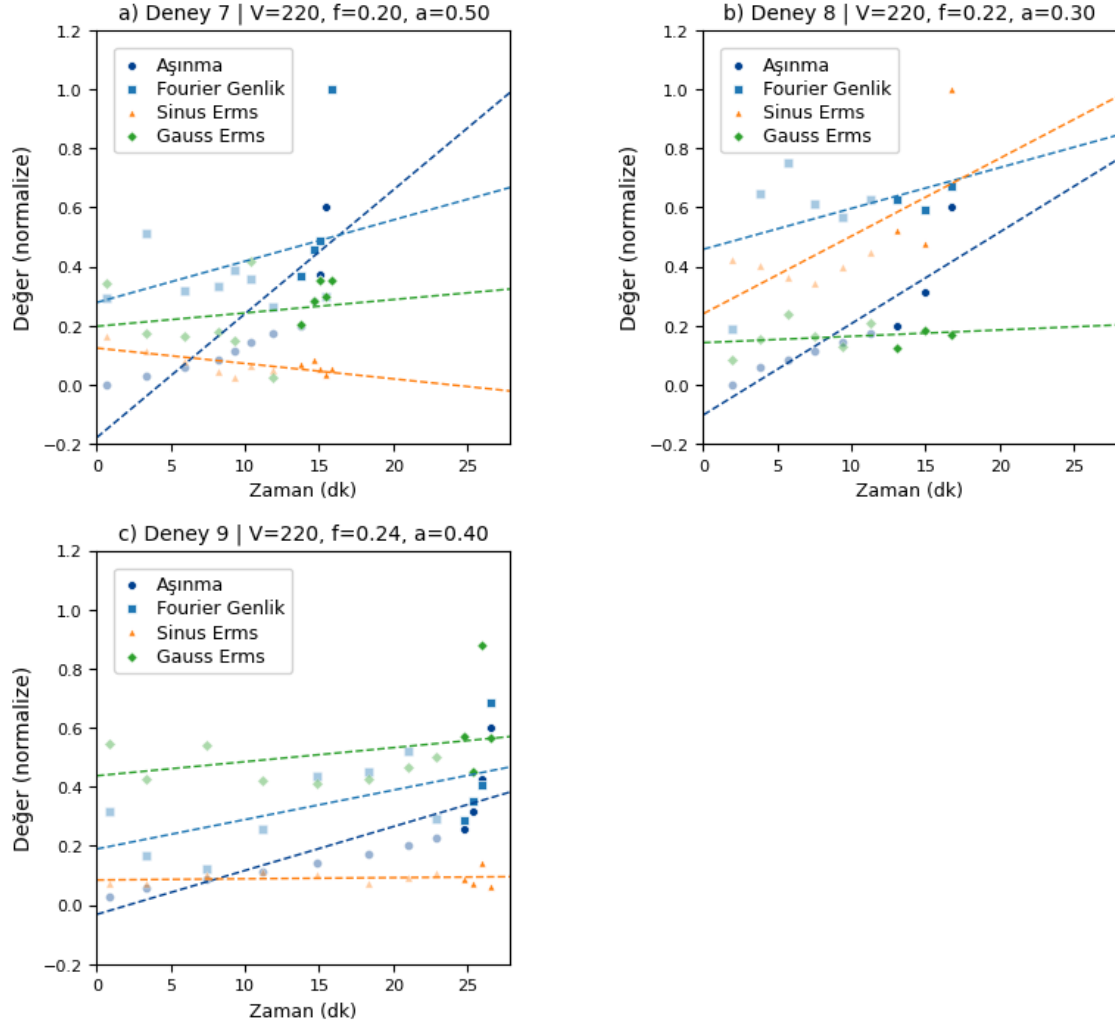
Fotoğraf ve video sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, FSG özneliklerinin iki veri türünde de benzer metrikler verdiği görülmektedir. Bu durum, özneliklerin tornalanmış yüzey dokusuna özgü yapısal özellikleri yakaladığını düşündürmektedir. Ayrıca Gauss'un video verilerinde daha yüksek uyum sağlaması, özellikle yüzeyin merkez bölgelerine odaklanarak kenarlarda ortaya çıkabilen optik bozunumlardan kaynaklı gürültüyü baskılamasıyla ilişkilendirilebilir. Böylece, hem fotoğraf hem de video temelli analizlerde özneliklerin tutarlı bir şekilde benzer eğilimler sergilediği doğrulanmıştır.

FSG (foto) — normalize=global — 3x2 [[1, 2, 3, 4, 5, 6]]



Şekil 40. FSM öz nitelikleri (foto): Deney 7–6 için Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatasının zamana bağlı eğilimleri

FSG (foto) — normalize=global — 2x2 [[7, 8, 9]]



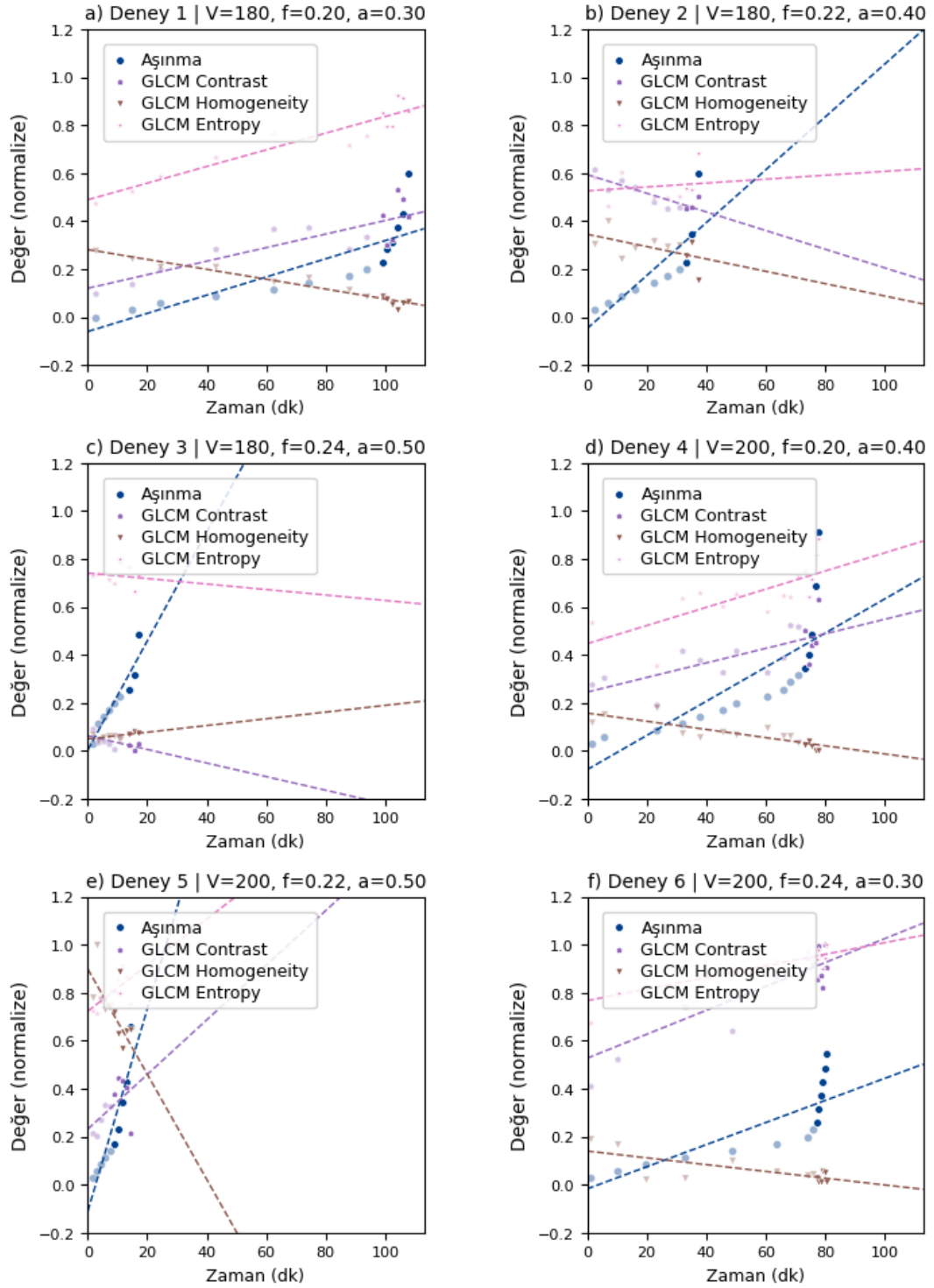
Şekil 41. FSM öz nitelikleri (foto): Deney 7–6 için Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatasının zamana bağlı eğilimleri

Şekil 42-43'te GLCM tabanlı öz niteliklerin (Kontrast, Homojenlik, Entropi) video temelli zamana bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 42.a (Deney 1) kapsamında Kontrast artış yönlü, Homojenlik azalış yönlü, Entropi artış yönlüdür. Şekil 42.b (Deney 2) koşullarında Kontrast ve Homojenlik azalış eğilimindeyken, Entropi zayıf bir artış göstermektedir. Şekil 42.c (Deney 3) için Kontrast azalışta, Homojenlik artışıdır; Entropi'de hafif bir azalış eğilimi izlenmektedir. Şekil 42.d (Deney 4) bağlamında Kontrast ve Entropi artış yönlü, Homojenlik azalış yönlüdür. Şekil 42.e (Deney 5) altında Kontrast ile Entropi artarken, Homojenlik düzenli bir biçimde azalmaktadır. Şekil 42.f (Deney 6) kapsamında Kontrast ve Entropi artışını sürdürmekte, Homojenlik azalış yönünde

kalmaktadır. Şekil 43.a (Deney 7) için Kontrast zayıf bir artış sergilerken Homojenlik belirgin biçimde azalmaktadır; Entropi’de artış zayıf düzeydedir. Şekil 43.b (Deney 8) bağlamında Kontrast ile Entropi artış yönlü, Homojenlik azalış yönlüdür. Şekil 43.c (Deney 9) için Kontrast ve Entropi artmakta, Homojenlik azalmaktadır. Video-GLCM için düzeltilmiş R kare ortalamaları Kontrast 0,4137; Homojenlik 0,5594; Entropi 0,3645 olarak hesaplanmıştır.

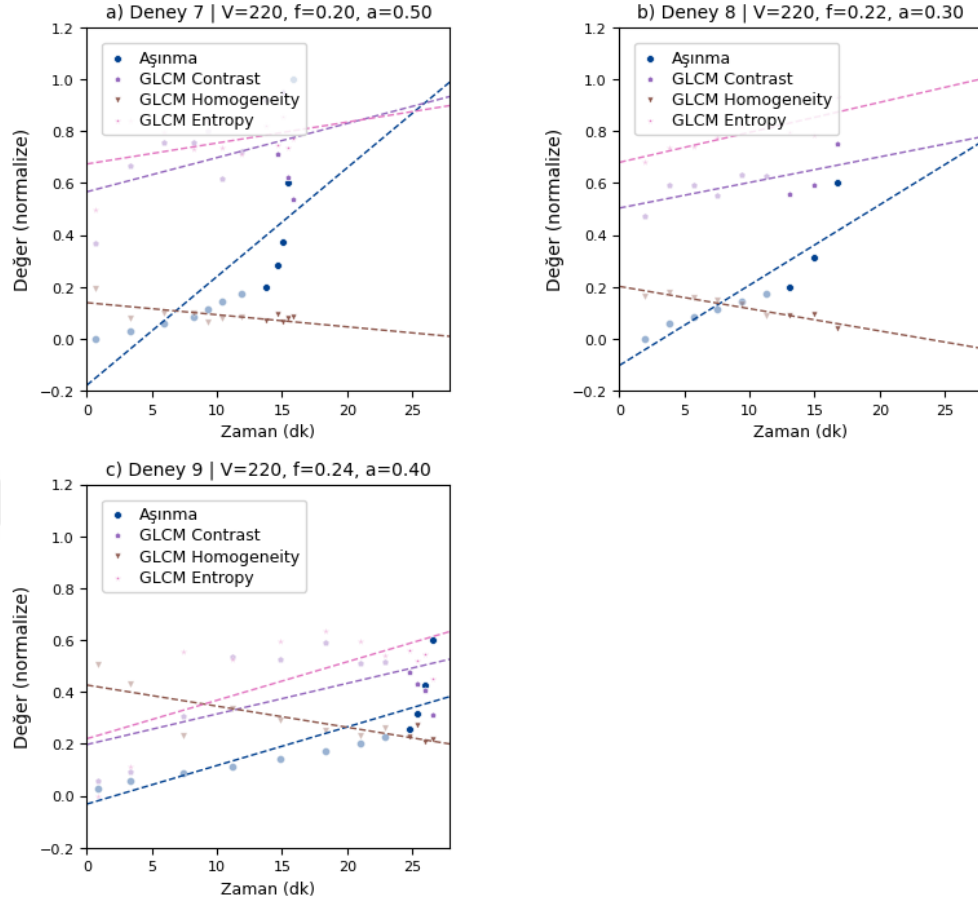
Şekil 44-45’te GLCM tabanlı özniteliklerin (Kontrast, Homojenlik, Entropi) fotoğraf temelli zamana bağlı değişimleri gösterilmiştir. Şekil 44.a (Deney 1) kapsamında Kontrast artış, Homojenlik azalış, Entropi artış yönlüdür. Şekil 44.b (Deney 2) koşullarında Kontrast ve Entropi artarken Homojenlik azalım eğilimindedir. Şekil 44.c (Deney 3) için Kontrast azalışa, Homojenlik artışa yönelmiş; Entropi’de azalış eğilimi gözlenmiştir. Şekil 44.d (Deney 4) bağlamında Kontrast ve Entropi artış yönünü korurken Homojenlik düşüş göstermektedir. Şekil 44.e (Deney 5) kapsamında Kontrast ile Homojenlik birlikte azalmış, Entropi artmıştır. Şekil 44.f (Deney 6) için Kontrast artış yönlü, Homojenlik artış yönlü, Entropi ise azalış yönlüdür. Şekil 45.a (Deney 7) bağlamında Kontrast azalış, Homojenlik artış, Entropi azalış yönlüdür. Şekil 45.b (Deney 8) kapsamında Kontrast ve Entropi artarken Homojenlik azalmaktadır. Şekil 45.c (Deney 9) için Kontrast ile Entropi artış yönünde, Homojenlik azalış yönündedir. Foto-GLCM için Düz.R² ortalamaları Kontrast 0,3047; Homojenlik 0,4758; Entropi 0,2311 olarak hesaplanmıştır.

GLCM (video) — normalize=global — 3x2 [[1, 2, 3, 4, 5, 6]]



Şekil 42. Deney 1-6 için Video karelerinden elde edilmiş GLCM ozniteliklerinin aşınma ile zamana bağlı değişimi ve eğilimleri

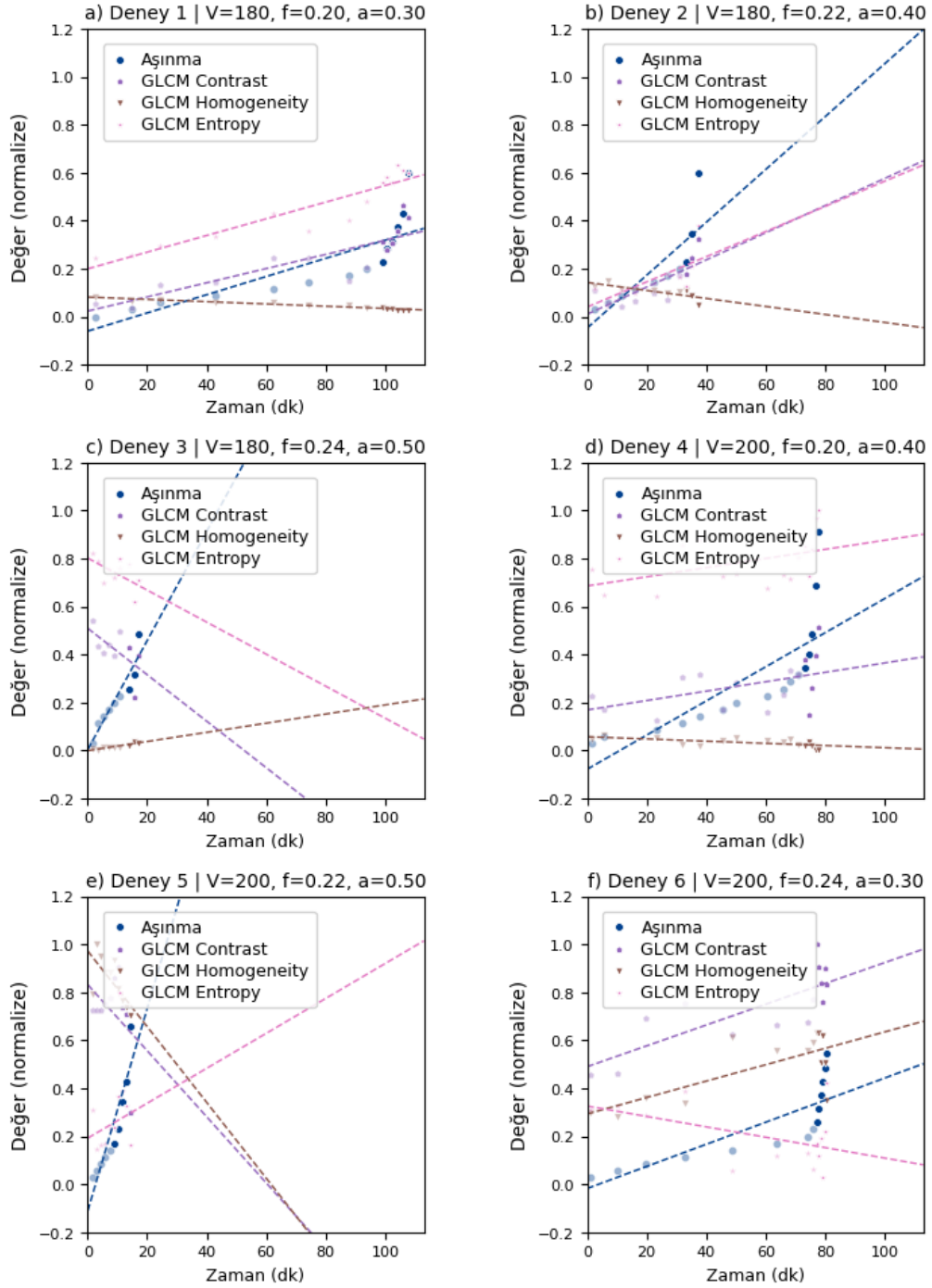
GLCM (video) — normalize=global — 2x2 [[7, 8, 9]]



Şekil 43. Deney 7-9 için Video karelerinden elde edilmiş GLCM özniteliklerinin aşınma ile zamana bağlı değişimi ve eğilimleri

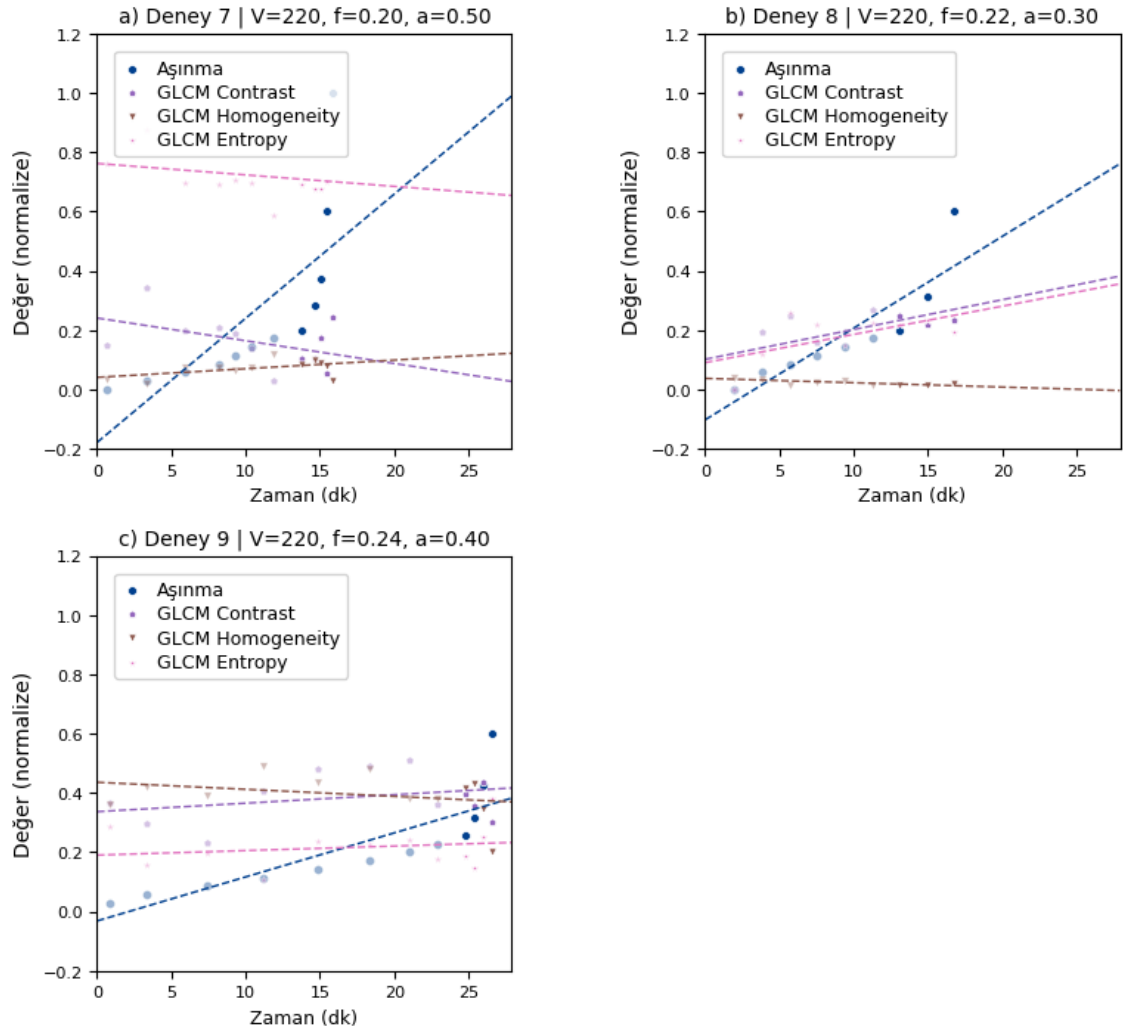
Video ve fotoğraf verilerinden elde edilen GLCM öznitelikleri, özellikle Homojenlik'in her iki kaynakta da en yüksek Düz.R² değerlerini vermesiyle öne çıkmıştır. Ancak foto-video kıyaslamasında GLCM öznitelikleri belirgin farklılık göstermiştir: Homojenlik %15, Kontrast %26 ve Entropi %37 oranında fotoğrafta düşüş kaydetmiştir. FSG kümesinde ise Fourier özniteliği %31 oranında artış gösterirken, Gauss (-%9) ve Sinüs (-%7) görece küçük farklarla benzer değerler üretmiştir. Bu tablo, GLCM'nin daha yüksek uyum sağladığını ancak veri türüne daha duyarlı olduğunu; FSG özniteliklerinin ise mutlak değerleri daha düşük olmakla birlikte foto ve video arasında daha tutarlı davranış sergilediğini göstermektedir.

GLCM (foto) — normalize=global — 3x2 [[1, 2, 3, 4, 5, 6]]



Şekil 44. Deney 1-6 için Foto karelerinden elde edilmiş GLCM ozniteliklerinin aşınma ile zamana bağlı değişimi ve eğilimleri

GLCM (foto) — normalize=global — 2x2 [[7, 8, 9]]



Şekil 45. Deney 7-9 için Foto karelerinden elde edilmiş GLCM ozniteliklerinin aşınma ile zamana bağlı değişimi ve eğilimleri

Tablo 11. Öznitelik Uyum Tablosu Regresyondan elde edilen Düz.R² ve Eğim Değerleri

Den. No	V (m/dk)	f (mm/dev)	a (mm)	Aşınma			Özgün Öznitelikler						Gri Seviye Dönüşüm Matrisi Öznitelikleri					
				Ömür (dk)	Aşınma Düz. R ²	Aşınma Eğim	Fourier Genlik Düz.R ²	Fourier Genlik Eğim	Sinus Düz. R ²	Sinus Eğim	Gauss Düz. R ²	Gauss Eğim	GLCM Ent. Düz.R ²	GLCM Ent. Eğim	GLCM Hom. Düz.R ²	GLCM Hom. Eğim	GLCM Kontrast Düz.R ²	GLCM Kontrast Eğim
				Video Karelerinden Çıkarılan Öznitelikler														
1	180	0,2	0,3	96.36	0,6655	0,0038	0,509	0,0041	0,0632	0,0015	0,4434	0,0046	0,8752	0,0035	0,9466	-0,0021	0,6904	0,0028
2	180	0,22	0,4	33.15	0,6208	0,011	-0,125	0	0,2099	-0,0079	-0,1121	0,0012	-0,0972	0,0008	0,1589	-0,0026	0,7041	-0,0039
3	180	0,24	0,5	10.59	0,8681	0,0227	0,3522	-0,0078	0,3616	0,0216	0,193	0,0146	-0,1067	-0,0011	0,2832	0,0014	0,2252	-0,0028
4	200	0,2	0,4	60.41	0,5601	0,0071	0,3418	0,0041	-0,0617	0,0008	0,5768	0,004	0,5541	0,0038	0,7009	-0,0017	0,4768	0,003
5	200	0,22	0,5	10.17	0,8179	0,0422	0,1187	0,0167	0,1366	0,022	0,396	0,0397	0,3409	0,0096	0,5666	-0,0219	0,1852	0,0114
6	200	0,24	0,3	75.77	0,6457	0,0046	0,28	0,0026	0,4855	0,0061	0,2986	0,0044	0,5293	0,0024	0,484	-0,0014	0,6508	0,005
7	220	0,2	0,5	14.18	0,4864	0,0419	-0,0939	0,0034	0,0821	-0,0126	0,0601	0,0101	0,0995	0,0081	0,3867	-0,0047	0,0902	0,0132
8	220	0,22	0,3	14	0,7396	0,031	0,0087	0,0052	0,4214	-0,0181	0,4626	0,0179	0,6727	0,0116	0,8722	-0,0086	0,3704	0,0099
9	220	0,24	0,4	22.94	0,6576	0,0149	0,3727	0,0239	0,0264	-0,0031	-0,1	0	0,4126	0,0148	0,6358	-0,0081	0,3305	0,0118
Ort.				-			0,196	0,0058	0,1917	0,0012	0,2465	0,0107	0,3645	0,0059	0,5594	-0,0055	0,4137	0,0056
Den. No	V (m/dk)	f (mm/)	a (mm)	Ömür (dk)	Aşınma Düz.R ²	Aşınma Eğim	Fotoğraf Öznitelikleri											
							Fourier Genlik Düz.R ²	Fourier Genlik Eğim	Sinus Düz. R ²	Sinus Eğim	Gauss Düz. R ²	Gauss Eğim	GLCM Ent. Düz.R ²	GLCM Ent. Eğim	GLCM Hom. Düz.R ²	GLCM Hom. Eğim	GLCM Kontrast Düz.R ²	GLCM Kontrast Eğim
							Video Karelerinden Çıkarılan Öznitelikler											
1	180	0,2	0,3	96.36	0,6655	0,0038	0,6526	0,0046	0,1628	0,0005	0,4251	0,0049	0,8543	0,0035	0,9337	-0,0005	0,7187	0,003
2	180	0,22	0,4	33.15	0,6208	0,011	0,5734	0,0099	0,2978	-0,001	0,319	0,007	0,445	0,0052	0,59	-0,0017	0,5237	0,0057
3	180	0,24	0,5	10.59	0,8681	0,0227	-0,0163	-0,0078	0,0657	0,0032	0,1858	0,0121	0,261	-0,0067	0,859	0,0019	0,2672	-0,0097
4	200	0,2	0,4	60.41	0,5601	0,0071	-0,0655	-0,0007	-0,0714	0	0,3414	0,0044	0,1558	0,0019	0,3765	-0,0005	0,1681	0,002
5	200	0,22	0,5	10.17	0,8179	0,0422	0,347	0,0239	-0,076	0,0019	0,3995	0,033	0,0073	0,0073	0,4021	-0,0158	0,0252	-0,0138
6	200	0,24	0,3	75.77	0,6457	0,0046	0,4057	-0,0065	0,4936	0,0014	0,4588	0,005	0,1857	-0,0022	0,5176	0,0034	0,6006	0,0043
7	220	0,2	0,5	14.18	0,4864	0,0419	0,0377	0,014	0,4401	-0,0052	-0,0564	0,0045	-0,0472	-0,0039	0,1739	0,0029	0,1195	-0,0077
8	220	0,22	0,3	14	0,7396	0,031	0,0816	0,0138	0,3663	0,0263	-0,0802	0,0021	0,2755	0,0095	0,4353	-0,0015	0,3133	0,0101
9	220	0,24	0,4	22.94	0,6576	0,0149	0,2872	0,01	-0,0706	0,0004	0,0279	0,0048	-0,0576	0,0015	-0,0062	-0,0024	0,0057	0,0029
Ort.				-			0,2559	0,0068	0,1787	0,0031	0,2246	0,0086	0,2311	0,0018	0,4758	-0,0016	0,3047	-0,0004

Ancak yalnızca Düz. R^2 değerleri özniteliklerin başarısını tam olarak açıklamaya yetmemektedir; zira yüksek uyum, değişimin istikrarlı olduğu kadar durağan kalmasından da kaynaklanabilir. Ayrıca farklı parametrelerin etkisiyle öznitelikler farklı şekillerde yüksek uyum sağlayabilmektedir. Nitekim Şekil 38-45'te görüldüğü üzere FSG öznitelikleri çoğunlukla yukarı yönlü eğilim sergilerken, GLCM öznitelikleri özellikle Homojenlik'de daha tutarsız dalgalanmalar göstermektedir. Bu nedenle bir sonraki bölümde, eğim analizine geçilerek özniteliklerin zamana bağlı tepkisellikleri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

Özniteliklerin dinamik davranışlarını incelemek için takım ömrü temel alınmıştır. Deneylerde hızlı aşınmaya geçiş anı “takım ömrü” olarak kabul edilmiş ve deneyler bu değerlere göre sıralanmıştır (Deney 1: 96,36 dk; Deney 6: 75,77 dk; Deney 4: 60,41 dk; Deney 2: 33,15 dk; Deney 9: 22,94 dk; Deney 7: 14,18 dk; Deney 8: 14,00 dk; Deney 3: 10,59 dk; Deney 5: 10,17 dk). Bu sıralama x ekseninde takım ömrünü temsil ederken, y eksenlerinde ise her bir öznitelik için ilgili deneylerdeki uyum değeri (Düz. R^2), eğim değeri ve aşınma eğimi gösterilmiştir.

Dinamik analizde amaç, özniteliklerin zamana bağlı performanslarının takım ömrü ile nasıl değiştiğini incelemektir. Bu kapsamda özellikle (i) Düz. R^2 değerlerinin ömürle birlikte nasıl arttığı ya da azaldığı, (ii) öznitelik eğimlerinin aşınma eğimi ile ne ölçüde uyum sağladığı değerlendirilmiştir. Böylelikle özniteliklerin hem uzun gözlem sürelerinde kararlılığı hem de hızlı aşınma dönemlerindeki tepkiselliği hakkında nicel metrikler çıkarılmış ve yorum yapılmıştır.

Her öznitelik için Dinamik Uyum (deney bazında özniteliliğin uyumu; Düz. R^2), Dinamik Uyum Eğimi (Düz. R^2 'nin ömürle değişim hızı) ve Dinamik Eğimin Eğimi (öznitelik iç-eğiminin ömürle değişim hızı) nicel olarak çıkarılmış ve yorumlanmıştır. Şekil 46–47, öznitelik performansının takım ömrü ile değişimini özetlemektedir. Dinamik Uyum açısından Düz. R^2 seviyeleri genel olarak olumludur ve doku-tabanlı ölçütler öne çıkar: GLCM Kontrast'ta video için 0,5720, foto için 0,4772; GLCM Entropi'de video 0,2952, foto 0,3230; FSG tarafında Gauss-foto 0,3534 ve Fourier-video 0,2204 dikkat çekmektedir (Sinüs değerleri zayıf/negatiftir). Ayrıca Dinamik Uyum Eğimi çoğu öznitelikte pozitifdir; özellikle Kontrast-video (+0,0093), Kontrast-foto (+0,0083) ve Gauss-foto (+0,0081) ömür uzadıkça açıklayıcılığın (Düz. R^2) belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Karşılaştırma zemini olarak kullanılan Dinamik Aşınma eğimi=-0,0101'dir.

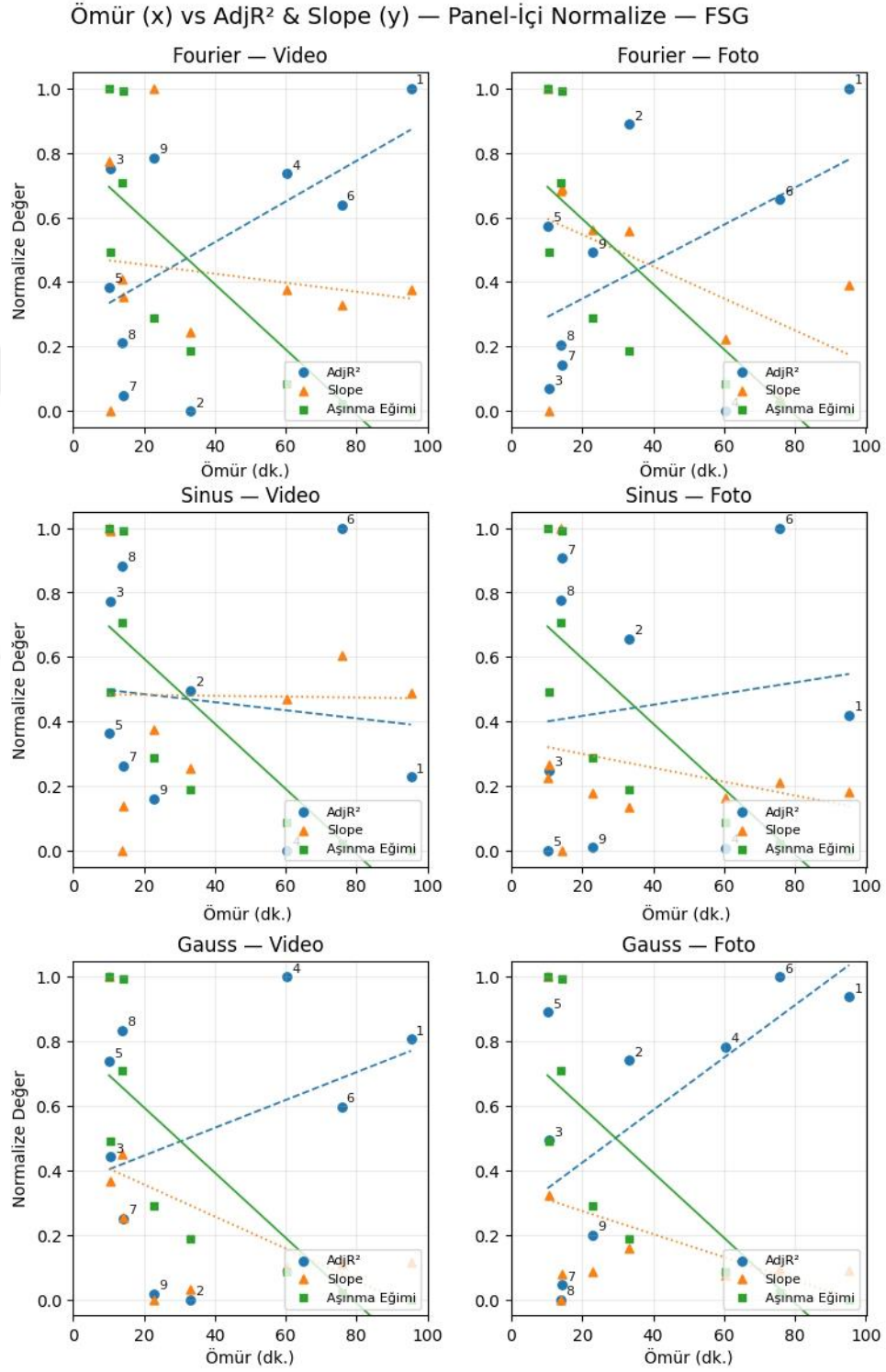
Dinamik Eğimin Eğimi ile aşınma eğimi (-0,0101) kıyaslandığında, aynı işareti taşıyan ve büyüklükçe |Aşınma eğimi|'ne yaklaşan öznitelikler benzer hizalanma göstermektedir. Bu bakımdan Gauss-video (-0,0050), Fourier-foto (-0,0049), Entropi-video (-0,0041), Kontrast-video (-0,0036) ve Gauss-foto (-0,0036) güçlü uyum sergiler; yani ömür uzadıkça öznitelik iç-eğiminin azalması, aşınmanın genel yavaşlama yönüyle tutarlıdır. Buna karşılık Kontrast-foto (+0,0046) ile Homojenlik -video (+0,0041) ve Homojenlik -foto (+0,0031) pozitif değerleriyle ters işaretli bir davranış ortaya koyar; bu durum, söz konusu özniteliklerin ömür boyunca artan bir iç-eğimle aşınma dinamiğini izlediğini düşündürür. Ayrıntılı sayısal değerler Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Özniteliklerin dinamik davranış değerleri

Öznitelik	Kaynak	Dinamik Uyum Düz. R ²	Dinamik Uyum Eğimi	Dinamik Eğim Düz. R ²	Dinamik eğimin Eğimi	Dinamik Aşınma Düz. R ²	Dinamik Aşınma Eğimi
Fourier	Video	0.2204	0.0063	-0.1164	-0.0014	0.6046	-0.0101
Fourier	Foto	0.1464	0.0057	0.1214	-0.0049	0.6046	-0.0101
Sinus	Video	-0.1279	-0.0013	-0.1427	-0.0001	0.6046	-0.0101
Sinus	Foto	-0.1214	0.0017	-0.0774	-0.0021	0.6046	-0.0101
Gauss	Video	0.0195	0.0043	0.1495	-0.0050	0.6046	-0.0101
Gauss	Foto	0.3534	0.0081	0.0129	-0.0036	0.6046	-0.0101
GLCM Kontrast	Video	0.5720	0.0093	-0.0326	-0.0036	0.6046	-0.0101
GLCM Kontrast	Foto	0.4772	0.0083	0.0757	0.0046	0.6046	-0.0101
GLCM Homojenlik	Video	0.0490	0.0043	0.0808	0.0041	0.6046	-0.0101
GLCM Homojenlik	Foto	0.0597	0.0042	-0.0200	0.0031	0.6046	-0.0101
GLCM Entropi	Video	0.2952	0.0067	0.0281	-0.0041	0.6046	-0.0101
GLCM Entropi	Foto	0.3230	0.0063	-0.1422	-0.0002	0.6046	-0.0101

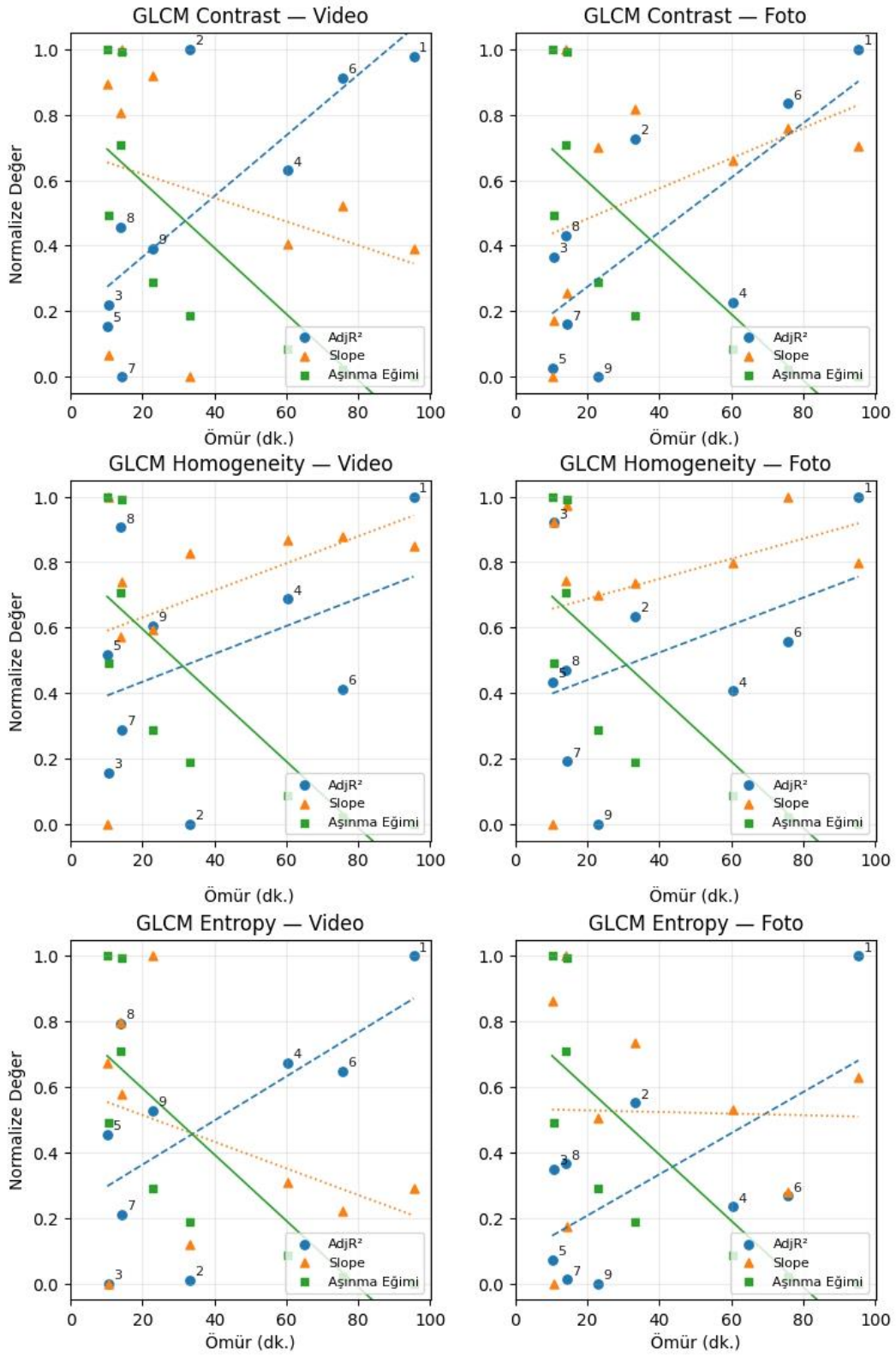
Şekil 48, Deney 1–9 için FSG özniteliklerinin zaman eksenindeki doğrusal uyum çizgilerini birlikte sunarak deneyler arası dinamik farkları görünür kılmaktadır. Fourier genlik grafiğinde (Şekil 48.a) çizgilerin büyük kısmı artış yönlü olup eğim büyüklükleri deneyden deneye ılımlı farklılık göstermektedir. Bu görünüm, Fourier'ın gürültüye görece dayanıklı yapısıyla uyumlu olarak takım ömrü boyunca kararlı bir artış eğilimine işaret etmektedir. Sinüs E_{RMS} 'de (Şekil 48.b) çizgiler yatay ya da hafif azalış yönünde toplanmış, deneyler arası ayrışma sınırlı kalmıştır. Bu zayıf tepki, mevcut veride ara-bant düzensizliklerin baskın olmamasıyla ilişkilendirilebilir. Gauss E_{RMS} (Şekil 48.c) çizgileri

ise belirgin biçimde yukarı yönlüdür ve deneyler arasında daha güçlü ayrışma sergilemiştir; özellikle kısa ömürlü/hızlı aşınma koşullarında eğimlerin dikleşmesi, dikkat çekmiştir.

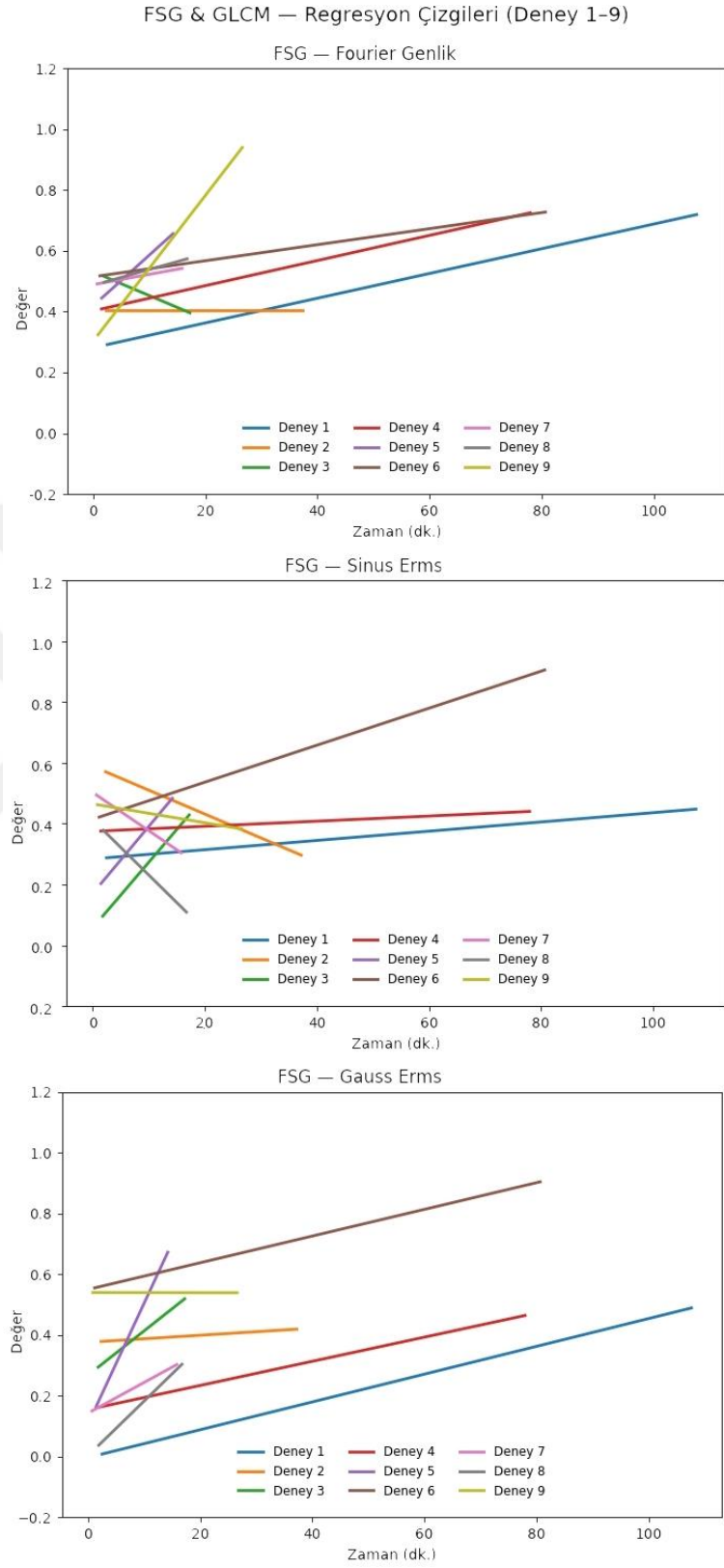


Şekil 46. Özniteliklerin Düz.R² ve eğim değerlerinin, takım ömrü ile ilişkisinin gösterilmesi

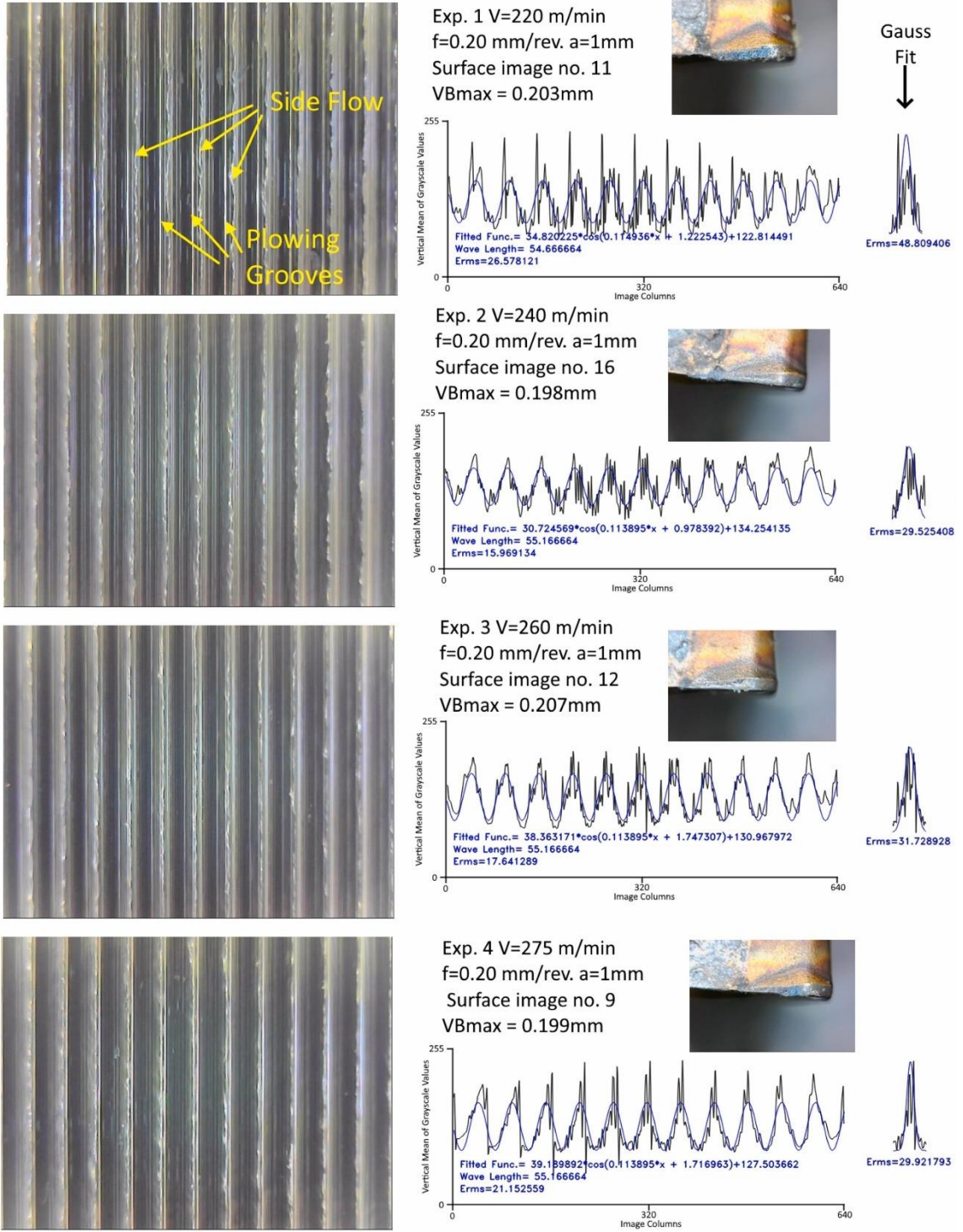
Ömür (x) vs AdjR² & Slope (y) — Panel-İçi Normalize — GLCM —



Şekil 47. Özniteliklerin Düz.R² ve eğim değerlerinin, takım ömrü ile ilişkisinin gösterilmesi



Şekil 48. Fourier Genlik, Sinus E_{RMS} ve Gauss E_{RMS} özniteliklerinin uyum çizgilerinin deney bazında gösterilmesi

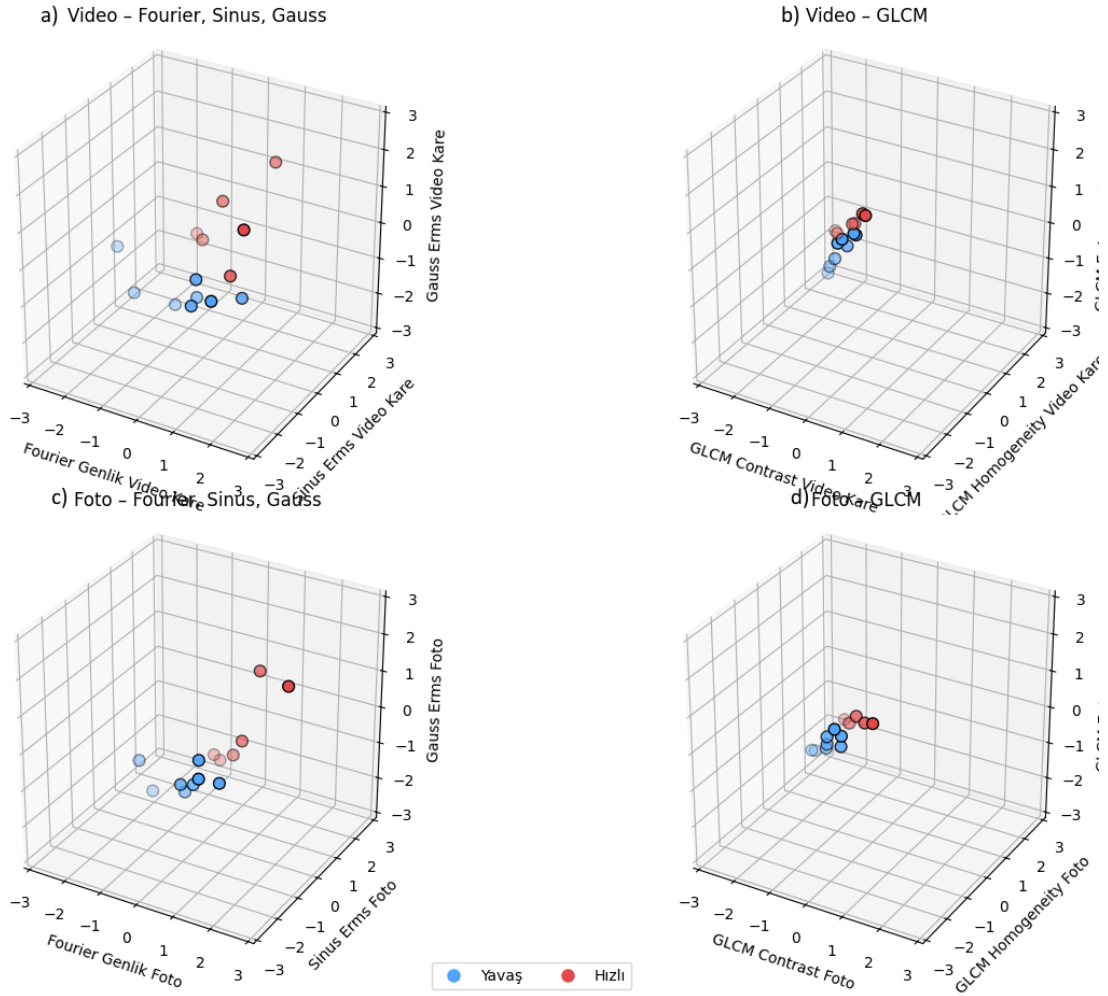


Şekil 49. Sinus Erms ve Gauss Erms öznelitliklerinin Farklı tür aşınmalara tepkileri (Küllaç ve Çuvalcı,2025)

Önceki çalışmalarda (Küllaç ve Çuvalcı, 2025) ara-bant düzensizlikler(yan akış(side-flow), oyuk izleri(plowing groove)) bulunduğunda Sinüs öznelitiğinin bu yapıları tek bir harmonikle temsil etmesi sayesinde daha duyarlı tepki verdiği raporlanmıştır. Nitekim Şekil 49’da da görüldüğü üzere, Sinüs ERMS ve Gauss ERMS aynı aşınma seviyelerinde

farklı aşınma tiplerine farklı tepkiler göstermektedir. Ancak mevcut veride bu tür düzensizliklerin sistematik olarak gözlenmemesi, Sinüs'ün sınırlı kalması ve buna karşılık Gauss'un baskın çıkmasıyla sonuçlanmıştır. Fourier ise tüm profilin enerji dağılımını özetlemesi ve gürültüye daha az duyarlı yapısıyla ölçekten bağımsız, istikrarlı bir artış üretmiştir.

Deney 1 | $V=180$ m/dk, $f=0.20$ mm/dev, $a=0.30$ mm - 3D Karşılaştırma (global/zscore)



Şekil 50. Özniteliklerin üçerli grup halinde(FSG vs GLCM) gösterilmesi. Üst Video Kareleri alt Fotoğraflar

Bu bölümde raporlanan uyum sonuçlarıyla tutarlı olarak, FSG ve GLCM özniteliklerinin görece iyi uyum sergilediği görülmüştür. Bu durum, yüksek uyum ortalamasına sahip deneylerden biri olan Deney 1'in üç boyutlu öznitelik uzayı gösteriminde de izlenmektedir (Şekil 50). Z-skor normalize edilmiş noktalarda kırmızılar hızlı, maviler yavaş aşınmayı temsil etmektedir. Video-GLCM grafiklerinde örneklerin

Kontrast-Entropi doğrultusunda daha kompakt ve net ayrıştığı, FSG tarafında ise ayrışmanın özellikle Gauss eksenini boyunca belirginleştiği, Sinüs ekseninin katkısının ise sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Fotoğraf temelli grafiklerde ayırım yönleri videoyla örtüşmekte, ancak dağılım hacmi daha dar bir aralığa sıkışmaktadır. Bu benzerlik, çalışmada kullanılan video karelerine dayalı işleme hattının hem zamansal açıdan istikrarlı, hem de görüntü türleri arasında genellenebilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yalnızca regresyon uyumu ve görsel kümelenme tek başına karar verdirici değildir; sınıf sınırlarının geometrisi ve olası örtüşmelerin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle bir sonraki bölümde, öznitelik uzayının ayrışabilirliği destek vektör makineleri (SVM) ile nicel olarak sınanmış ve performans bulguları tartışılmıştır.

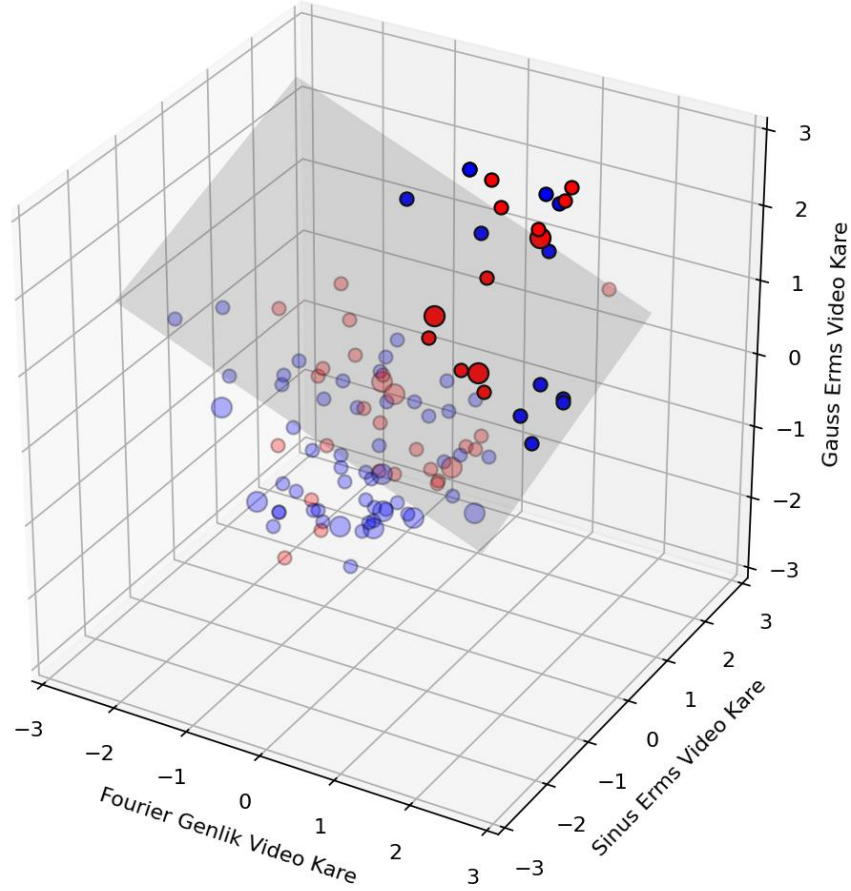
3.1. Destek Vektör Makinası (SVM) Sınıflandırması

Bu çalışmanın ikinci aşamasında amaç, çıkarılan özniteliklerin hızlı/yavaş aşınma ayırımındaki sınıflandırma performanslarını incelemektir. Bu amaçla, doğrusal karar yüzeyleri ile yüksek genelleme kapasitesine sahip olan Destek Vektör Makineleri (SVM) tercih edilmiştir. Yöntemde, her bir deneyin bağımsız tutulduğu Leave-One-Experiment-Out (LOEO) protokolü izlenmiş; böylece veri sızıntısı engellenmiş ve deneyler arası genelleme yeteneği tarafsız biçimde test edilmiştir.

Sınıflandırıcı, scikit-learn kütüphanesindeki SVC(kernel="linear") ile kurulmuş; veri ölçekleme için "StandardScaler", boyut indirgeme ve görselleştirme için PCA, değerlendirme içinse doğruluk (Accuracy) ve F1 skoru esas alınmıştır. Pozitif sınıf hızlı aşınma (1) olarak tanımlanmış, performans ölçümleri karışıklık matrisleri üzerinden hesaplanmıştır. Doğruluk tüm örnekler üzerinden genel başarıyı yansıtırken, F1 hızlı aşınma sınıfındaki yakalama gücü ve yanlış alarmların birlikte değerlendirilebilmesini sağlamaktadır.

Bu yönetsel çerçeve altında, ilk olarak FSG (Fourier, Sinüs, Gauss) ve GLCM öznitelik setleri video ve fotoğraf verileri için ayrı ayrı test edilmiş, ardından tüm altı özneliğin birlikte kullanıldığı senaryolar değerlendirilmiştir. Sonuçlar Tablo 14 ve Tablo 15'te sunulmuş, öznelik setleri ve veri türleri arasındaki farklılıklar nicel olarak karşılaştırılmıştır. Bu bölümde sunulan sınıflandırma grafiklerinin yanı sıra tüm deneylere ait sınıflandırma grafikleri EK'ler bölümünde sunulmuştur.

[standard] Deney 1 | V=180.0 m/dk, f=0.22 mm/dev, a=0.4 mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms

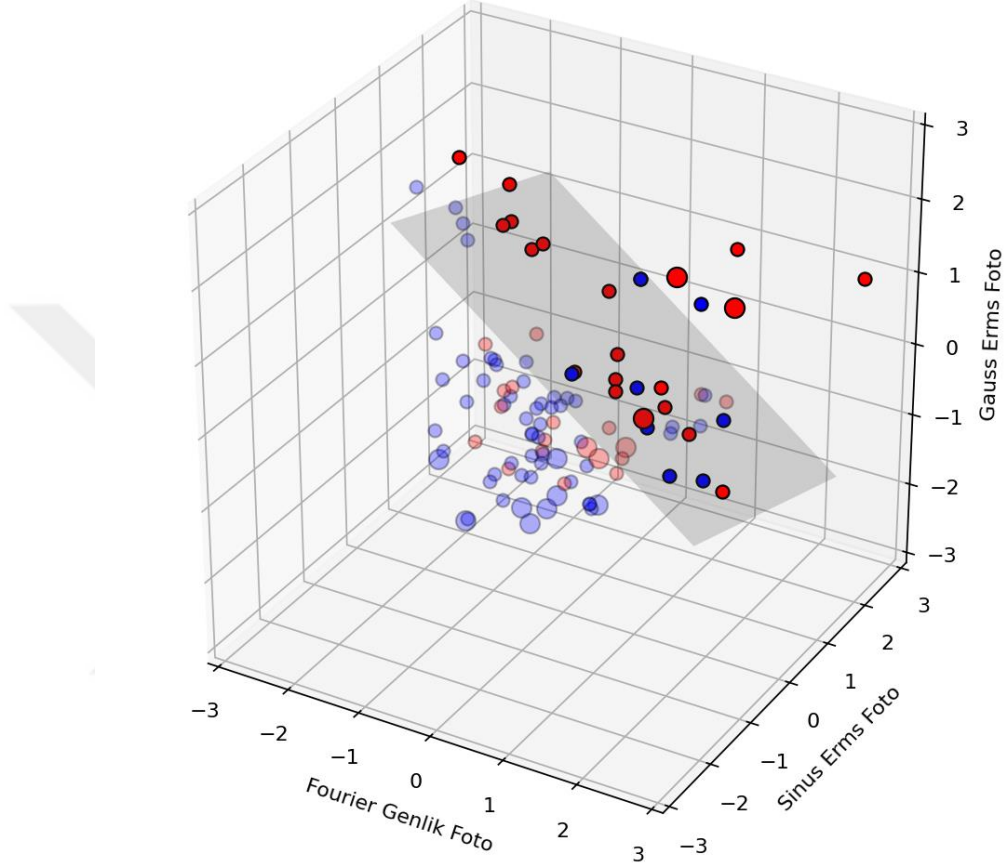


Şekil 51. Deney 1 e ait Video karelerinden edinilen FSG öznelik uzayı ve sınıflandırma düzlemi

Şekil 51’de Deney 1 için FSG (Fourier, Sinüs, Gauss) özneliklerinin video temelli üç boyutlu uzaydaki dağılımları ile doğrusal karar düzlemleri sunulmuştur. Deney-1’de video üzerinden çıkarılan FSG öznelikleri, doğrusal SVM ile hızlı/yavaş aşınma ayırımında test kümesinde anlamlı bir başarı göstermiştir ($acc = 0.7857$, $F1 = 0.6667$). Karışıklık matrisi testte $TN=8$, $FP=0$, $FN=3$, $TP=3$ (Şekil 53) dağılımı vermektedir; bu da yanlış alarm üretmeyen (yüksek kesinlik) ancak pozitif sınıfı yarı yarıya yakalayan ($recall \approx 0.50$) muhafazakâr bir karar yüzeyine işaret eder ($acc=0.7857$, $F1=0.6667$). Eğitim kümesinde sınıflar arası örtüşme nedeniyle $acc = 0.6196$, $F1 = 0.3636$ ($TN=47$ $TP=10$, $FN=24$, $FP=11$) (Şekil 54) elde edilmiştir; bu durum veri dağılımında hızlı aşınma örneklerinin negatif sınıfa yakın kümелendiğini ve FN’lerin görece yüksek kaldığını işaret eder. Sonuç olarak, Deney-1’de Video–FSG seti testte tatmin edici genelleme sunmaktadır. Ayrıca aynı deneyde GLCM temelli kurulumların düşük F1 üretmesiyle

karşılaştırıldığında, FSG özneliklerinin video verisinde daha ayırt edici olduğu görülmektedir.

[standard] Deney 1 | V=180.0 m/dk, f=0.22 mm/dev, a=0.4 mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms

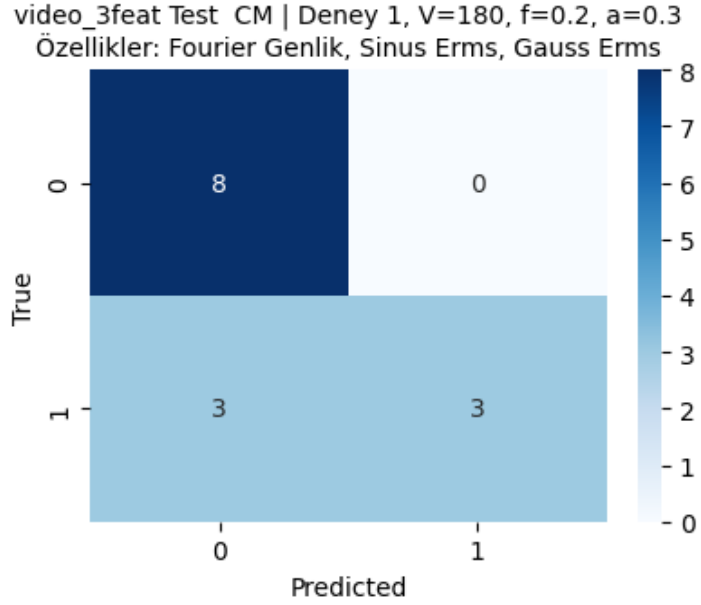


Şekil 52. Deney 1 e ait Foto karelerinden edinilen FSG öznelik uzayı ve sınıflandırma düzlemi

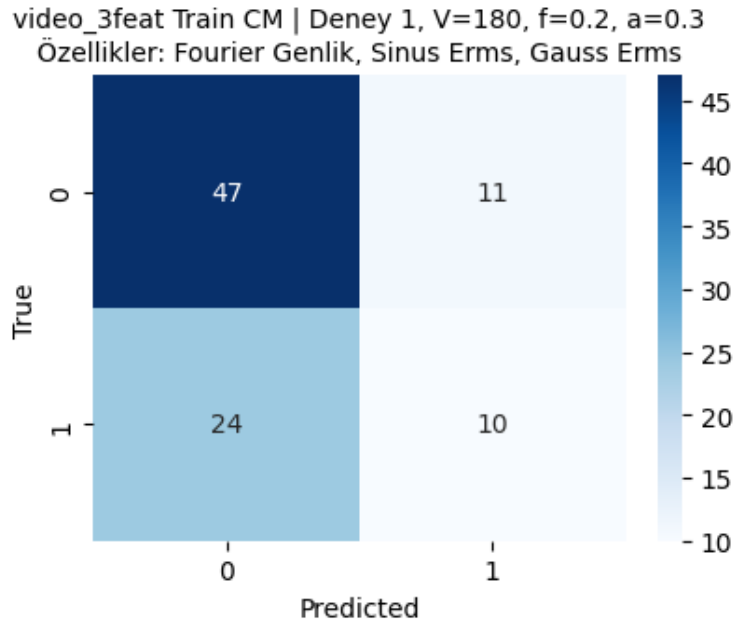
Şekil 55’te, Deney-1’in fotoğraf tabanlı FSG (Fourier Genlik, Sinüs ERMS, Gauss ERMS) özellik uzayı “StandardScaler” ile ölçeklenmiş olarak ve doğrusal SVM karar düzlemiyle birlikte gösterilmiştir. Hızlı aşınma örnekleri (kırmızı) özellikle Sinüs ve Gauss eksenleri boyunca daha yüksek değerlere kümelenme eğilimindedir; yavaş aşınma (mavi) ise daha düşük-orta bölgelerde toplanır. Karar düzlemi bu iki küme arasında eğimli bir ayırma sağlar; ara bölgede sınıf örtüşmesi görülür.

Bu dağılım, bir önceki Şekil 54’te sunulan Video–FSG karışıklık matrisiyle uyumludur: her iki veri türünde de pozitif sınıfı yakalama kısmı ($\text{recall} \approx 0.50$) fakat yanlış alarm düşüktür (testte $\text{FP}=0$). Nicel olarak Foto–FSG test başarımları $\text{acc} = 0.7857$, $\text{F1} = 0.6667$ iken Video–FSG test değerleri de aynıdır ($0.7857 / 0.6667$). Eğitim tarafında

fotoğraf verisi Video-FSG'ye göre daha temiz bir ayırım sunar (Foto-FSG train: acc = 0.7391, F1 = 0.6000; Video-FSG train: acc = 0.6196, F1 = 0.3636; bkz. Tablo 14).

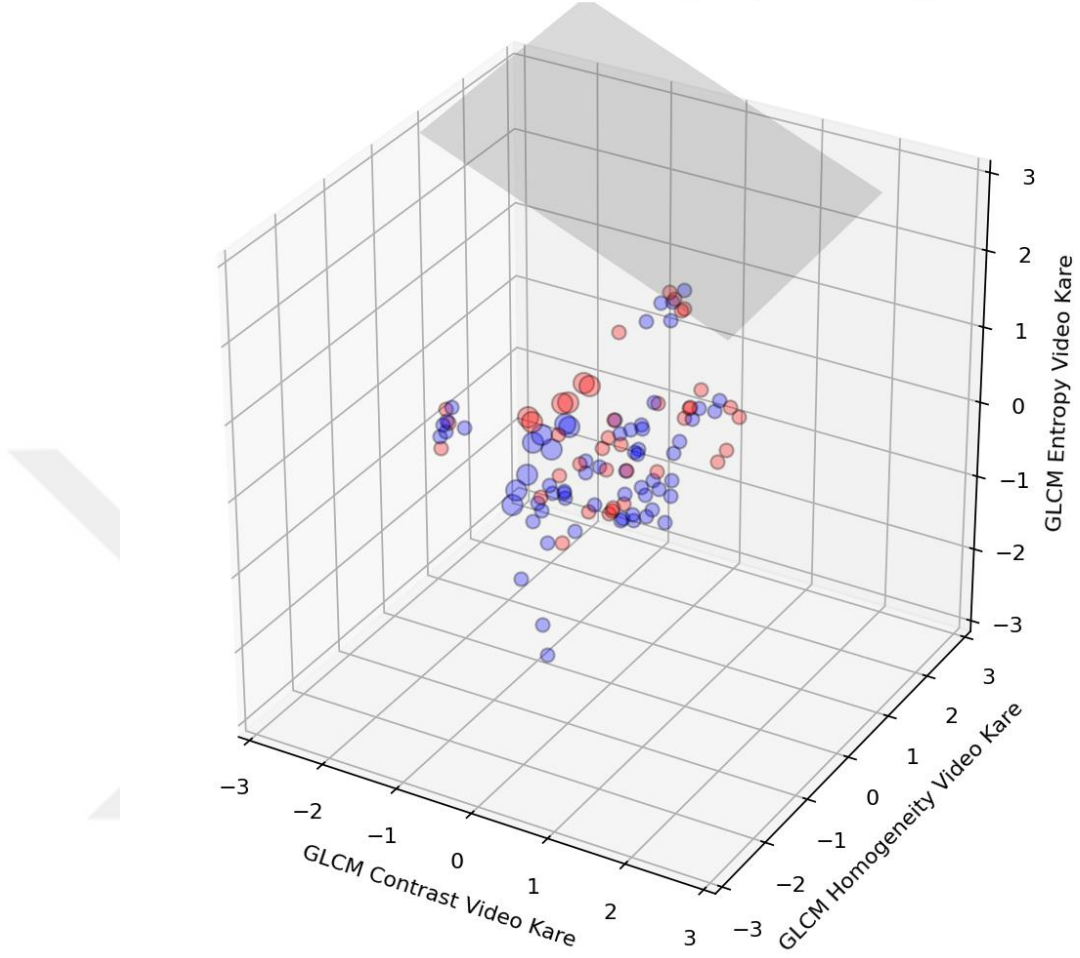


Şekil 53. Deney 1'e ait Video karelerinden edinilen FSG öznelik uzayında test verilerinin sınıflandırma performansı



Şekil 54. Deney 1'e ait Video karelerinden edinilen FSG öznelik uzayında eğitim verilerinin sınıflandırma performansı

[standard] Deney 1 | V=180.0 m/dk, f=0.22 mm/dev, a=0.4 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



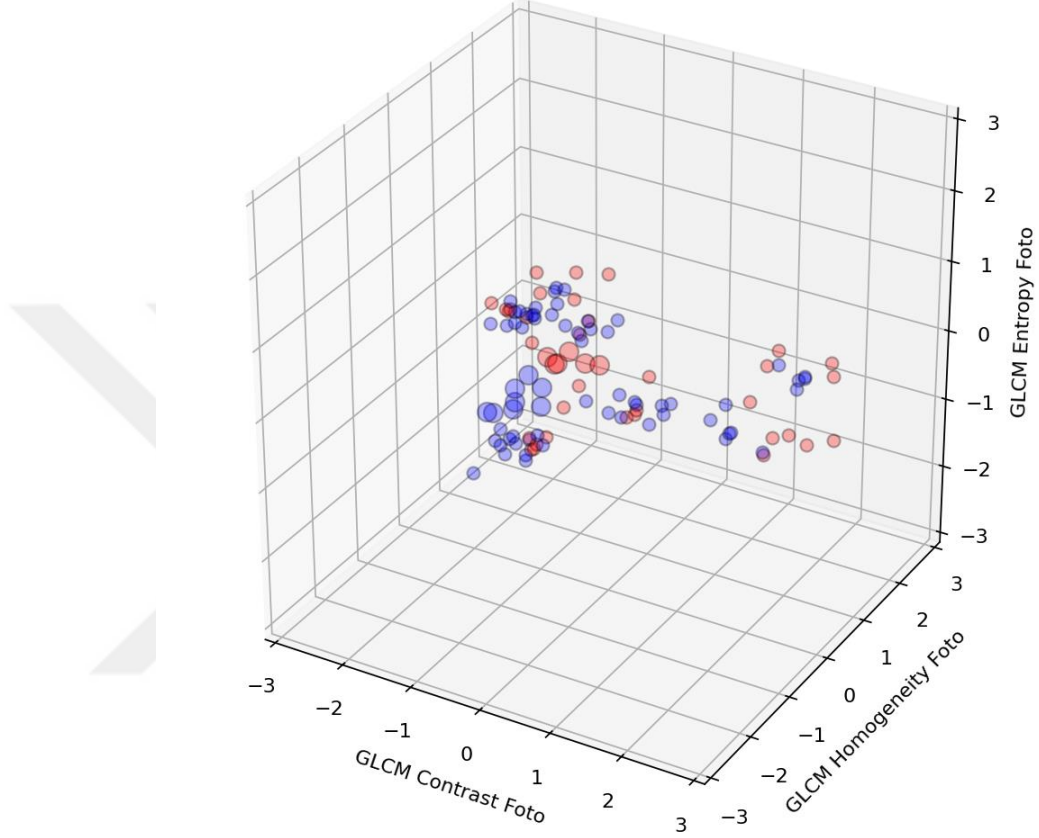
Şekil 55. Deney 1 e ait Video karelerinden edinilen GLCM öznelik uzayı ve sınıflandırma düzlemi

Şekil 55’te, Deney-1’in video-GLCM (Kontrast, Homojenlik, Entropi) öznelik uzayı “StandardScaler” ile ölçeklenmiş olarak ve doğrusal SVM karar düzlemiyle birlikte verilmiştir. Nokta bulutu, üç eksen de sıkı bir örtüşme sergilemekte; hızlı aşınma (kırmızı) ve yavaş aşınma (mavi) örnekleri özellikle düşük–orta değer bölgelerinde iç içe kümelenmektedir. Karar düzlemi bulutun üst tarafında konumlanmakta ve ara bölgede ayırım hattı belirginleşmemektedir.

Bu yapı, Video-FSG (Şekil 51) ile tezat oluşturur. FSG’de testte $acc=0.7857$, $F1=0.6667$ ile anlamlı bir ayırım varken, GLCM’de SVM pozitif sınıfı yakalayamamış ve karar yüzeyi negatif tarafa yığılma göstermiştir. Bu fark doğrudan dağılımın

niteliğinden kaynaklanır: GLCM eksenlerinde sınıf kümeleri belirginleşmediği için doğrusal ayırma yeterince güçlenememiştir.

[standard] Deney 1 | V=180.0 m/dk, f=0.22 mm/dev, a=0.4 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy

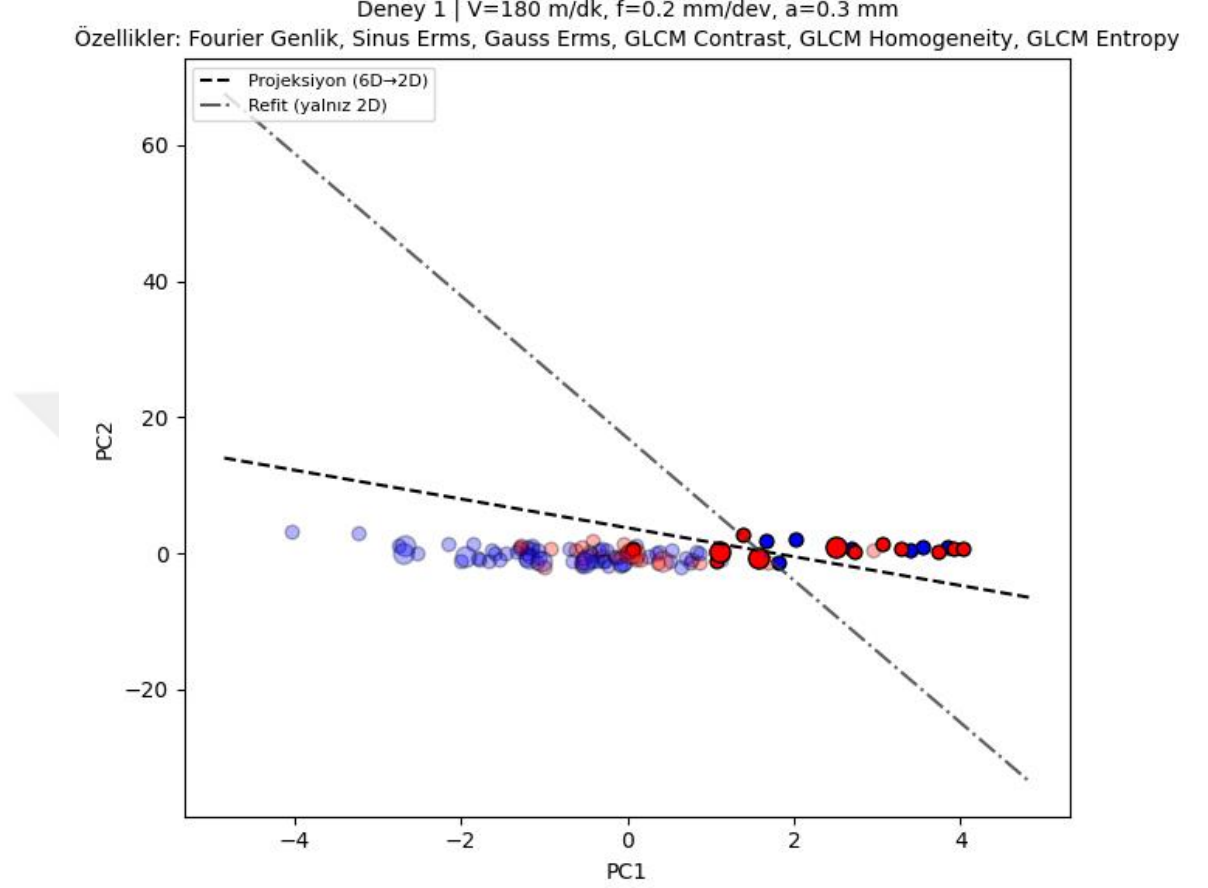


Şekil 56. Deney 1 e ait Foto karelerinden edinilen GLCM öznitelik uzay (sınıflandırma düzlemi linear ayırışma yapılamadığı için grafiğin dışında kalmıştır.)

Tablo 14 rakamları bu gözlemi doğrular: Video-GLCM test için $acc = 0.5714$, $F1 = 0.0000$; eğitim için $acc = 0.6304$, $F1 = 0.0000$. Testte $TP=0$ olduğu için model pozitif sınıfı hiç tespit edememiş, yalnızca çoğunluk sınıfını (negatif) seçerek yanlış alarmı düşük tutmuş ama duyarlılığı sıfıra düşürmüştür. Bu sonuç, Deney-1 özelinde GLCM özniteliklerinin video verisinde tek başına yeterli ayırt edicilik sunmadığını, FSG'nin ise anlamlı katkı sağladığını göstermektedir.

Şekil 56'da, Deney-1'in foto-GLCM (Kontrast, Homojenlik, Entropi) öznitelik uzayı "StandardScaler" ile ölçeklenmiş olarak verilmektedir. Nokta bulutu üç eksen de yoğun örtüşme sergiler; hızlı (kırmızı) ve yavaş (mavi) örnekler özellikle düşük-orta

değer bölgelerinde iç içe dağılmaktadır. Bu nedenle doğrusal bir ayırım hattı belirginleşmemektedir.



Şekil 57. Deney 6 ya ait 6 boyutlu öznelik alanının 2 boyut ta projeksiyonu ve ayırım düzleminin projeksiyonu

Tablo 14'e göre Foto-GLCM test için $acc = 0.5714$, $F1 = 0.0000$; eğitim için $acc = 0.6304$, $F1 = 0.0000$ 'dır. $F1$ 'in sıfır olması $TP=0$ 'a işaret eder; model pozitif sınıfı yakalayamamış, çoğunluk sınıfına yönelmiştir. Deney-1 özelinde GLCM'nin tek başına ayırt ediciliği sınırlıdır; ayrıca Tablo 15'te görüldüğü gibi tüm 6 özelliği birlikte kullanmak da test başarımını artırmamış, FSG seviyesinde kalmıştır.

Şekil 57'de Deney-1 için altı öznelik (Fourier Genlik, Sinüs ERMS, Gauss ERMS, GLCM Kontrast, Homojenlik, Entropi) bir arada ele alınmış ve PCA uzayında (PC1-PC2) görselleştirilmiştir. Kesikli siyah çizgi 6-boyutlu doğrusal SVM hiperdüzleminin PCA düzlemine projeksiyonunu (Projeksiyon, 6D→2D), noktalı-kesikli çizgi ise sadece bu 2B veride yeniden eğitilen bir SVM'in sınırını (Refit, yalnız 2D)

göstermektedir. Noktaların büyük çoğunluğu PC2 etrafında dar bir bantta kaldığından, varyansın PC1’de yoğunlaştığı ve iki sınıfın 2B düzlemde belirgin örtüştüğü görülür.

Projeksiyon çizgisi (6D→2D), bulutun içinden ılımlı eğimli bir ayırım üretirken, yalnız 2D’de yeniden eğitilen sınırın çok daha dik ve veri bulutunun dışına taşan bir konuma kaydığı izlenir. Bu fark, ayırımın önemli bir kısmının PC3–PC6 bileşenlerinde kaldığını; yani 2B indirgeme ile bilgi kaybı yaşandığını gösterir. Dolayısıyla PCA grafiği yalnızca görselleştirme içindir; sınıflandırma için 6B uzayda eğitilen model esas alınmalıdır.

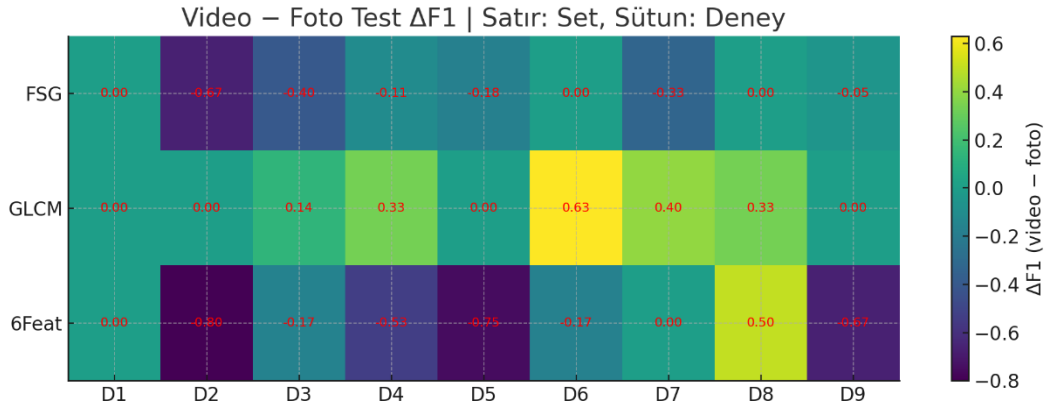
Tablo 15’teki test sonuçları ($acc=0.7857$, $F1=0.6667$) ve CM ($FP=0$, $FN=3$) modelin temkinli (yüksek kesinlik, sınırlı duyarlılık) davrandığını gösterir. PC1–PC2’deki yoğun örtüşmeye karşın 6B modelin F1 üretmesi, ayırt edici bilginin PC3–PC6’da bulunduğunu; dolayısıyla PCA görselleştirmenin yalnızca açıklayıcı, sınıflandırmanın ise tam 6B uzayda anlamlı olduğunu ortaya koyar.

LOEO protokolündeki tüm deneyler topluca değerlendirildiğinde, fotoğraf tabanlı kurulumların ortalama test başarımı video kurulumlarına göre daha yüksektir. Tablo 14–15’e göre FSG-Foto için ortalama $F1 \approx 0.51$, 6-Özellik-Foto için $F1 \approx 0.58$ elde edilmiştir. Buna karşılık FSG-Video ve 6-Özellik-Video kurulumları sırasıyla $F1 \approx 0.31$ ve $F1 \approx 0.29$ düzeyinde kalmıştır. Bu tablo, Deney-1’de gözlenen bulgunun (FSG’nin video ve foto için benzer test başarımı üretmesi) bütün deneylere genellenmediğini; genel resimde fotoğrafın daha istikrarlı ve yüksek F1 verdiğini göstermektedir (bkz. Tablo 14–15).

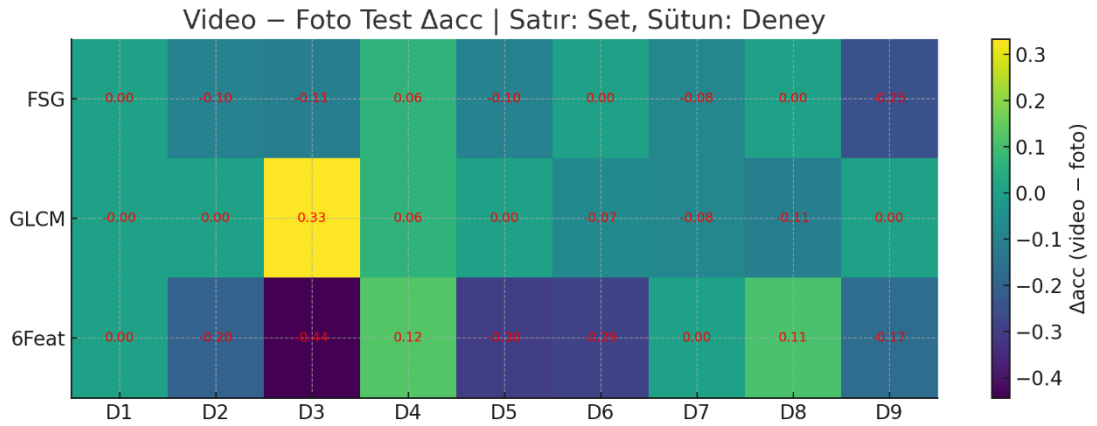
Öznitelik setleri sabit tutulduğunda, FSG (Fourier-Sinüs-Gauss) kümesi GLCM’ye kıyasla anlamlı biçimde üstün görünmektedir. Özellikle Foto-GLCM senaryosunda F1 değerleri düşük kalırken, Foto-FSG ve 6-Özellik-Foto sonuçları düzenli olarak daha yüksek düzeydedir. Bununla birlikte, tüm altı öz niteliğin birlikte kullanımı (FSG+GLCM) fotoğraf tarafında marjinal fakat pozitif bir katkı sağlamış; ortalama F1 FSG-Foto’ya göre $\approx +0.07$ artmıştır. Deney-1 gibi bazı tekil durumlarda bu katkı görünür olmayabilir; ancak deneyler arası ortalama etki pozitifdir (bkz. Tablo 14).

Deney bazlı $\Delta = (\text{video} - \text{foto})$ ısı haritaları (Şekil 58-59) modalite seçimini nicel olarak netleştirir. GLCM için video kullanımı özellikle F1’de ortalama $\approx +0.20$ puan iyileşme sağlamaktadır ve deneylerin çoğunda video lehine sonuçlar gözlenir. Buna karşılık FSG ve 6-Özellik setlerinde fotoğraf bariz şekilde üstündür (ortalama $\Delta F1 \approx$

-0.19 ve ≈ -0.29). Bu durum, doku istatistiklerinin (GLCM) videoda artan örnek çeşitliliğinden faydalanmasına karşılık, frekans-temelli FSG öz niteliklerinin videodaki bulanıklık/pozlama dalgalanmalarına daha duyarlı olmasına bağlanabilir.



Şekil 58. Deney bazlı $\Delta f = (\text{video} - \text{foto})$ ısı haritası



Şekil 59. Deney bazlı $\Delta \text{acc} = (\text{video} - \text{foto})$ ısı haritaları

Bu çalışmanın ikinci aşamasında hedefimiz, standart kameralarla alınan görüntülerden hızlı/yavaş aşınma ayrımının ne ölçüde yapılabildiğini görmek ve yüzey dokusuna özgü tasarladığımız FSG öz niteliklerinin (Fourier Genlik, Sinüs ERMS, Gauss ERMS) bu bağlamda genel amaçlı GLCM öz niteliklerine göre pratik bir üstünlük sağlayıp sağlamadığını sınınamaktı. LOEO protokolüyle yapılan değerlendirmeler, fotoğraf tabanlı kurulumlarda FSG ve altı özellik birleştirmesinin (FSG+GLCM) ortalamada daha yüksek F1 ürettiğini; video akışında ise bu üstünlüğün tüm deneylere genellenmediğini göstermektedir (bkz. Tablo 14–15).

Modalite açısından bakıldığında, video kullanımı GLCM setinde kısmi bir avantaj yaratmıştır ($\Delta F1 > 0$ olan deney sayısı ve ortalama artışlar ısı haritalarında görülmektedir), ancak FSG ve altı özellik senaryolarında fotoğraf genellikle daha istikrarlı ve yüksek sonuç vermiştir (bkz. Δ =video–foto ısı haritaları). Bu tablo, standart video görüntülerinin anlam taşıdığını fakat en yüksek ayırt edicilik seviyesinin çoğu durumda iyi çekilmiş tekil kareler üzerinde elde edildiğini düşündürmektedir.

Öznitelik setleri arasında, FSG'nin (yüzey dalgalılığı/frekans içeriğini hedefleyen özgün öznitelikler) GLCM'ye göre tutarlı biçimde daha ayırt edici olduğu; ayrıca altı özelliğin birlikte kullanımıyla fotoğraf tarafında ortalama ölçekte ek kazanım elde edilebildiği görülmüştür. Bu bulgu, tasarlanan FSG özniteliklerinin pratik katkı sunduğunu ve genel amaçlı doku metriklerini tamamlayarak sınıflandırma başarımını anlamlı bir seviyeye taşıdığını göstermektedir (bkz. Tablo 14–15).

Sonuç olarak, standart kamera altyapısı ile fotoğraf tabanlı FSG (ve mümkünse tüm altı öznitelik) yaklaşımı, bu veri ve koşullarda en dengeli ve güvenilir performansı sunmuştur. Video akışı zorunlu olduğunda GLCM tarafında kısmi kazanımlar mümkündür; ancak toplam başarımın fotoğraf temelli FSG/6-özellik düzeyine çıkması, çekim kalitesi ve veri koşullarına bağlıdır. Bu nedenle, uygulama senaryosu (çevrim içi izleme vs. periyodik görüntü alma), çekim disiplini ve modalite seçimi birlikte ele alınmalıdır.

Tablo 13. SVM Skorlarında setlerin sıralanması

Sıra	Set	Ortalama Test F1	Ortalama Test Acc
1	6 Özellik (Foto)	0.58	0.753
2	FSG (Foto)	0.507	0.712
3	FSG (Video)	0.313	0.647
4	6 Özellik (Video)	0.292	0.624
5	GLCM (Video)	0.244	0.589
6	GLCM (Foto)	0.04	0.574

Bu bölümde sunulan bulguların tamamlayıcısı olarak, SVM skorlarına göre öznitelik setlerinin sıralaması Tablo 13'te verilmiştir. Tabloya göre sıralama, 6 Özellik (Foto) > FSG (Foto) > FSG (Video) > 6 Özellik (Video) > GLCM (Video) > GLCM (Foto) biçimindedir. Bu dağılım, standart, düşük maliyetli ve kompakt kameralarla elde edilen video karelerinden, yüzey dokusuna özel tasarlanan FSG öznitelikleri kullanıldığında anlamlı bir ayırım gücü elde edilebildiğini; ancak en yüksek başarımın

fotoğraf temelli FSG ve altı-özellik kurulumlarında sağlandığını göstermektedir. Ayrıca GLCM için video kullanımının fotoğrafa kıyasla kısmi bir iyileşme sağladığı, buna karşın mutlak F1 düzeylerinin düşük kaldığı kaydedilmiştir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, izleyen Sonuçlar bölümünde başlıca bulgular özetlenecek ve uygulamaya dönük çıkarımlar ile olası gelecek çalışmalar tartışılacaktır.



Tablo 14. Sınıflandırma Performansı FSG ve GLCM Setleri-Video ve Foto; Tahmin, Doğruluk ve F1 değerleri

Öznitelikler; Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms	Den. No	V (m/dk)	f (mm/dev)	a (mm)	Video Kareleri										Fotoğraflar													
					Test					Eğitim					Test					Eğitim								
					tn	fp	fn	tp	acc	f1	tn	fp	fn	tp	acc	f1	tn	fp	fn	tp	acc	f1	tn	fp	fn	tp	acc	f1
	1	180	0,2	0,3	8	0	3	3	0.7857	0.6667	47	11	24	10	0.6196	0.3636	8	0	3	3	0.7857	0.6667	50	8	16	18	0.7391	0.6000
	2	180	0,22	0,4	7	0	3	0	0.7000	0	47	12	21	16	0.6563	0.4923	6	1	1	2	0.8000	0.6667	52	7	17	20	0.7500	0.6250
	3	180	0,24	0,5	5	1	3	0	0.5556	0	47	13	18	19	0.6804	0.5507	5	1	2	1	0.6667	0.4000	53	7	16	21	0.7629	0.6462
	4	200	0,2	0,4	11	0	4	1	0.7500	0.3333	44	11	21	14	0.6444	0.4667	9	2	3	2	0.6875	0.4444	49	6	14	21	0.7778	0.6774
	5	200	0,22	0,5	5	0	3	2	0.7000	0.5714	50	11	23	12	0.6458	0.4138	5	0	2	3	0.8000	0.7500	53	8	17	18	0.7396	0.5902
	6	200	0,24	0,3	1	7	0	6	0.5000	0.6316	48	10	16	18	0.7174	0.5806	1	7	0	6	0.5000	0.6316	53	5	15	19	0.7826	0.6552
	7	220	0,2	0,5	7	0	5	0	0.5833	0.0000	45	14	18	17	0.6596	0.5152	7	0	4	1	0.6667	0.3333	51	8	13	22	0.7766	0.6769
8	220	0,22	0,3	6	0	3	0	0.6667	0.0000	49	11	23	14	0.6495	0.4516	6	0	3	0	0.6667	0.0000	53	7	16	21	0.7629	0.6462	
9	220	0,24	0,4	3	5	0	4	0.5833	0.6154	52	6	22	14	0.7021	0.5000	8	0	2	2	0.8333	0.6667	50	8	16	20	0.7447	0.6250	
	Ortalama acc ve f1								0.6472	0.3132					0.6639	0.4816					0.7118	0.5066					0.7596	0.6380
Öznitelikler; GLCM- Entropi, Homojenite, Kontrast	Den. No	V (m/dk)	f (mm/dev)	a (mm)	Video Kareleri										Fotoğraflar													
					Test					Eğitim					Test					Eğitim								
					tn	fp	fn	tp	acc	f1	tn	fp	fn	tp	acc	f1	tn	fp	fn	tp	acc	f1	tn	fp	fn	tp	acc	f1
	1	180	0,2	0,3	8	0	6	0	0.5714	0	58	0	34	0	0.6304	0.0000	8	0	6	0	0.571	0.0000	58	0	34	0	0.6304	0
	2	180	0,22	0,4	7	0	3	0	0.7000	0	50	9	22	15	0.6771	0.4918	7	0	3	0	0.7	0.0000	59	0	37	0	0.6146	0
	3	180	0,24	0,5	3	3	1	2	0.5556	0.5000	51	9	19	18	0.7113	0.5625	0	6	1	2	0.222	0.3636	57	3	26	11	0.7010	0.4314
	4	200	0,2	0,4	11	0	4	1	0.7500	0.3333	46	9	23	12	0.6444	0.4286	11	0	5	0	0.688	0.0000	55	0	35	0	0.6111	0
	5	200	0,22	0,5	5	0	5	0	0.5000	0	53	8	23	12	0.6771	0.4364	5	0	5	0	0.5	0.0000	61	0	35	0	0.6354	0
	6	200	0,24	0,3	1	7	0	6	0.5000	0.6316	51	7	19	15	0.7174	0.5357	8	0	6	0	0.571	0.0000	58	0	34	0	0.6304	0
	7	220	0,2	0,5	4	3	3	2	0.5000	0.4000	52	7	22	13	0.6915	0.4727	7	0	5	0	0.583	0.0000	54	5	26	9	0.6702	0.3673
	8	220	0,22	0,3	4	2	2	1	0.5556	0.3333	52	8	23	14	0.6804	0.4746	6	0	3	0	0.667	0.0000	60	0	37	0	0.6186	0.0000
	9	220	0,24	0,4	8	0	4	0	0.6667	0.0000	49	9	19	17	0.7021	0.5484	8	0	4	0	0.667	0.0000	56	2	31	5	0.6489	0.2326
Ortalama acc ve f1								0.5888	0.2442					0.6813	0.4390					0.5744	0.0404					0.6401	0.1146	

Tablo 15. Siniflandırma Performansı; Tüm Altı Öznitelik için, Video Üst Foto Alt - Tahmin, Doğruluk ve F1 Değerleri

Tüm Öznitelikler	Den. No	V (m/dk)	f (mm/dev)	a (m m)	Video Kareleri											
					Test						Eğitim					
					tn	fp	fn	tp	acc	f1	tn	fp	fn	tp	acc	f1
	1	180	0,2	0,3	8	0	3	3	0.7857	0.667	51	7	25	9	0.6522	0.36
	2	180	0,22	0,4	7	0	3	0	0.7	0	51	8	22	15	0.6875	0.5
	3	180	0,24	0,5	0	6	0	3	0.3333	0.5	50	10	17	20	0.7216	0.597
	4	200	0,2	0,4	11	0	5	0	0.6875	0	47	8	21	14	0.6778	0.491
	5	200	0,22	0,5	5	0	5	0	0.5	0	52	9	21	14	0.6875	0.483
	6	200	0,24	0,3	1	7	0	6	0.5	0.632	50	8	9	25	0.8152	0.746
	7	220	0,2	0,5	7	0	4	1	0.6667	0.333	49	10	18	17	0.7021	0.548
8	220	0,22	0,3	6	0	2	1	0.7778	0.5	52	8	23	14	0.6804	0.475	
9	220	0,24	0,4	8	0	4	0	0.6667	0	49	9	19	17	0.7021	0.548	
Ortalama acc ve f1								0.6242	0.2924					0.7021	0.5276	
Tüm Öznitelikler	Den. No	V (m/dk)	f (mm/dev)	a (m m)	Fotoğraflar											
					Test						Eğitim					
					tn	fp	fn	tp	acc	f1	tn	fp	fn	tp	acc	f1
	1	180	0,2	0,3	8	0	3	3	0.7857	0.667	50	8	14	20	0.7609	0.645
	2	180	0,22	0,4	7	0	1	2	0.9	0.8	52	7	16	21	0.7604	0.646
	3	180	0,24	0,5	5	1	1	2	0.7778	0.667	53	7	15	22	0.7732	0.667
	4	200	0,2	0,4	5	6	1	4	0.5625	0.533	51	4	15	20	0.7889	0.678
	5	200	0,22	0,5	5	0	2	3	0.8	0.75	54	7	15	20	0.7708	0.645
	6	200	0,24	0,3	5	3	0	6	0.7857	0.8	52	6	15	19	0.7717	0.644
	7	220	0,2	0,5	7	0	4	1	0.6667	0.333	51	8	12	23	0.7872	0.697
8	220	0,22	0,3	6	0	3	0	0.6667	0	51	9	15	22	0.7526	0.647	
9	220	0,24	0,4	8	0	2	2	0.8333	0.667	51	7	15	21	0.766	0.656	
Ortalama acc ve f1								0.7532	0.5797					0.7702	0.6583	

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, literatürde yaygın olan durağan yüzey fotoğraflarına dayalı takım izleme yaklaşımlarının, gerçek sisteme uyarlanması yüksek hızlı görüntüleme gereksiniminin doğuracağı maliyet ve entegrasyon güçlükleri dikkate alınarak, benzer izleme problemi standart video kareleri üzerinden ele alınmıştır. Tormalanmış yüzey dokusuna özgü üç öznitelik—Fourier genlik ortalaması, Sinüs uyum hatası ve Gauss uyum hatası (FSG)—tanımlanmış; bu öznitelikler önce video karelerinden, ardından eşlenik fotoğraflardan çıkarılmış ve özniteliklerin statik (deney bazında uyum) ve dinamik (artan ömürle beraber genel değişim uyumu ve eğimi) davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla literatürde sık kullanılan GLCM tabanlı genel amaçlı öznitelikler (Entropi, Homojenlik, Kontrast) referans olarak kullanılmış, aynı prosedürle hem video hem fotoğraf için hesaplanmıştır. Tüm öznitelik kümeleri, kritik aşınma durumu (hızlı aşınma bölgesi tespiti) sınıflandırması amacıyla doğrusal SVM altında LOEO (Leave-One-Experiment-Out) protokolü ile sınanmıştır; ayrıca altı özniteliğin birlikte kullanıldığı kurulumlar da değerlendirilmiştir. Süreç parametrelerinin (V, f, a) takım ömrü üzerindeki etkileri Taguchi L9 ve ANOVA ile nicel olarak incelenmiştir. Bu çerçevede aşağıdaki başlıca sonuçlar elde edilmiştir.

1- Taguchi L9 ve ANOVA analizi sonuçları

- a) Taguchi L9 ve ANOVA analizleri sonucunda, takım ömrü üzerinde en belirgin etkinin kesme derinliğinden (a) geldiği; bunu ilerleme (f) ve kesme hızının (V) izlediği gösterilmiştir. S/N ana-etkiler ve Yanıt Tablosu bu sıralamayı doğrulamıştır; parametre seçiminin, özellikle kritik aşınma eşiğine ($VB_{max} = 0.11$ mm) ulaşma süresi üzerinde anlamlı etkide bulunduğu belirlenmiştir.

2-Özniteliklerin deney bazında uyum analiz sonuçları;

- a) FSG özniteliklerinin deney bazında yapılan statik analizinde; 9 deneyin video ve fotoğraf tabanlı ortalama uyumlarında benzer Düz. R^2 düzeyleri elde edilmiştir: Video-FSG için ort. Düz. $R^2 \approx 0.21$ (*Fourier 0.1960; Sinüs 0.1917; Gauss 0.2465*).; Foto-FSG için ≈ 0.22 (*Fourier 0.2559; Sinüs 0.1787; Gauss 0.2245*). Bu bulgu, FSG'nin tormalanmış yüzey dokusuna özgü yapısal ipuçlarını yakalayarak

edinim/görüntüleme kaynaklı gürültüye görece duyarsız davrandığını göstermektedir.

- b) GLCM özniteliklerinin statik analizlerinde, deney bazında ortalama Düz.R² değerleri mutlak olarak daha yüksek bulunmuştur; ancak modaliteye(foto-video) daha duyarlı bir davranış sergilenmiştir: Video-GLCM için ort. Düz.R² $\approx$ 0.446 (Contrast: 0.4137; Homogeneity: 0.5594; Entropy: 0.3645), Foto-GLCM için $\approx$ 0.337 (Contrast: 0.3047; Homogeneity: 0.4758; Entropy: 0.2311). Bu farklılık, GLCM'nin video-foto koşullarına görece hassas olduğunu işaret etmektedir.

3-Özniteliklerin ömür bazında uyum analiz sonuçları;

- a) Dinamik analizde, deney bazında hesaplanan Düz.R² değerlerinin takım ömrü ile birlikte arttığı gözlenmiştir. Bu bulgu, kısa ömürle sonuçlanan görece yüksek (agresif) kesme parametrelerinin yüzeyde oluşturduğu belirgin bozulmalar nedeniyle görüntülerden kararlı bir aşınma sinyali çıkarılmasının güçleştiğini; ömür uzadıkça ise aşınma imzasının daha düzenli hale gelmesiyle öznitelik-aşınma uyumunun güçlendiğini göstermektedir.
- b) Fourier ve Gauss özniteliklerinin eğimleri, hem video hem fotoğraf modlarında aşınma eğimiyle aynı yönde ve büyüklükçe yakın seyretmiştir; bu nedenle hizalanma güçlü bulunmuştur. Sinüs uyum hatası ise özellikle fotoğrafta daha zayıf/kararsız bir hizalanma sergilemiştir. Bu durum, literatürde sinüs uyumunun ara bantlı/yarı-periyodik desenlere daha duyarlı olduğunun belirtilmesi ve mevcut deneyde “yan akış(side-flow)” ile “oyuk izleri(plowing groove)” tipindeki belirgin ara bant aşınmalarının baskın olmaması ile yorumlanmıştır.
- c) GLCM özniteliklerinde ise; Kontrast için videoda aşınma eğimiyle aynı yönde bir eğilim gözlenmiş, fotoğrafta ise ters yönde seyir saptanmıştır bu statik analizde de gözlemlenen modalite duyarlılığı ile örtüşmektedir. Homojenlik, beklendiği üzere, aşınma ile ters yönde (aşınma arttıkça homojenlik azalır) bir eğim üretmiştir ve bu davranış her iki modda da tutarlı bulunmuştur. Entropi için videoda aşınmayla kısmen benzer eğilim gözlenmiş, fotoğrafta ise belirgin bir hizalanma saptanmamıştır bu da statik analizde gözlemlenen modalite duyarlılığı ile örtüşmektedir.

4-SVM Sınıflandırma sonuçları;

- a) Altı özneliğin birlikte kullanıldığı fotoğraf temelli kurulumda en yüksek sınıflandırma başarımı elde edilmiştir (yaklaşık $Acc \approx 0.75$, $F1 \approx 0.58$). Bu kurulum, hem doğruluk hem F1 bakımından diğer seçenekleri geride bırakmıştır.
- b) FSG (Fotoğraf) ile yüksek ve dengeli bir ayırım gücü sağlanmıştır (yaklaşık $Acc \approx 0.71$, $F1 \approx 0.51$). FSG (Video) ile anlamlı fakat orta düzey bir ayırım gücü elde edilmiştir (yaklaşık $Acc \approx 0.65$, $F1 \approx 0.31$). Böylece standart, düşük maliyetli video akışından da işe yarar sinyal çıkarılabildiği gösterilmiştir; ancak üst düzey performansın fotoğraf temelli FSG/6-özellik kurulumlarında sağlandığı bulunmuştur.
- c) GLCM tabanlı kurulumlar her iki modda da daha düşük F1 ile sınırlı kalmıştır (Video-GLCM $F1 \approx 0.24$; Foto-GLCM $F1 \approx 0.04$). Bu sonuç, genel amaçlı doku ölçütlerinin tek başına yetersiz kalabildiğini ve problem-özel FSG tasarımının daha ayırt edici olduğunu göstermiştir.
- d) Ortalama performanslara göre genel başarı sıralaması “6 Özellik (Foto) > FSG (Foto) > FSG (Video) > 6 Özellik (Video) > GLCM (Video) > GLCM (Foto)” şeklinde bulunmuştur.
- e) Genel olarak video kareleri üzerinden elde edilen sınıflandırma sonuçları dikkate alındığında, literatürde fotoğraf tabanlı izleme koşullarında görece başarılı olduğu raporlanan genel amaçlı özneliklerin, video modunda problem-özel FSG özneliklerinin gerisinde kaldığı gösterilmiştir. Ayrıca altı özneliğin birlikte kullanıldığı kurulumlarda bu özneliklerin performansa olumsuz etki yaptığı gözlenmiştir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmanın bulguları doğrultusunda, yöntemlerin saha koşullarında güvenilir biçimde çalışmasını sağlamak üzere dinamik öznitelik tasarımı, model seçimi ve edinim kurulumunun güçlendirilmesine yönelik ek doğrulamalar önerilmektedir.

FSG'nin üstünlüğü dikkate alınarak, tornalanmış yüzeye özgü basit ve ilintili göstergelerin (ör. dalgalılık genliği, iz yoğunluğu, yönlülük) mevcut kümeye eklenmesi; böylece sinyalin güçlendirilmesi ve sınıflandırma başarımının yükseltilmesi önerilmektedir.

Video karelerinden zaman bilgisini yansıtan özetlerin (pencere bazlı ortalama, eğim, kararlılık/oyunaklık) çıkarılarak sınıflandırmaya eklenmesi; bu yolla video modunda istikrarın ve ayırt gücünün artırılması önerilmektedir.

Doğrusal SVM'e ek olarak doğrusal olmayan (RBF-Radyal Tabanlı Fonksiyon Destek Vektör Makinesi) SVM, karar ağaçları ve küçük bir CNN(Convolutional neural network) ile karşılaştırmalı denemeler yapılması; model seçiminin doğruluk/F1 ile birlikte süre ve hesaplama maliyeti açısından raporlanması önerilmektedir.

Yöntemin genellenebilirliğinin sınanması için farklı malzemeler, V-f-a aralıkları ve takım geometrileri üzerinde tekrar ölçümler yapılması; elde edilen sonuçların karşılaştırmalı olarak sunulması önerilmektedir.

Kesme sıvısı, titreşim ve yansıma gibi sahadaki engellere rağmen canlı video ediniminin denenmesi; sabit aydınlatma, koruyucu cam ve uygun kamera konumu gibi pratik düzenlemelerle çalışabilir bir kurulumun belirlenmesi önerilmektedir.

Yaklaşımın profil tornalama, kanal açma ve iç çap tornalama gibi işlemlerde yeniden uygulanması; işlem türüne bağlı desen değişimlerinin öznitelikler ve sınıflandırma üzerindeki etkisinin ortaya konması önerilmektedir.

Kesme sıvısı ve talaş nedeniyle tüm yüzey izlenemediğinde, görüntü üzerinde bölge seçimi (ROI- region of interest) yapılarak yalnızca temiz alanlardan karar verilmesi; farklı ROI stratejilerinin başarımlarının etkisinin karşılaştırılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abellan-Nebot, J. V., & Romero Subirón, F. (2010). A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47, 237–257.
- Altan Özbek, N., Özbek, O., & Kara, F. (2017). Sertleştirilmiş AISI 420 çeliğinin tornalanmasında Taguchi yöntemi kullanılarak takım aşınması için kesme parametrelerinin optimizasyonu. *International Academic Research Congress*.
- Bagga, P., Makhesana, M., Patel, K., & Patel, K. (2021). Tool wear monitoring in turning using image processing techniques. *Materials Today: Proceedings*, 44, 771–775.
- Bhat, N., Dutta, S., Pal, S., & Pal, S. (2016). Tool condition classification in turning process using hidden Markov model based on texture analysis of machined surface images. *Measurement*, 90.
- Bibbin J., Nikita, K., Patil, T., Hemakumar, S., & Kuppan, P. (2018). Online monitoring of tool wear and surface roughness by using acoustic and force sensors. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Pt. 2), 8299–8306.
- Bourdim, M., Bourdim, A., & Kerrouz, S. (2017). Influence of cutting parameters on cutting forces. *International Journal of Materials*, 4, 26–30.
- Bradley, C., & Wong, Y. S. (2001). Surface texture indicators of tool wear—A machine vision approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, 435–443.
- Chethan, Y. D., Ravindra, H. V., & Krishne Gowda, Y. T. (2018). Machined surface monitoring in turning using histogram analysis by machine vision. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Pt. 2), 7775–7781.
- Colantonio, L., Equeter, L., Giovannelli, H., Dehombreux, P., Mahmoudi, S., & Ducobu, F. (2025). Image processing with deep-learning and transfer learning for cutting tool degradation monitoring. *Procedia CIRP*, 132, 50–55.
- Danesh, M., & Khalili, K. (2015). Determination of tool wear in turning process using undecimated wavelet transform and textural features. *Procedia Technology*, 19, 98–105.
- Das, M., Naikan, V., & Panja, S. (2024). A review of cutting tool life prediction through flank wear monitoring. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 42.

- Datta, A., Dutta, S., Pal, S. K., & Sen, R. (2011). Texture analysis of turned surface images using grey level co-occurrence technique. *Advanced Materials Research*, 365, 38–43.
- Datta, A., Dutta, S., Pal, S. K., & Sen, R. (2013). Progressive cutting tool wear detection from machined surface images using Voronoi tessellation method. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2339–2349.
- Dimla, D. E. (2000). Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—A review of methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(8), 1073–1098.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(6), 610–621.
- Hoy, D. E. P., & Yu, F. (1991). Surface quality assessment using computer vision methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 28(1–2), 265–274.
- International Organization for Standardization. (1993). *Tool-life testing with single-point turning tools (ISO 3685:1993)*. Geneva: ISO.
- Jong, W.-R., Huang, Y.-M., Lin, Y.-Z., Chen, S.-C., & Chen, Y.-W. (2020). Integrating Taguchi method and artificial neural network to explore machine learning of computer aided engineering. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 43, 1–11.
- Kassim, A., Mannan, M. A., & Jing, M. (2000). Machine tool condition monitoring using workpiece surface texture analysis. *Machine Vision and Applications*, 11, 257–263.
- Kumar, A. S., Agarwal, A., Jansari, V. G., Desai, K. A., Chattopadhyay, C., & Mears, L. (2025). Realizing on-machine tool wear monitoring through integration of vision-based system with CNC milling machine. *Journal of Manufacturing Systems*, 78, 283–293.
- Kumar, P., Dutta, S., & Murmu, N. (2021). Tool wear classification based on machined surface images using convolution neural networks. *Sādhanā*, 46.
- Küllaç, M. T. (2019). *Tornalama işlemlerinde görüntü işleme teknikleri kullanılarak takım ömrünün izlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Küllaç, M. T., & Çuvalcı, O. (2023). Correlation statistics of a Fourier transform feature with flank wear on different sections of turned surface images for real time monitoring applications. *Measurement*, 207, 112399.
- Küllaç, M. T., & Çuvalcı, O. (2025). Assessing sine and Gaussian fitting for surface feature extraction in real-time wear monitoring of turning operations. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 61, 51–69.

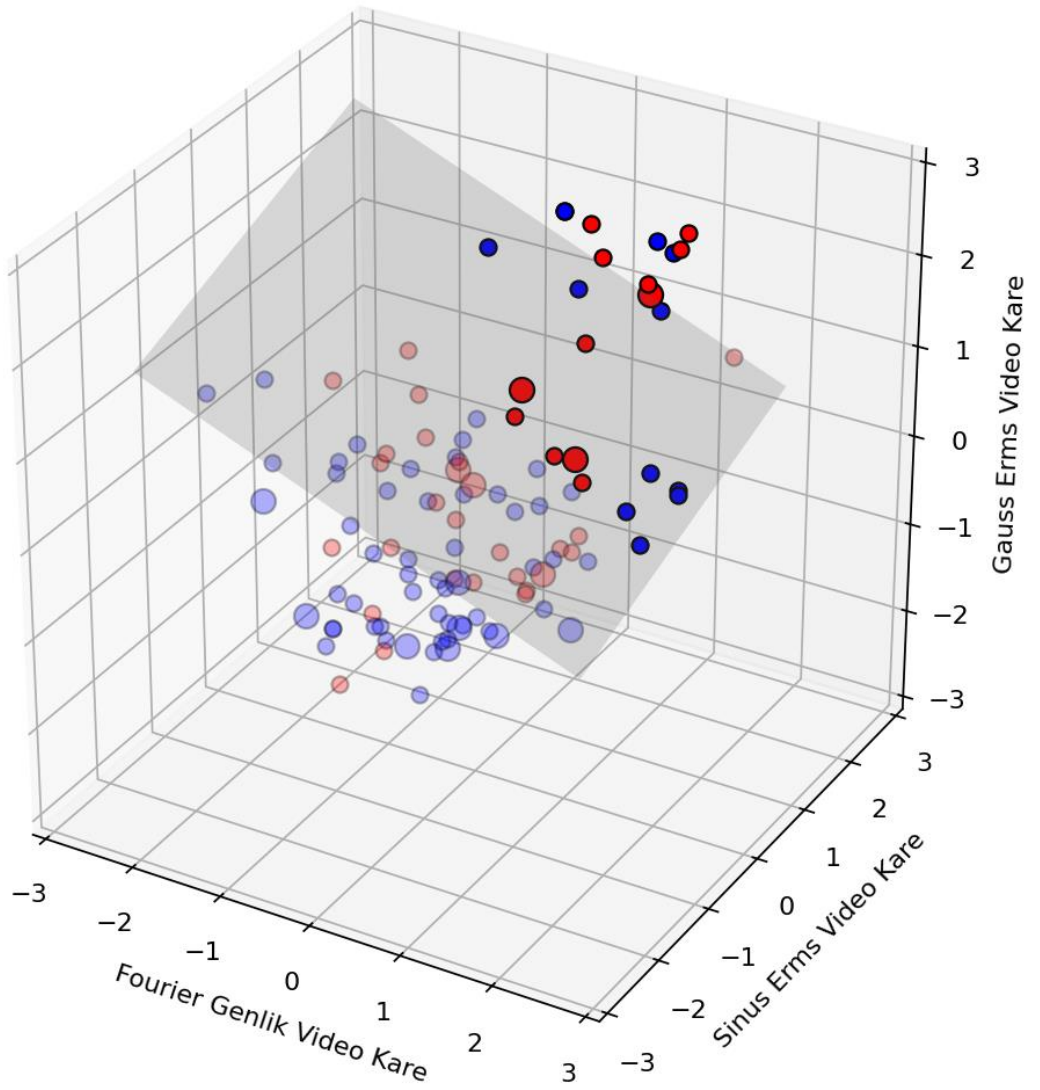
- Kuntoğlu, M., & Sağlam, H. (2019). Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning. *Measurement*, 140, 427–436.
- Kuntoğlu, M., Aslan, A., Sağlam, H., Pimenov, D. Y., Giasin, K., & Mikolajczyk, T. (2020). Optimization and analysis of surface roughness, flank wear and five different sensorial data via tool condition monitoring system in turning of AISI 5140. *Sensors*, 20(16), 4377.
- Kuntoğlu, M., Aslan, A., Pimenov, D. Y., Usca, Ü. A., Salur, E., Gupta, M. K., Mikolajczyk, T., Giasin, K., Kapłonek, W., & Sharma, S. (2021). A review of indirect tool condition monitoring systems and decision-making methods in turning: Critical analysis and trends. *Sensors*, 21, 108.
- Li, L., & An, Q. (2016). An in-depth study of tool wear monitoring technique based on image segmentation and texture analysis. *Measurement*, 79, 44–52.
- Liu, S. S., & Jernigan, M. (1990). Texture analysis and discrimination in additive noise. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 49(1), 52–67.
- Mesquita, R. M. D., & Barata Marques, M. J. M. (1992). Effect of chip-breaker geometries on cutting forces. *Journal of Materials Processing Technology*, 31(1–2), 317–325.
- Nath, C. (2020). Integrated tool condition monitoring systems and their applications: A comprehensive review. *Procedia Manufacturing*, 48, 852–863.
- Oraby, S. E., & Hayhurst, D. R. (1991). Development of models for tool wear force relationships in metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 33(2), 125–138.
- Palani, S., & Natarajan, U. (2011). Prediction of surface roughness in CNC end milling by machine vision system using artificial neural network based on 2D Fourier transform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54, 1033–1042.
- Peng, C., Zheng, J.-M., Li, X.-B., Song, Y.-C., & Shi, J.-J. (2015). Feature extraction on machined surface texture image of tool wear based on fractional Brownian motion. In *Proceedings* (pp. 706–714).
- Petrovic Savić, S., Mitrović, A., Đorđević, A., Pantić, M., Ivković, M., Jovičić, A., & Baralić, J. (2025). *Morphological segmentation of wear zones on cutting inserts for tool condition monitoring*. *Advances in Mechanical Engineering*, 17(10).
- Salame, C., Rapold, R., Tasdelen, B., & Malakizadi, A. (2024). Sensor-based identification of tool wear in turning. *Procedia CIRP*, 121, 228–233.

- Saatçı, B., Ulaş, M., & Gurgenc, T. (2025). Thermographic detection of tool wear: A review on deep learning-based approaches. In *2025 International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)* (pp. 1–5).
- Serin, B., Sener, A. M., Ozbayoglu, A. M., & Unver, H. O. (2020). Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(3–4).
- Siddhpura, A., & Paurobally, R. (2013). A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 371–393.
- Svalina, I., Havrlišan, S., Šimunović, K., & Šarić, T. (2020). Investigation of correlation between image features of machined surface and surface roughness. *Tehnički Vjesnik*, 27(1), 27–36.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2004). *Taguchi's quality engineering handbook*. Wiley.
- Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., & Dornfeld, D. (2010). Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals*, 59(2), 717–739.
- Tran, M.-Q., Doan, H.-P., Vu, V., & Vu, L. (2022). Machine learning and IoT-based approach for tool condition monitoring: A review and future prospects. *Measurement*, 207, 112351.
- Whitehouse, D. J. (1978). Surfaces—A link between manufacture and function. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 192(1).
- Zhang, S., Shen, X., Lin, Z., Měch, R., Costeira, J. P., & Moura, J. M. F. (2018). Learning to understand image blur. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 6586–6595).

7. EKLER

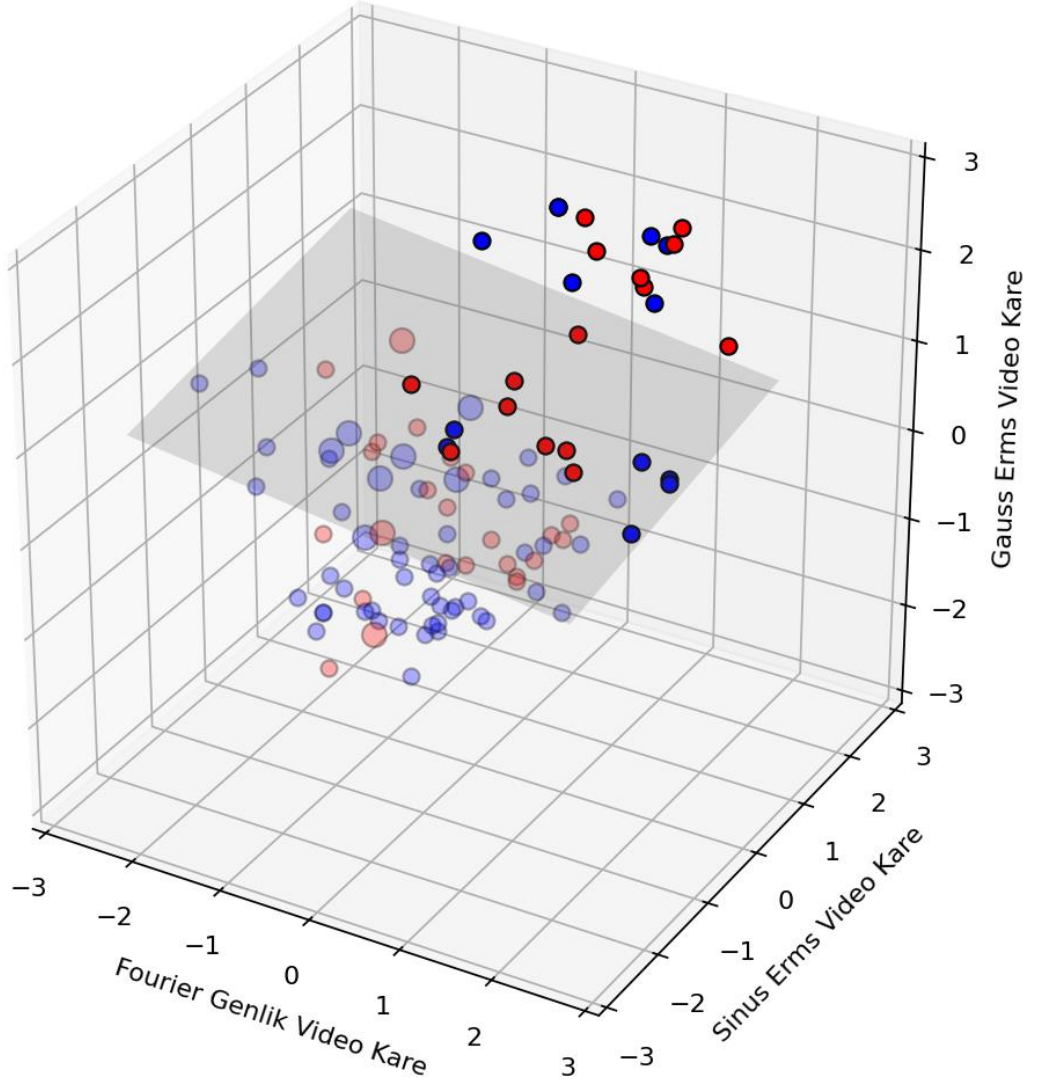
EK.1 Deney 1- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 1 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.22$ mm/dev, $a=0.4$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



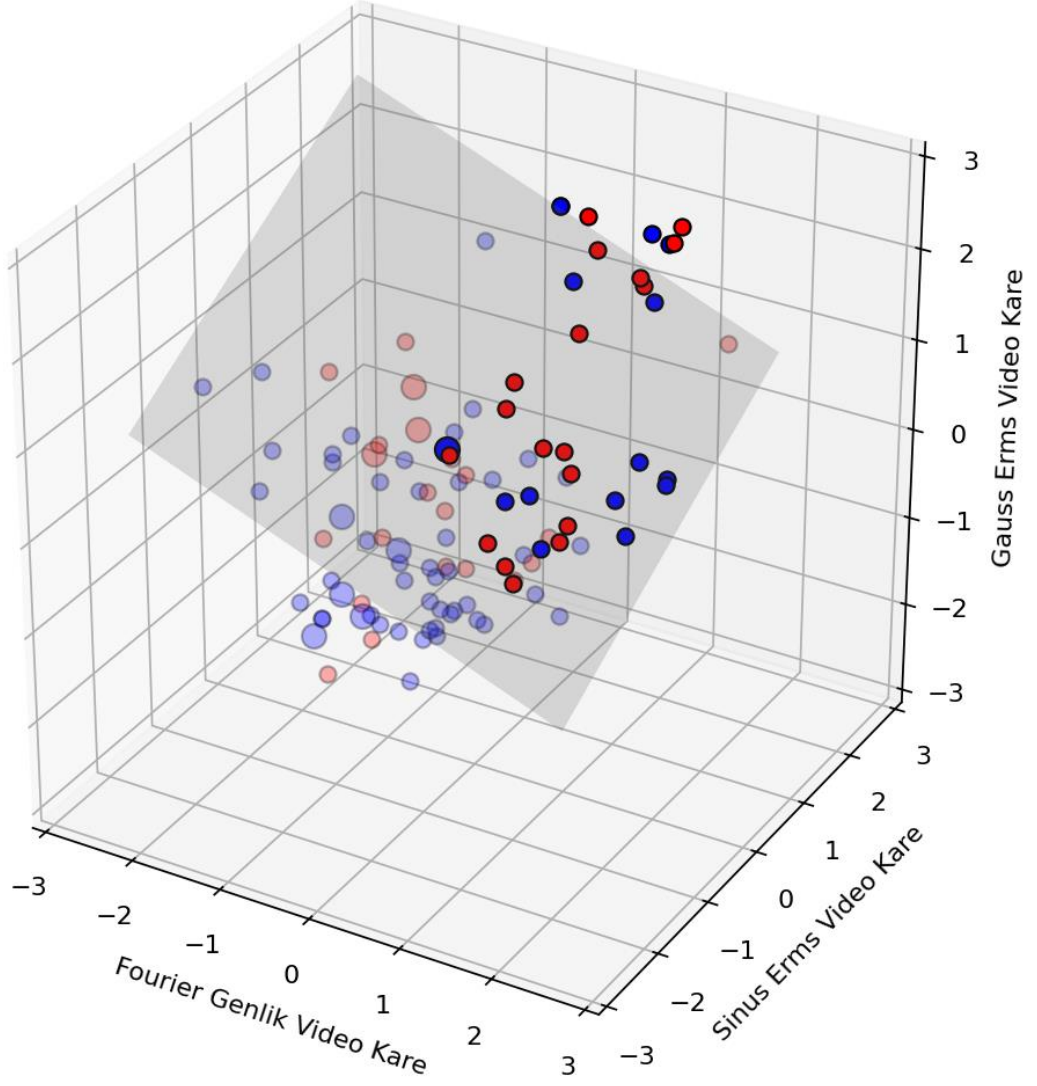
EK.2 Deney 2- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 2 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



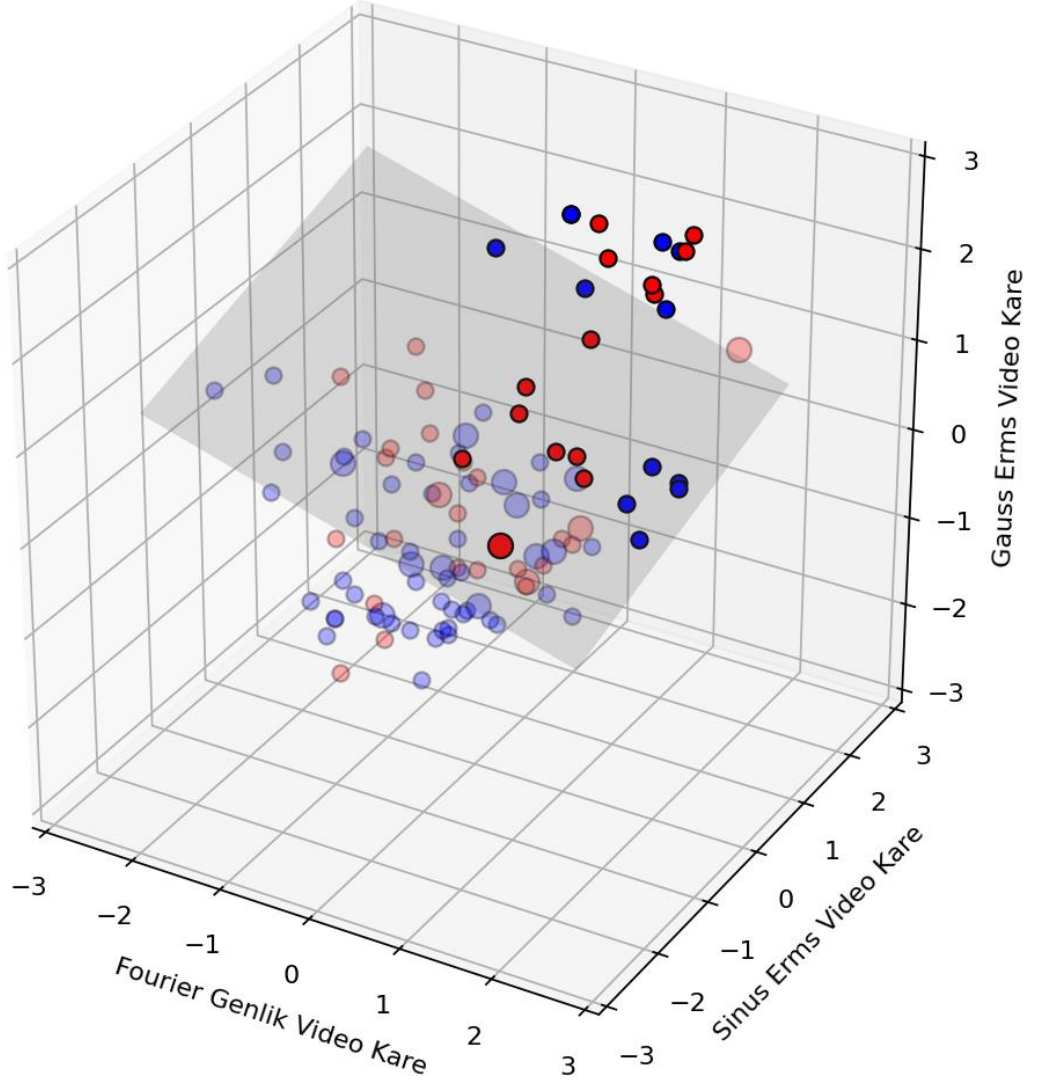
EK.3 Deney 3- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 3 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



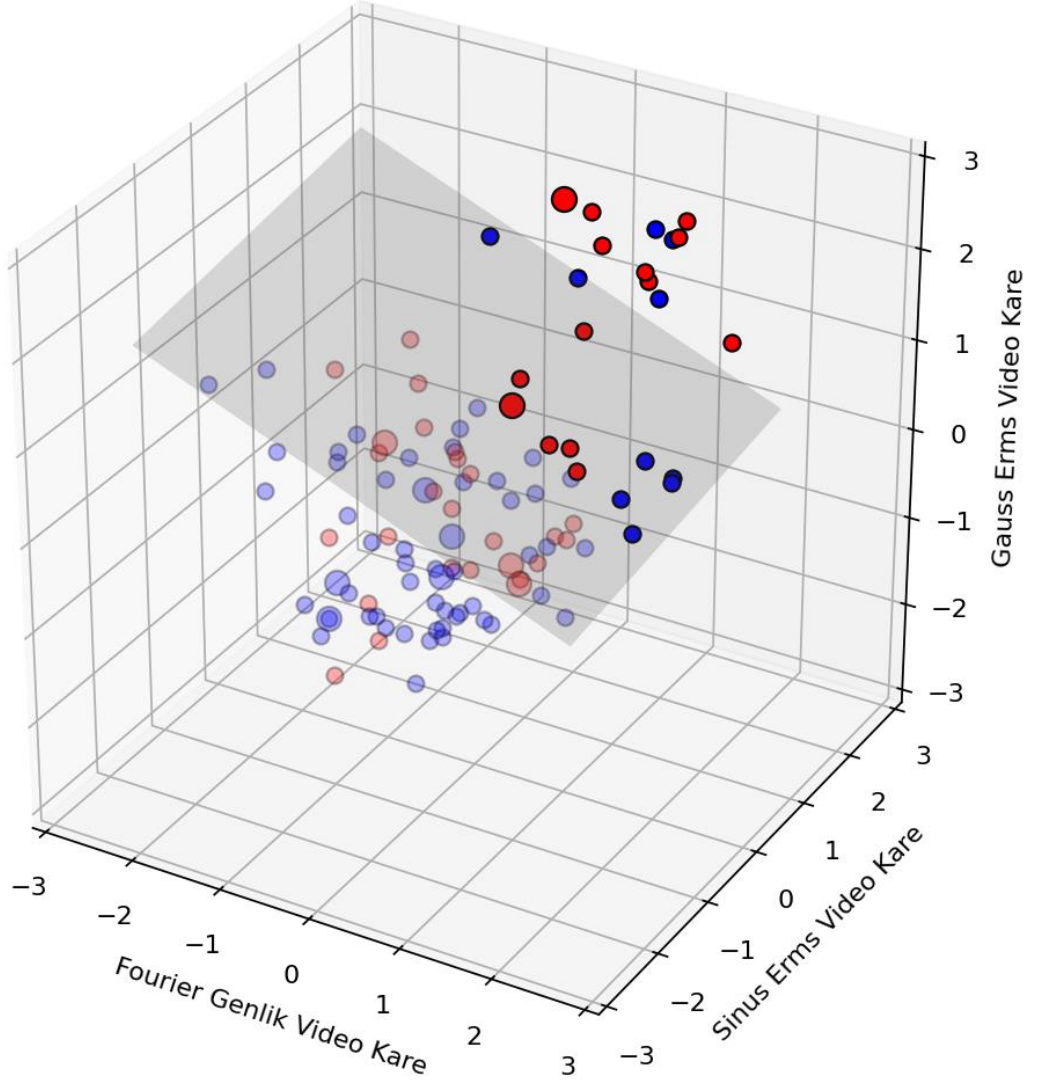
EK.4 Deney 4- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 4 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



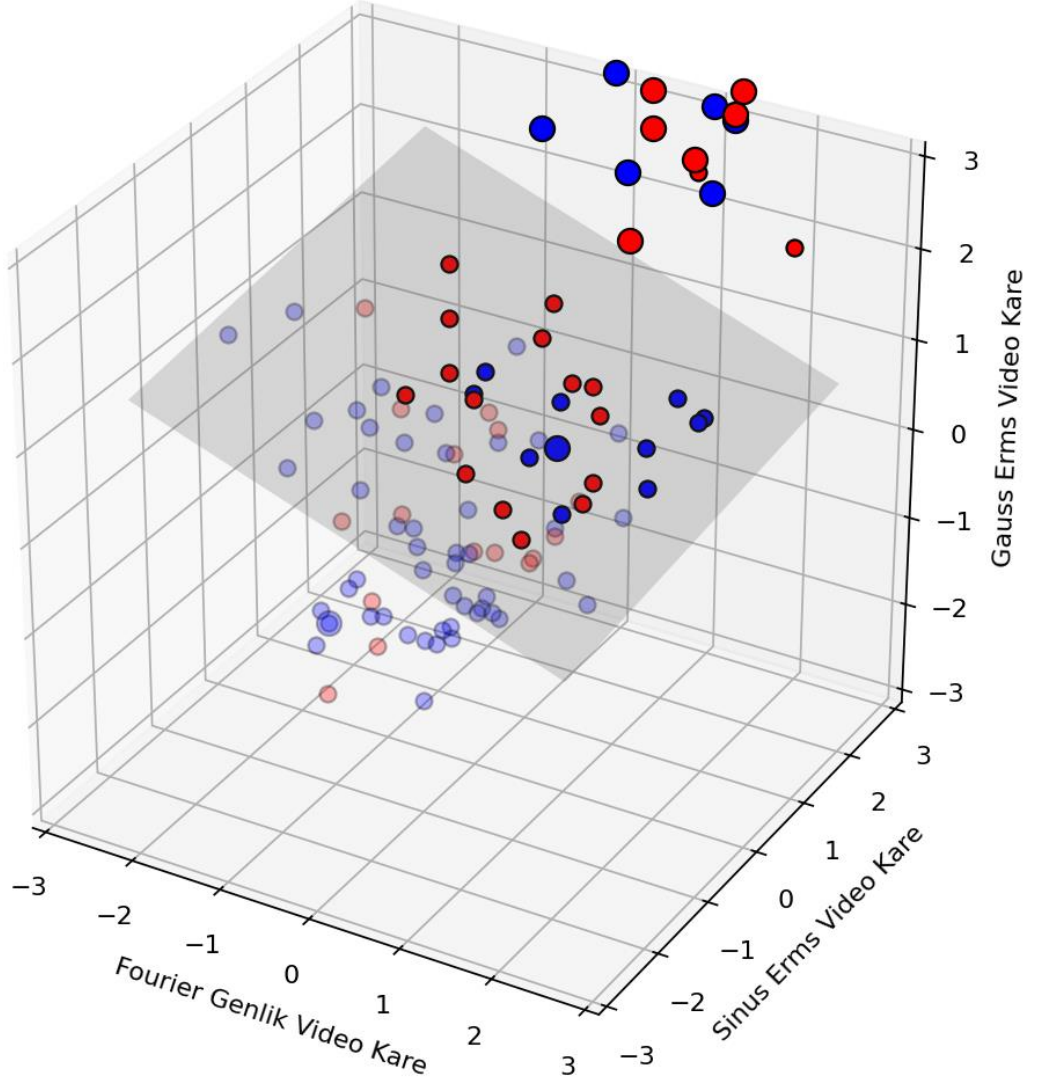
EK.5 Deney 5- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 5 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



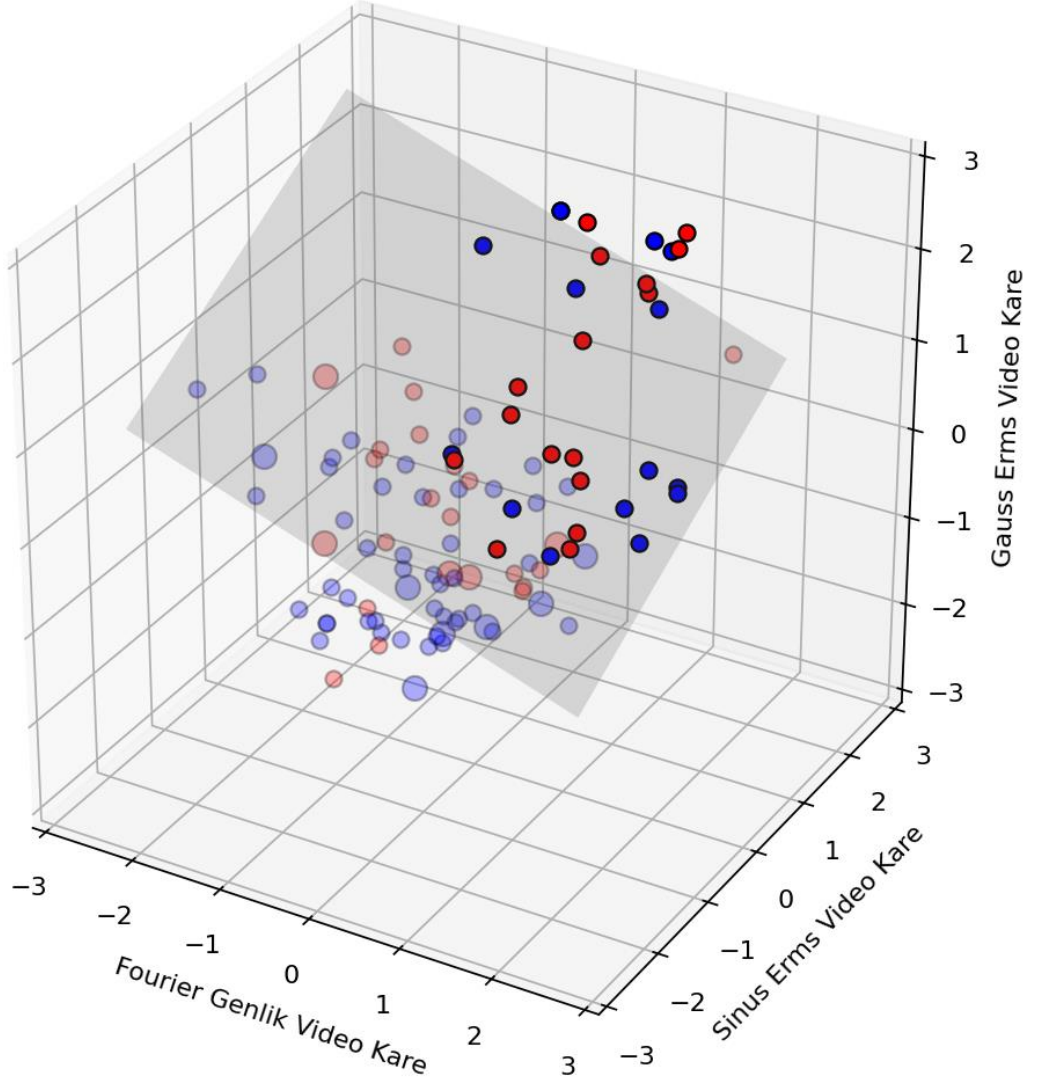
EK.6 Deney 6- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 6 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



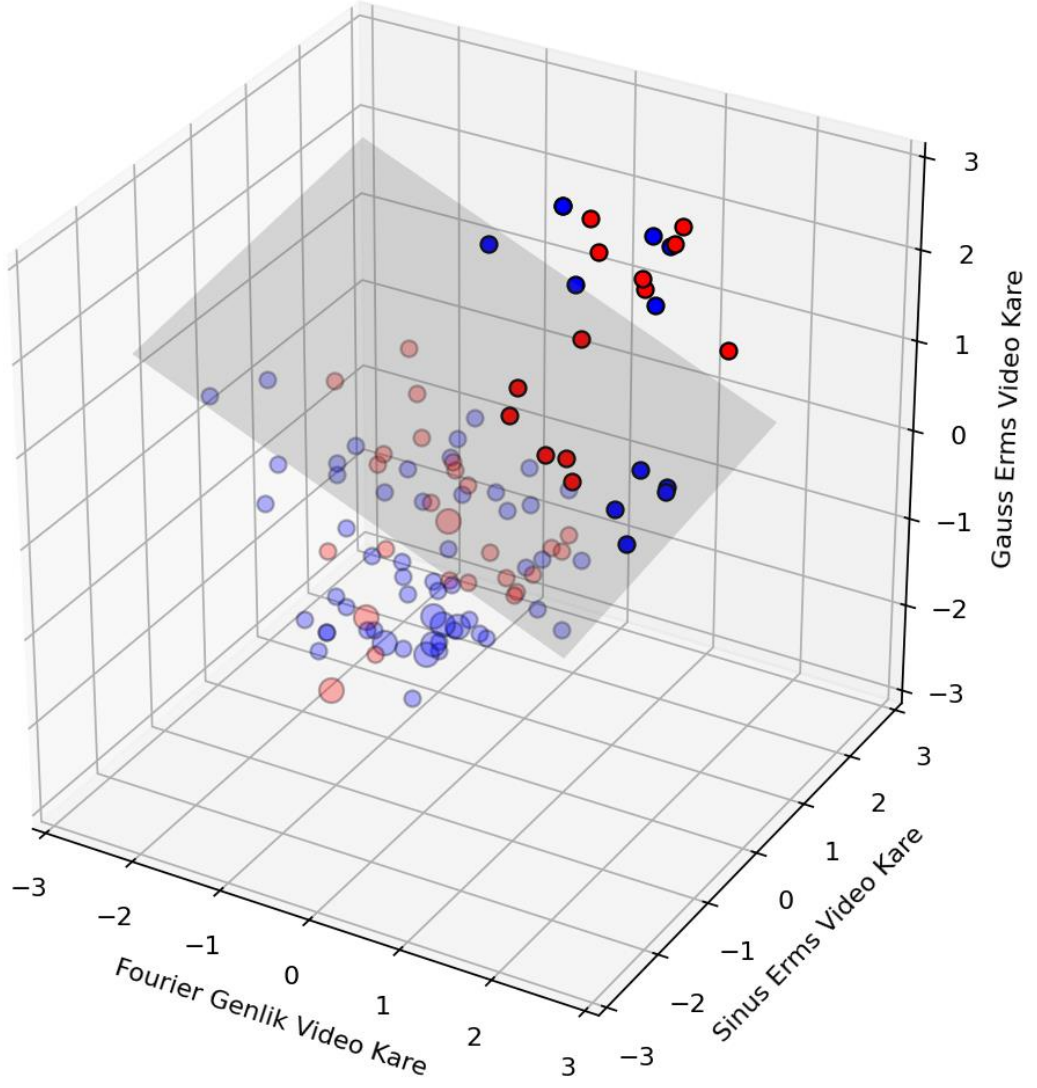
EK.7 Deney 7- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 7 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



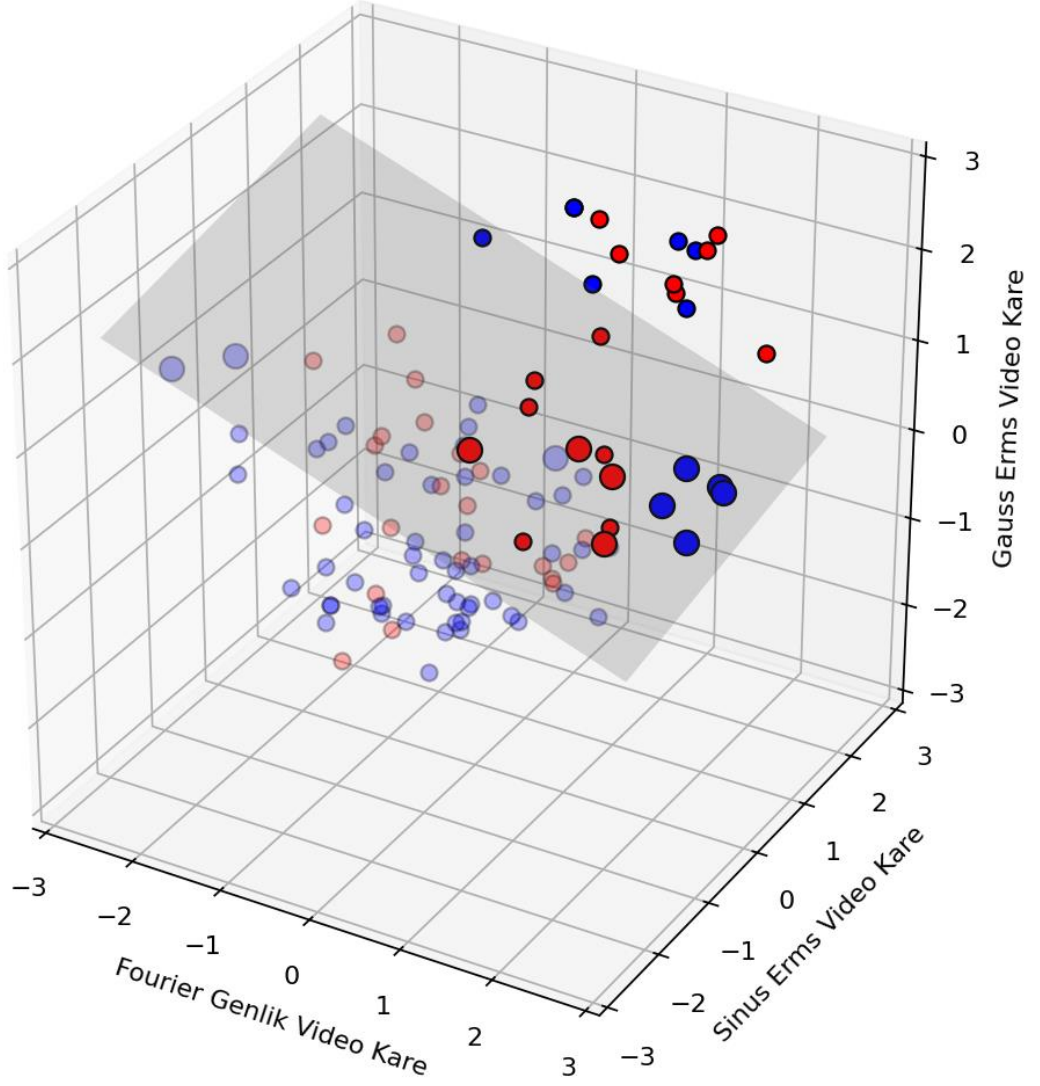
EK.8 Deney 8- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 8 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



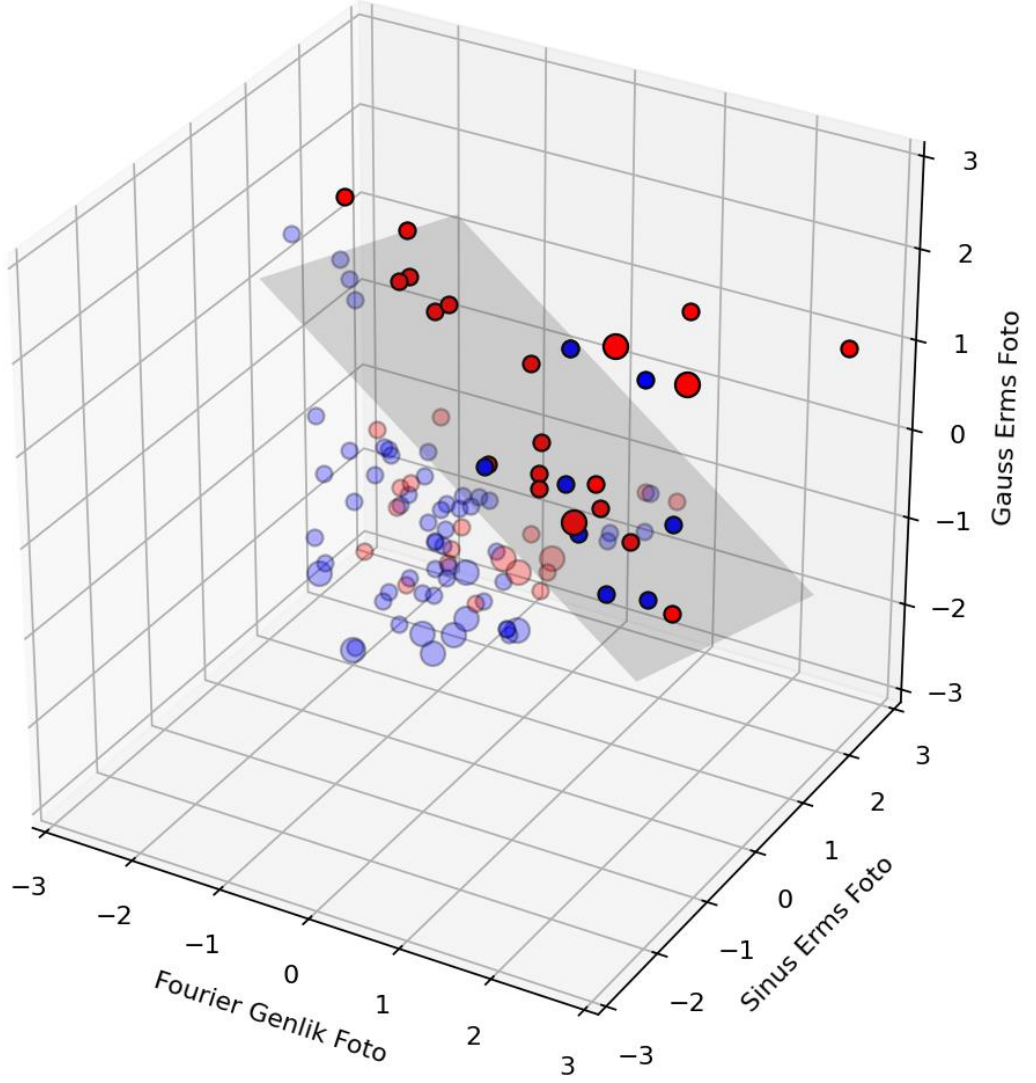
EK.9 Deney 9- Video Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 9 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



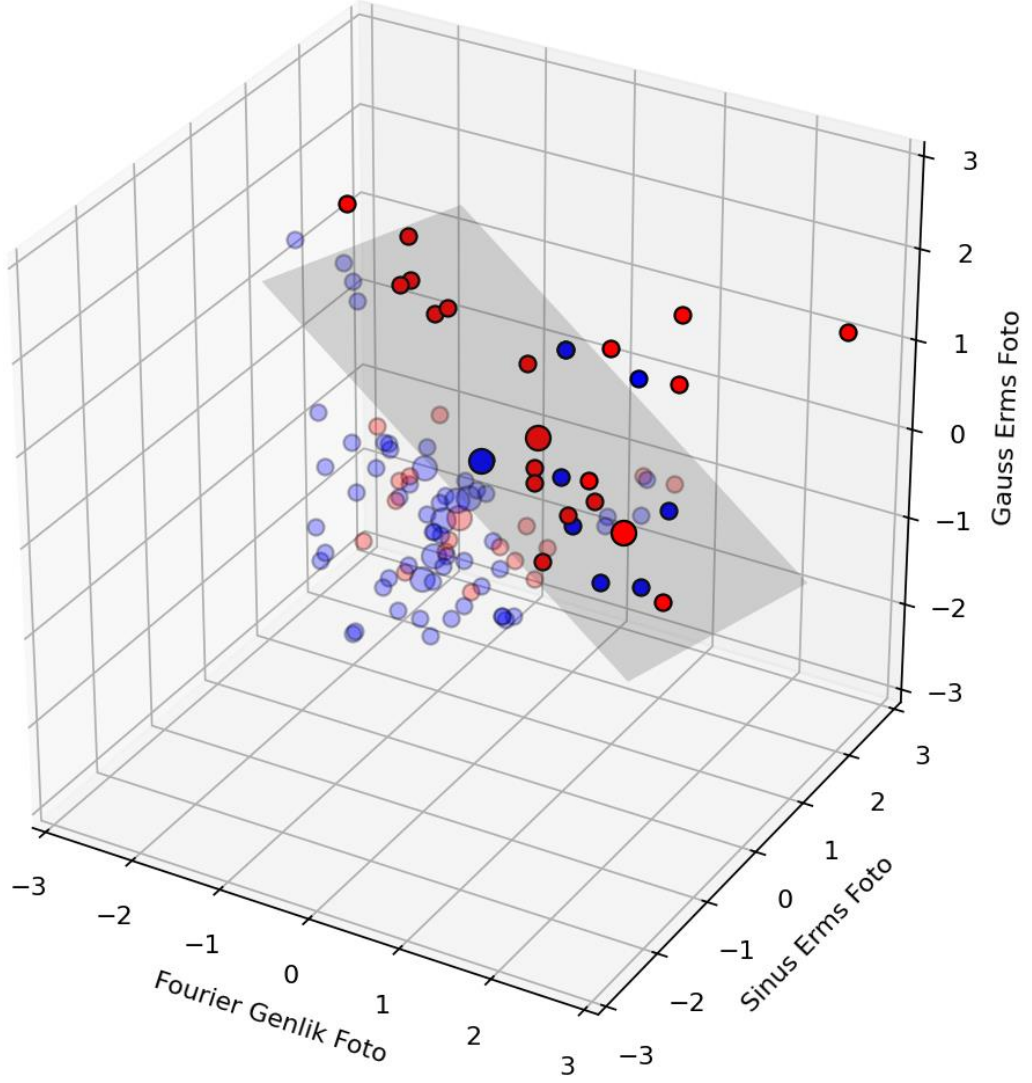
EK.10 Deney 1- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 1 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.22$ mm/dev, $a=0.4$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



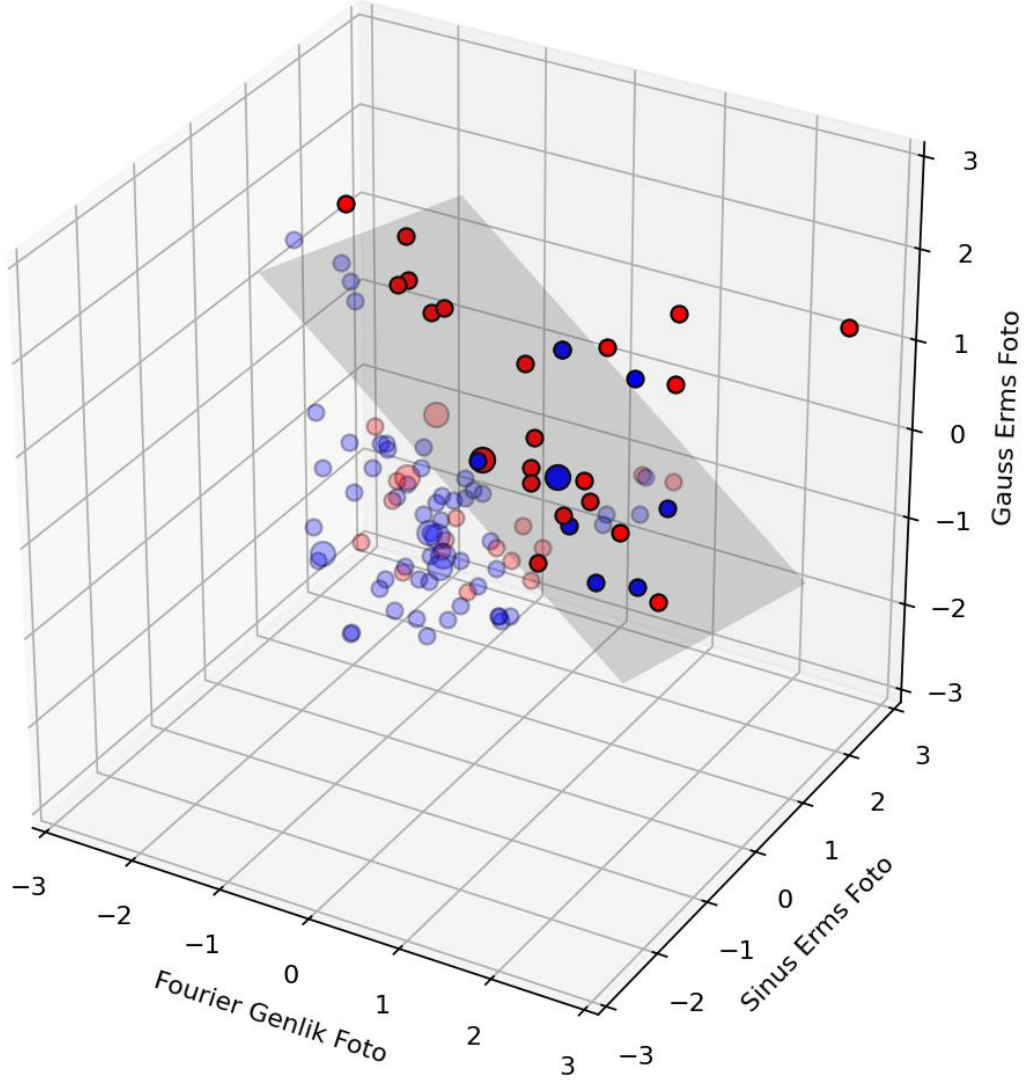
EK.11 Deney 2- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 2 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



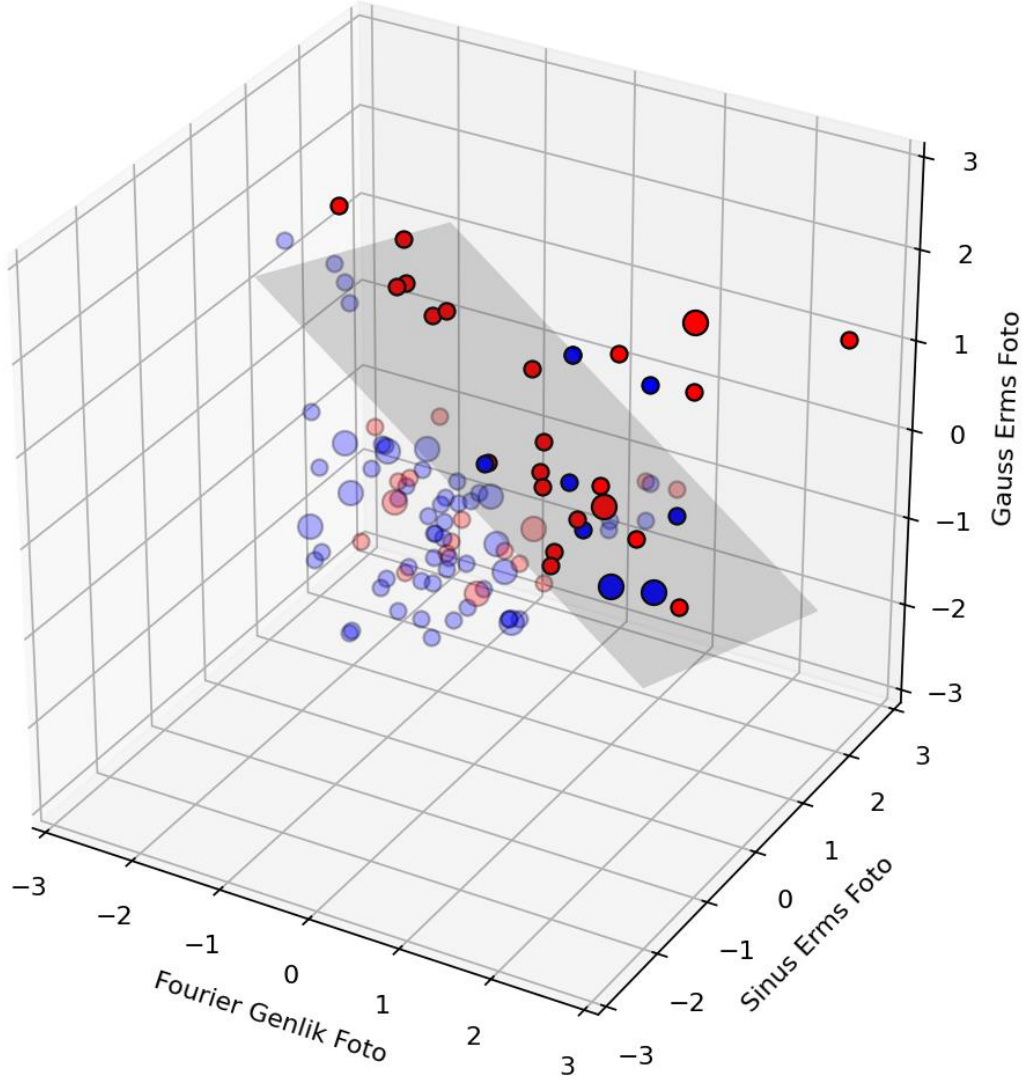
EK.12 Deney 3- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 3 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



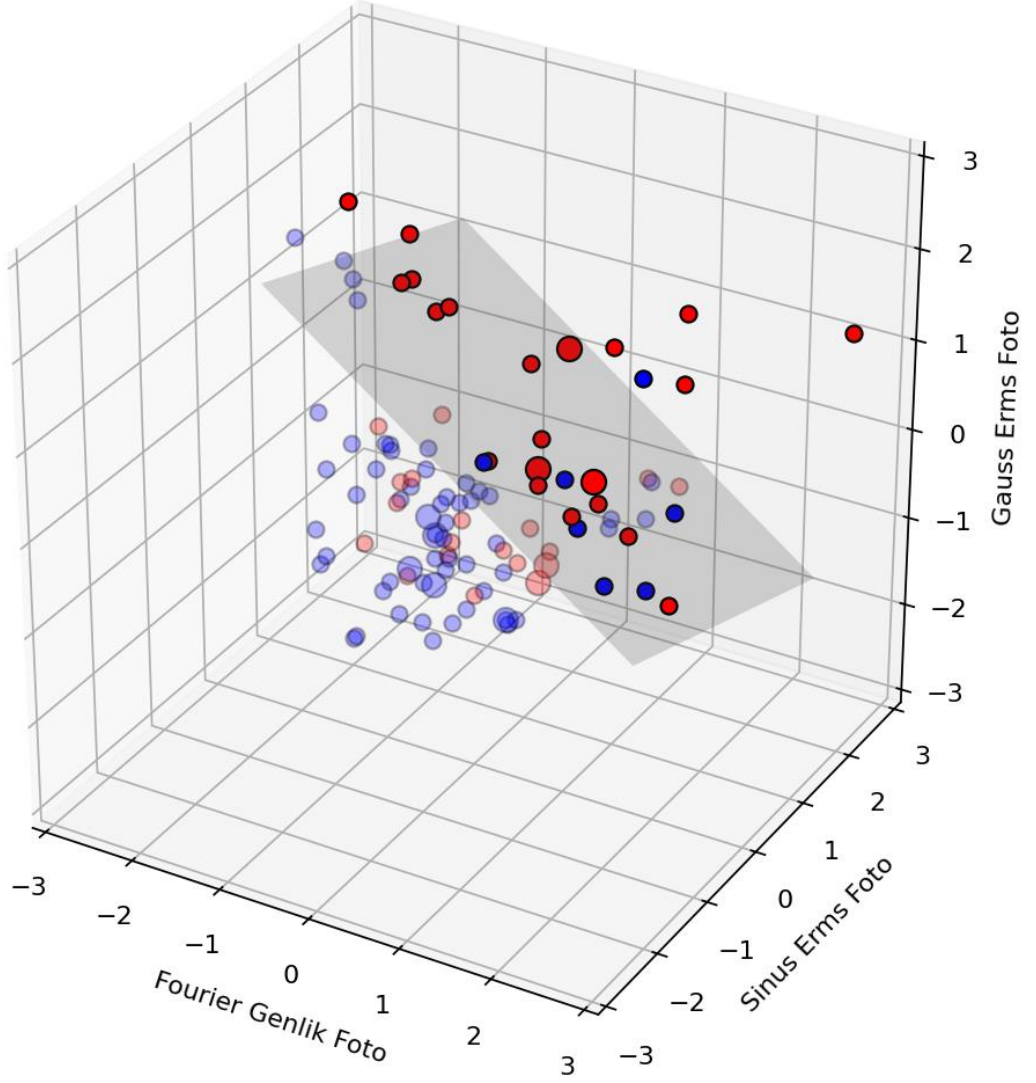
EK.13 Deney 4- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 4 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



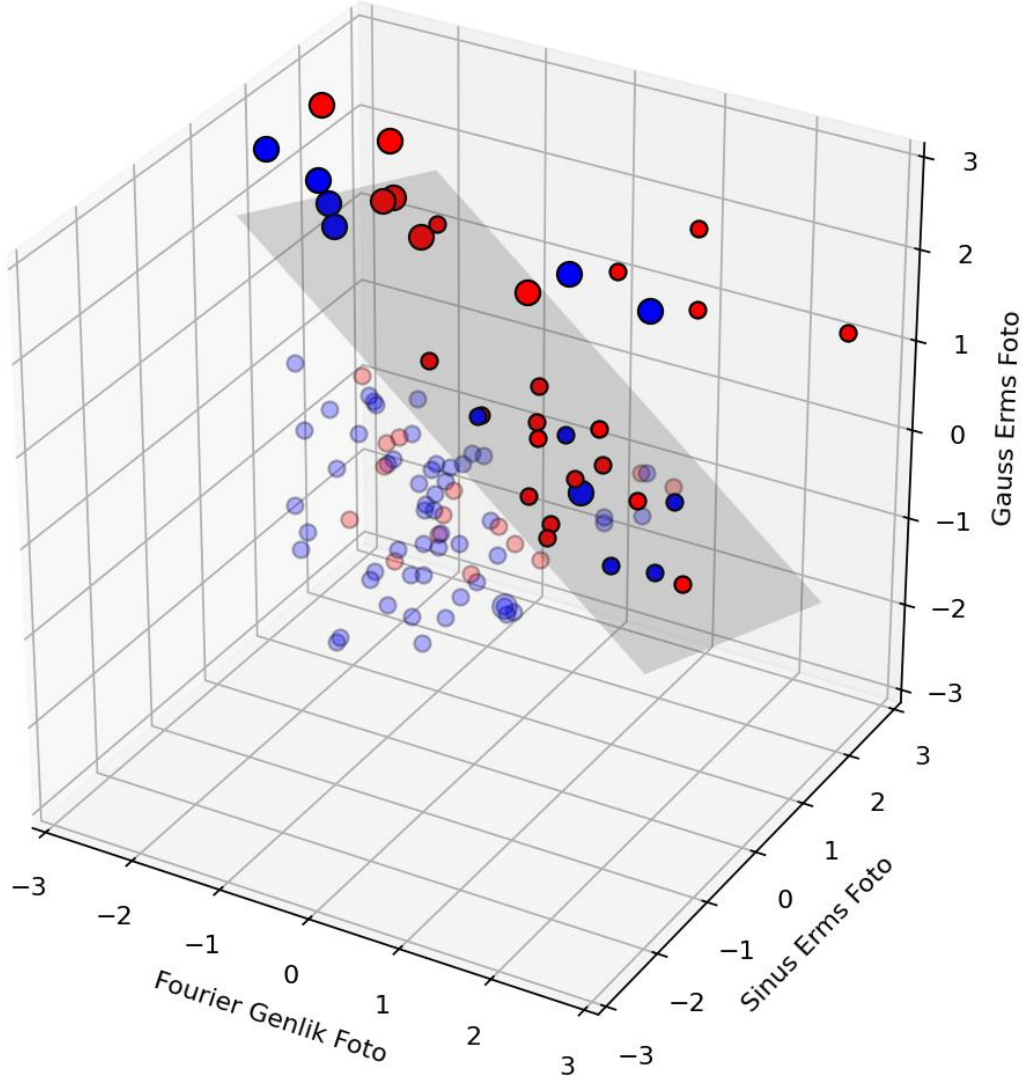
EK.14 Deney 5- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 5 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



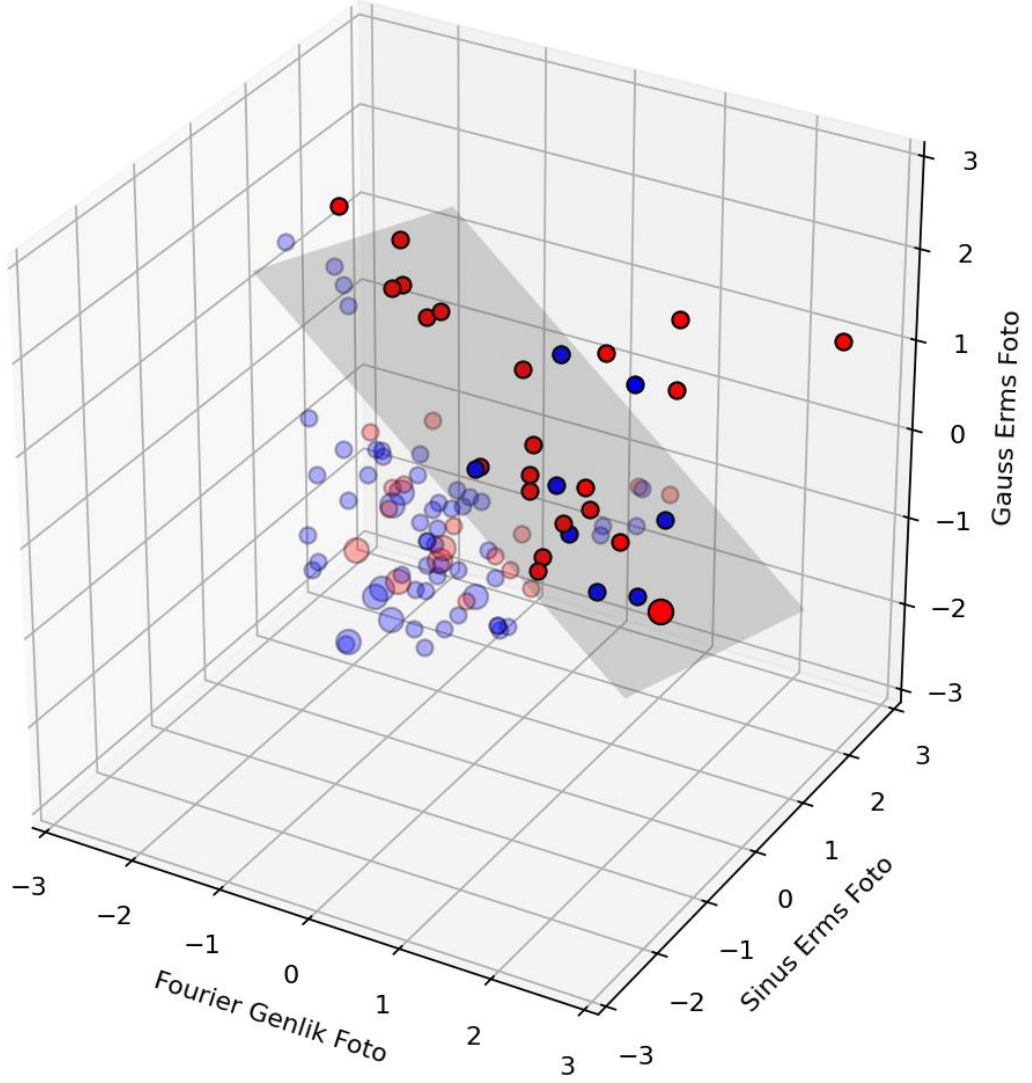
EK.15 Deney 6- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 6 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



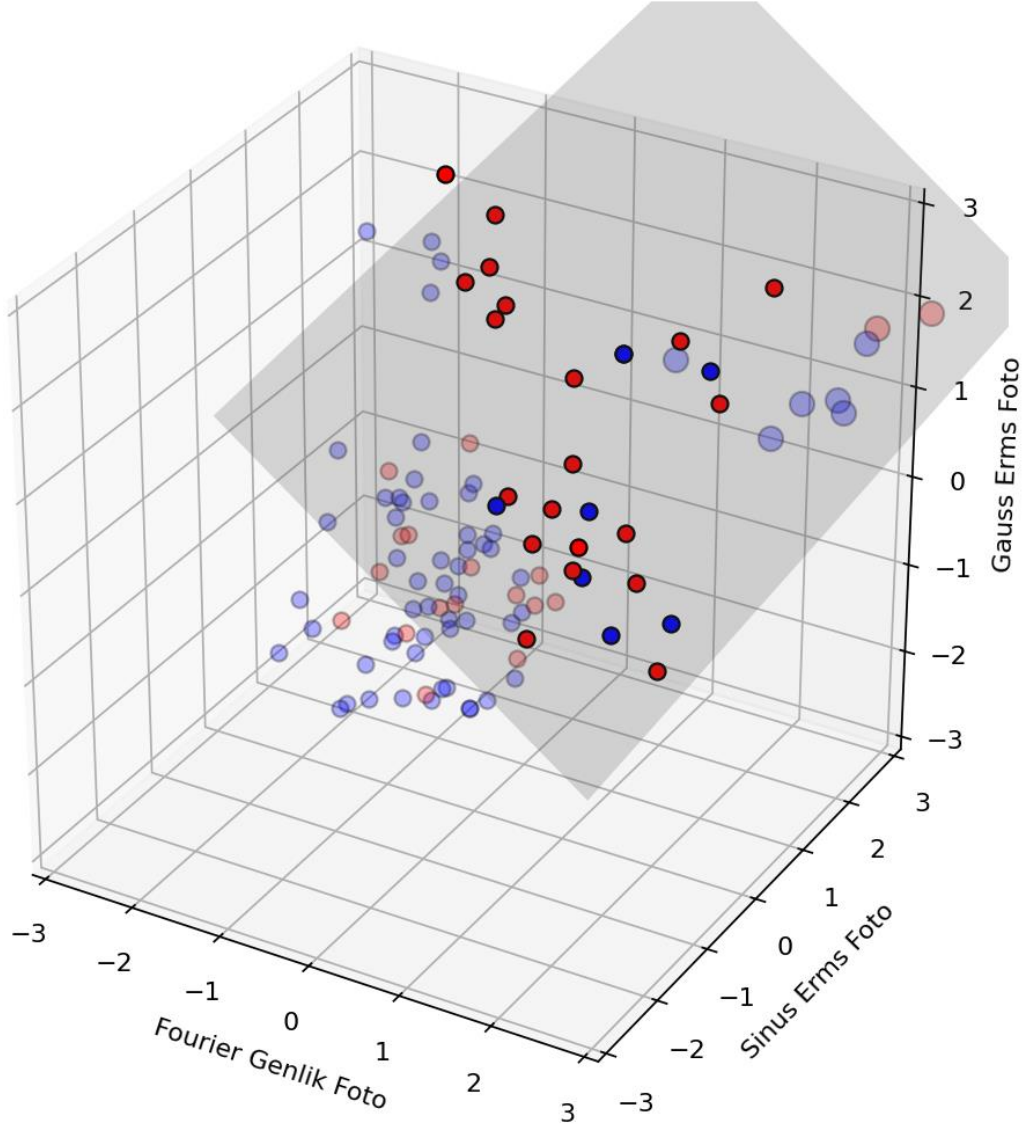
EK.16 Deney 7- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 7 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



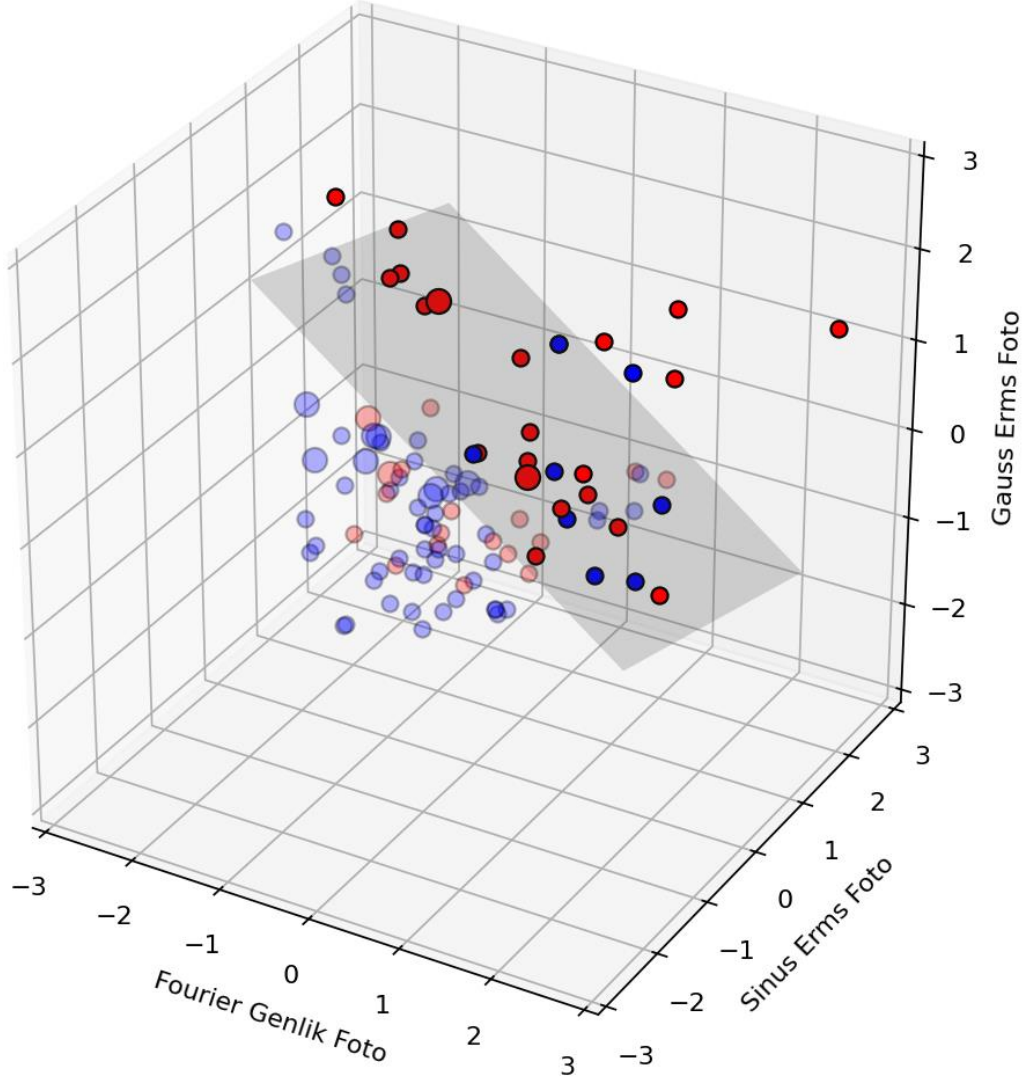
EK.17 Deney 8- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 8 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



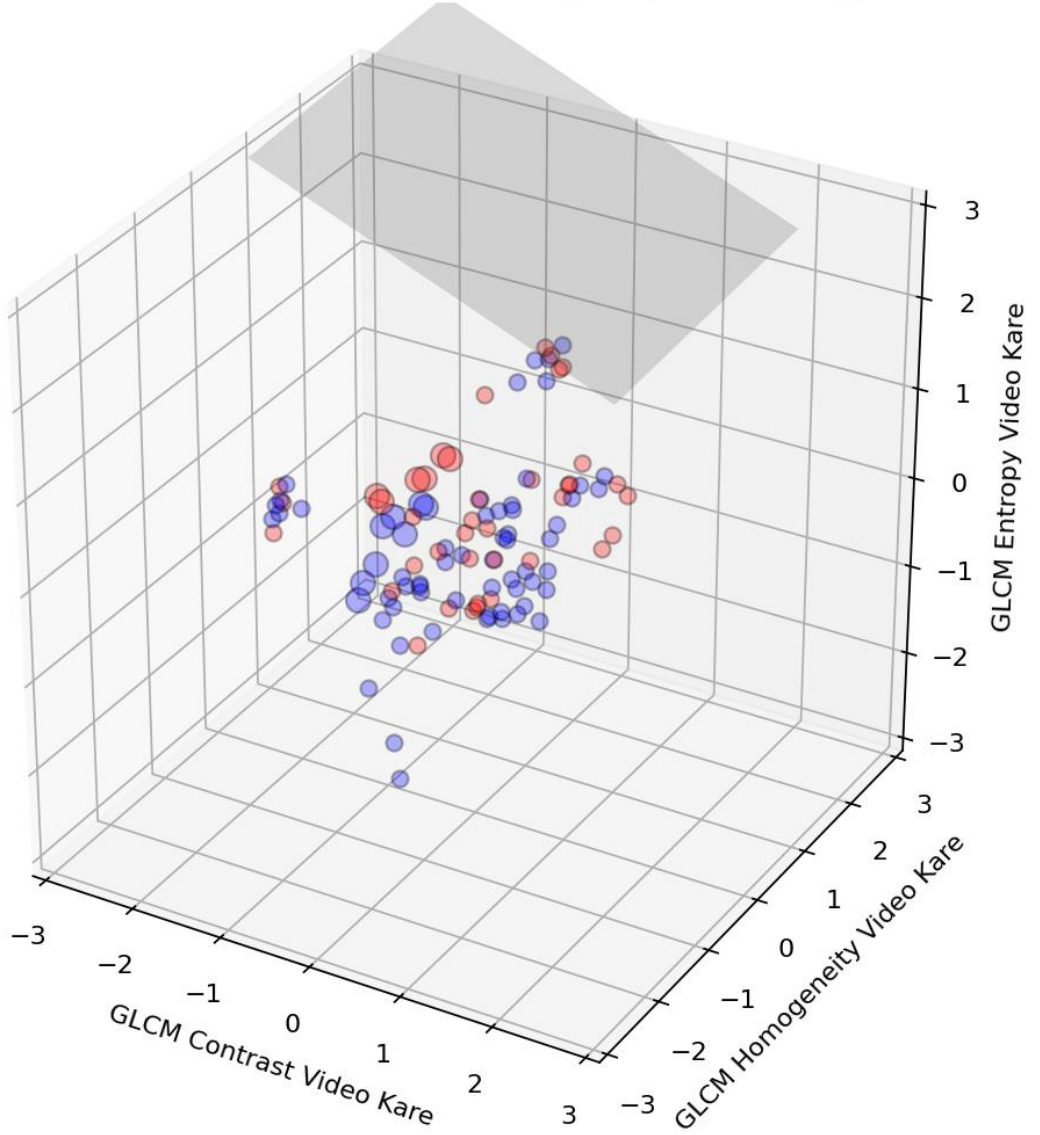
EK.18 Deney 9- Foto Karelerinden çıkarılan FSG öznitelikleri için SVM ayırım uzayı

[standard] Deney 9 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: Fourier Genlik, Sinus Erms, Gauss Erms



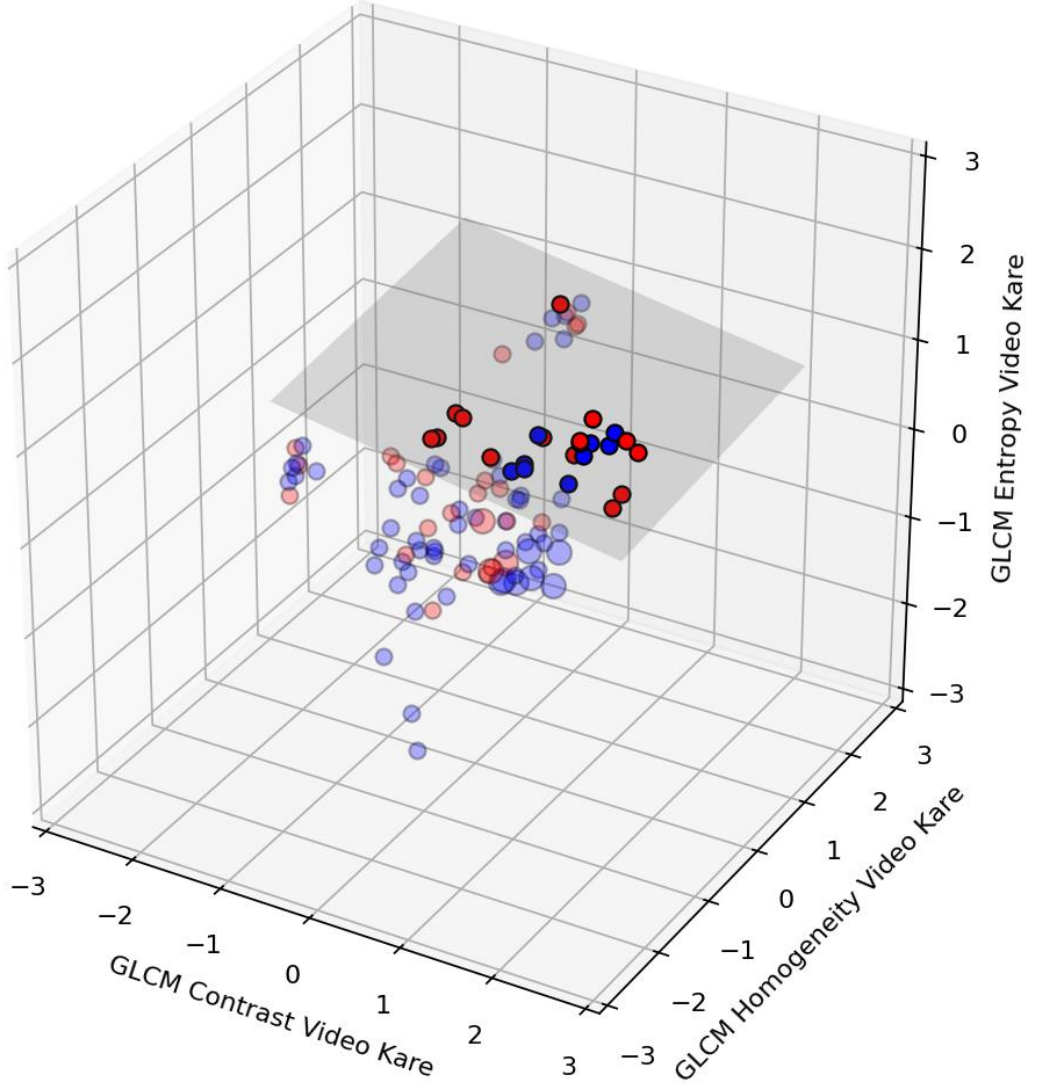
EK.19 Deney 1- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 1 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.22$ mm/dev, $a=0.4$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



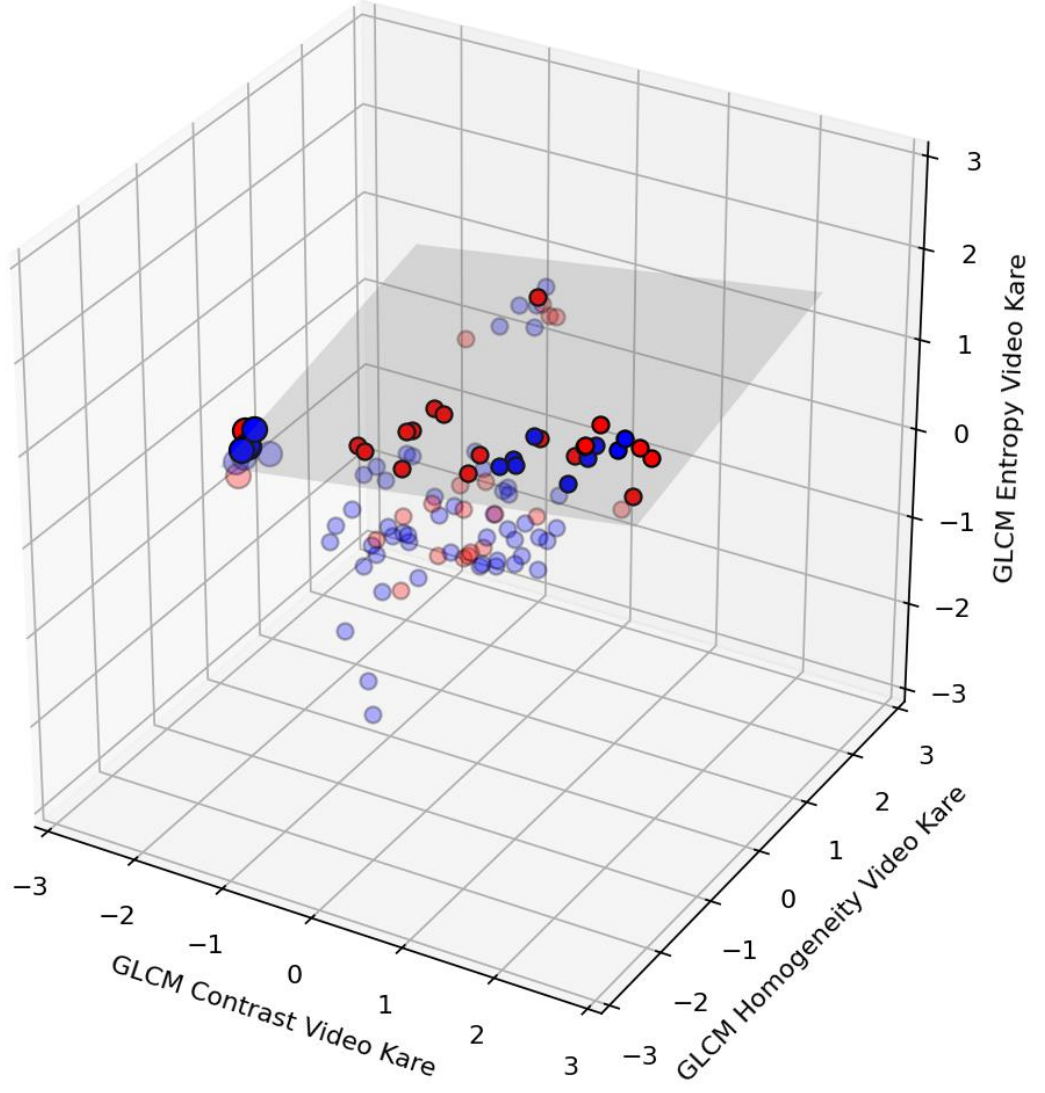
EK.20 Deney 2- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayrım
uzayı

[standard] Deney 2 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



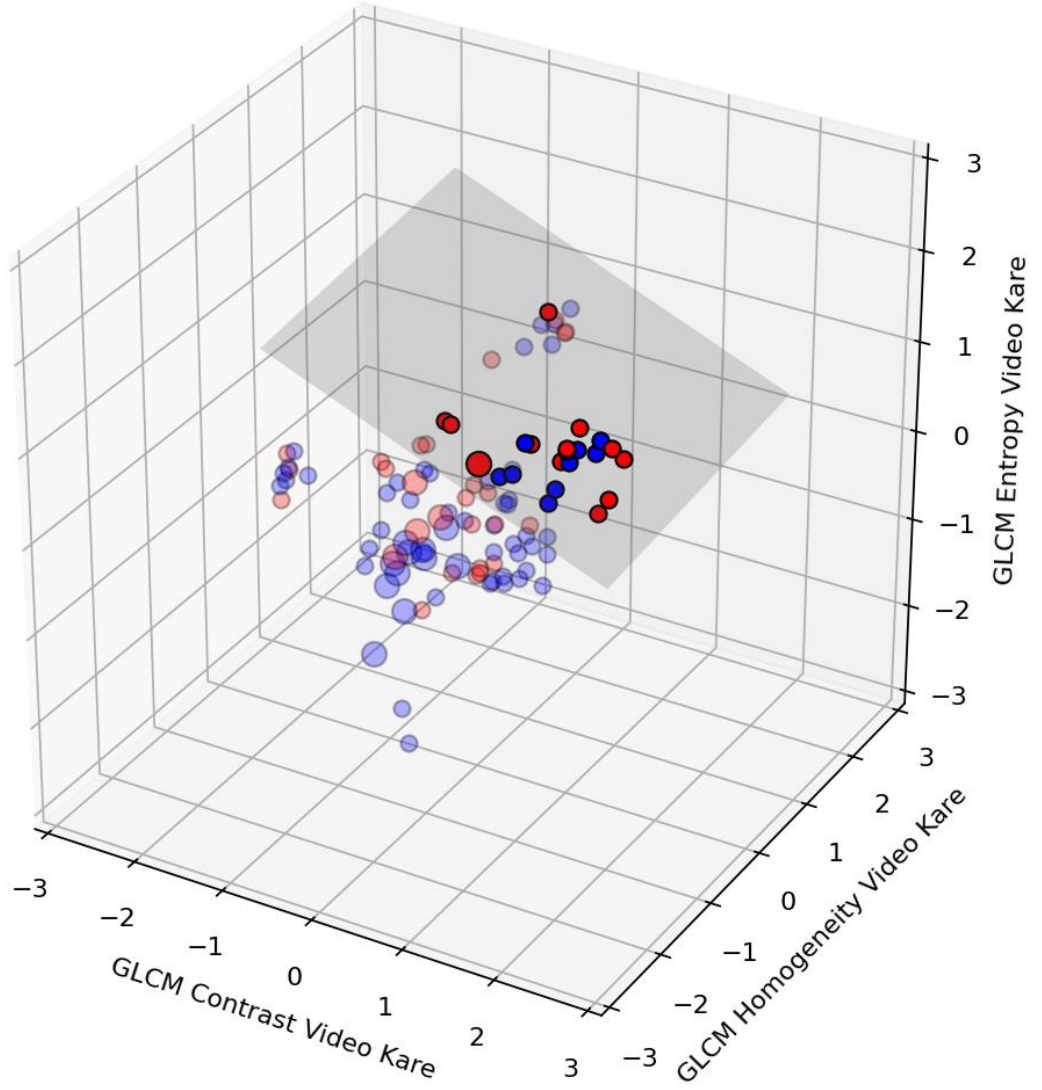
EK.21 Deney 3- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayrım
uzayı

[standard] Deney 3 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



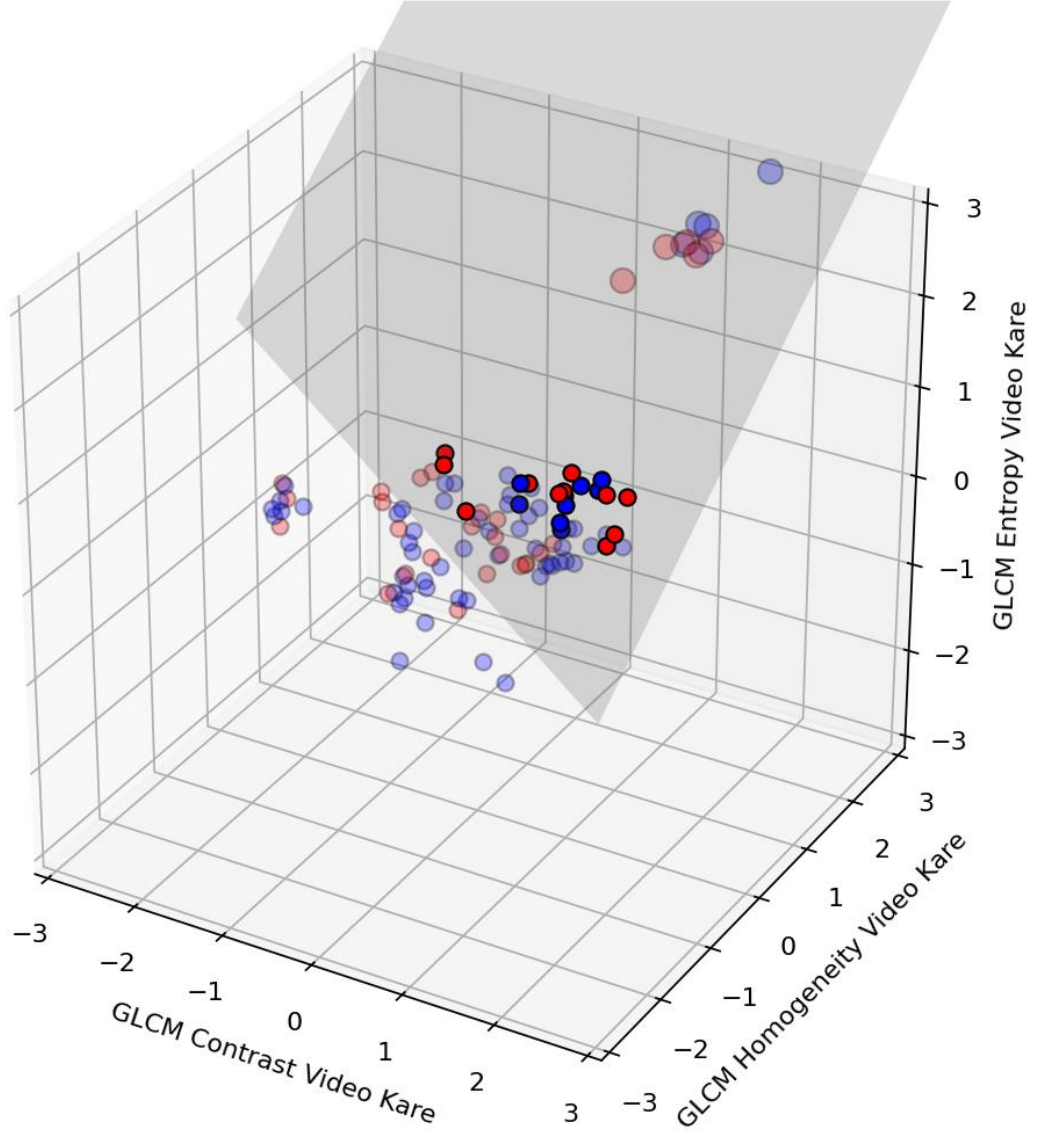
EK.22 Deney 4- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 4 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



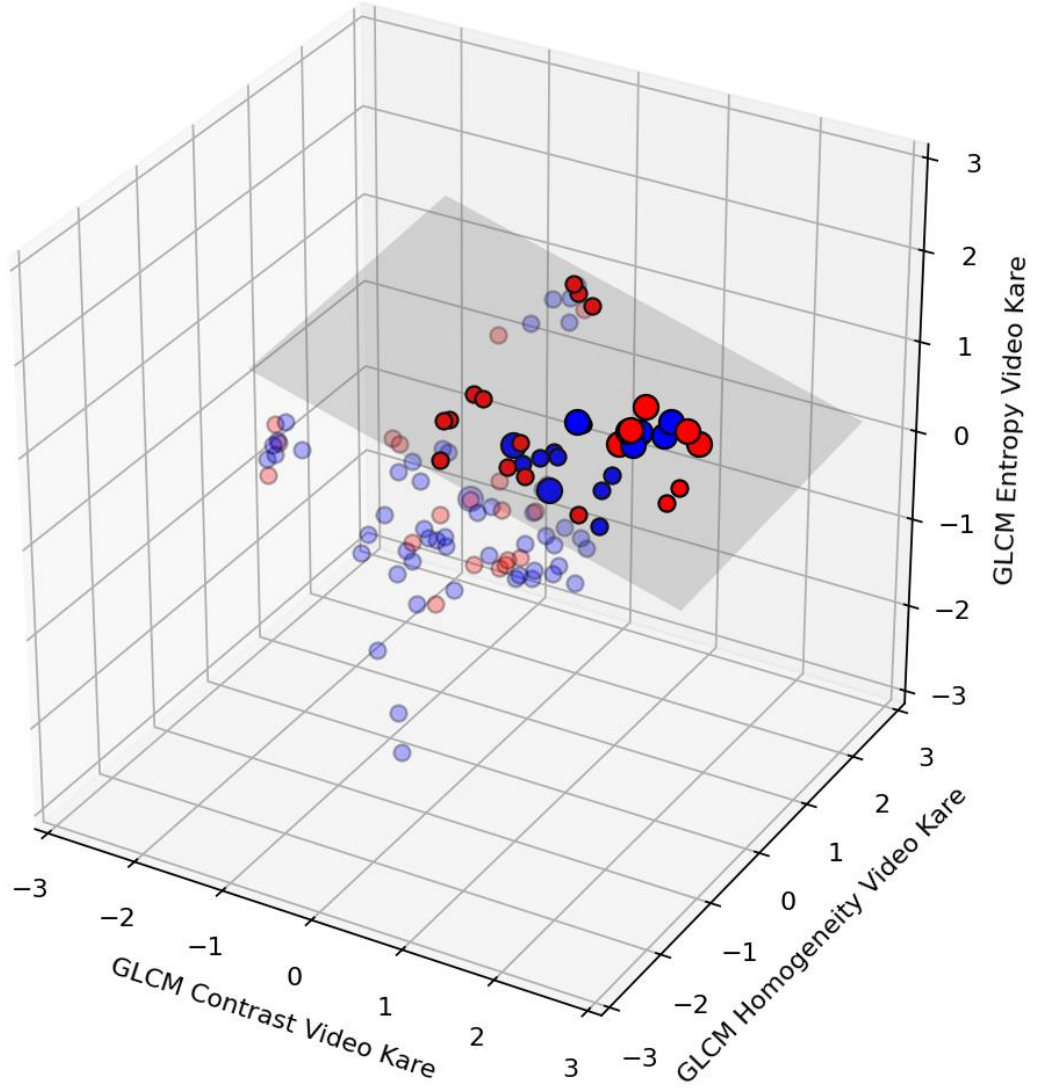
EK.23 Deney 5- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 5 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



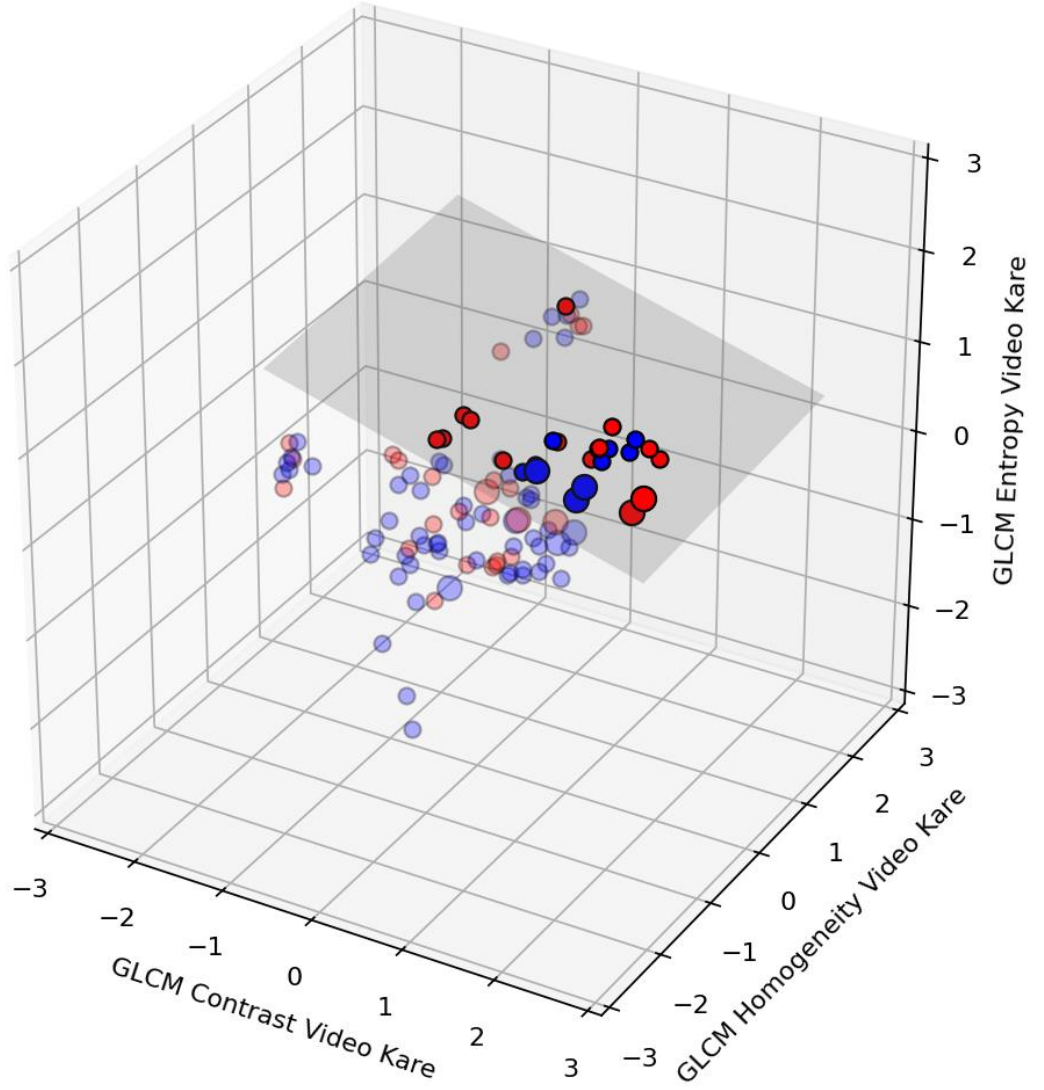
EK.24 Deney 6- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 6 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



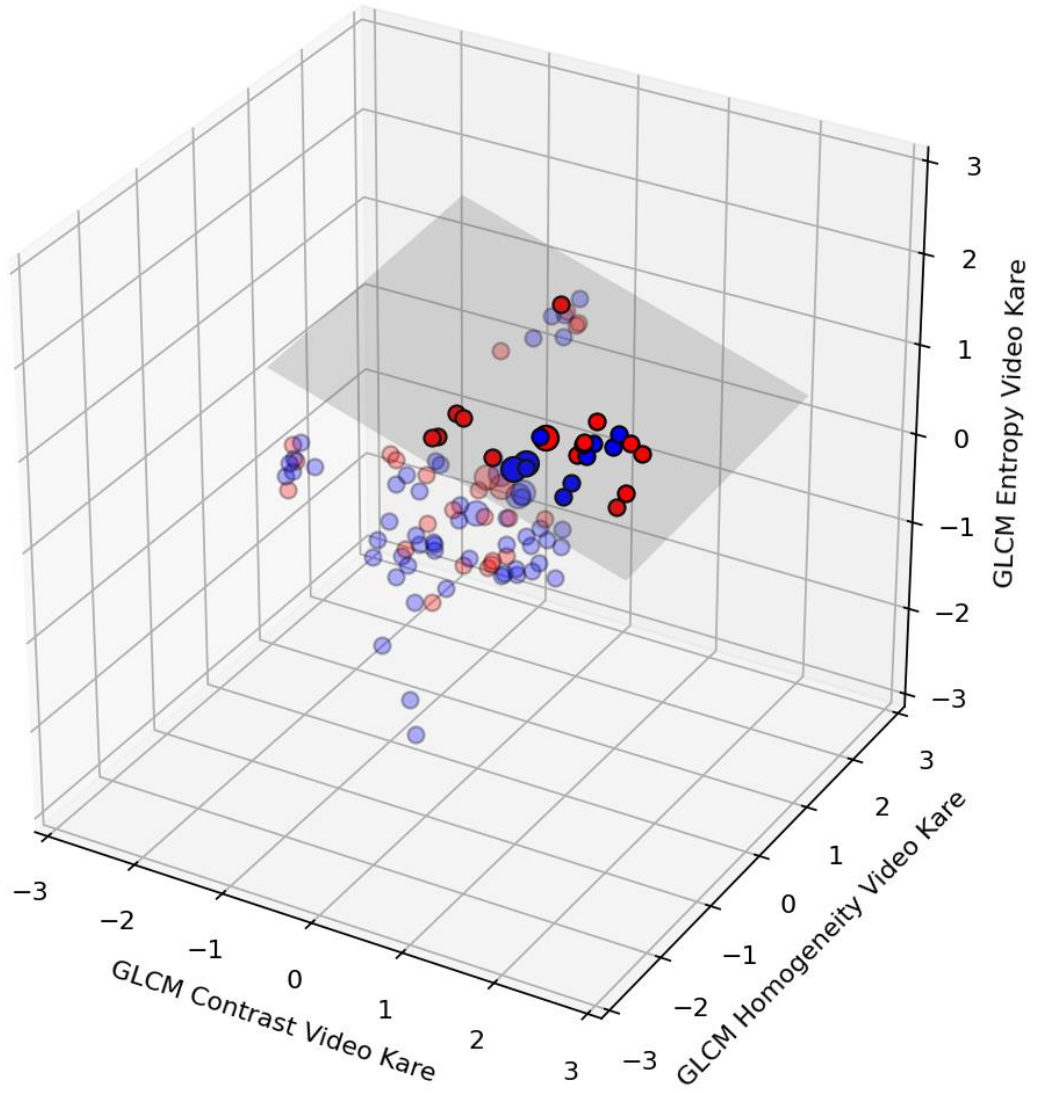
EK.25 Deney 7- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 7 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



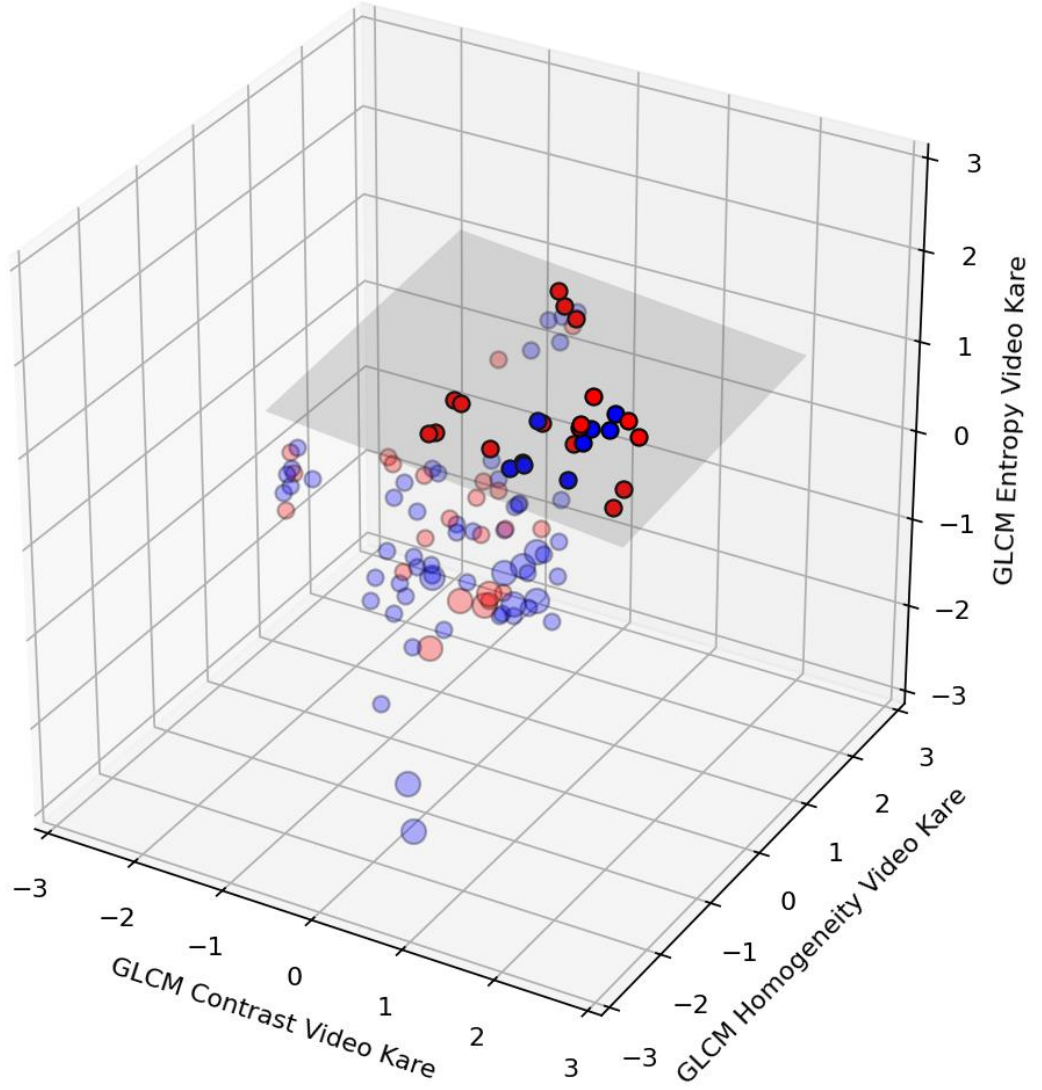
EK.26 Deney 8- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 8 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



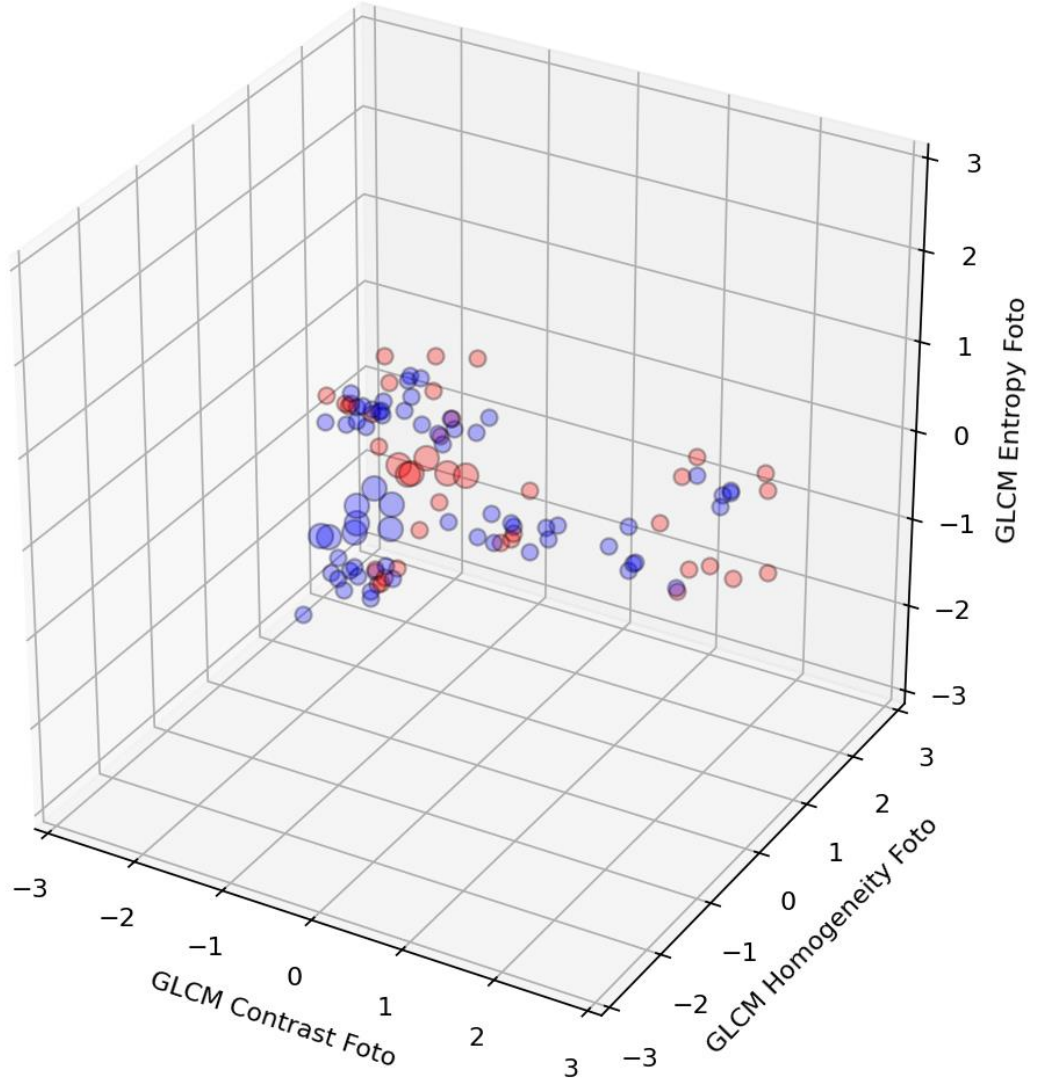
EK.27 Deney 9- Video Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 9 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



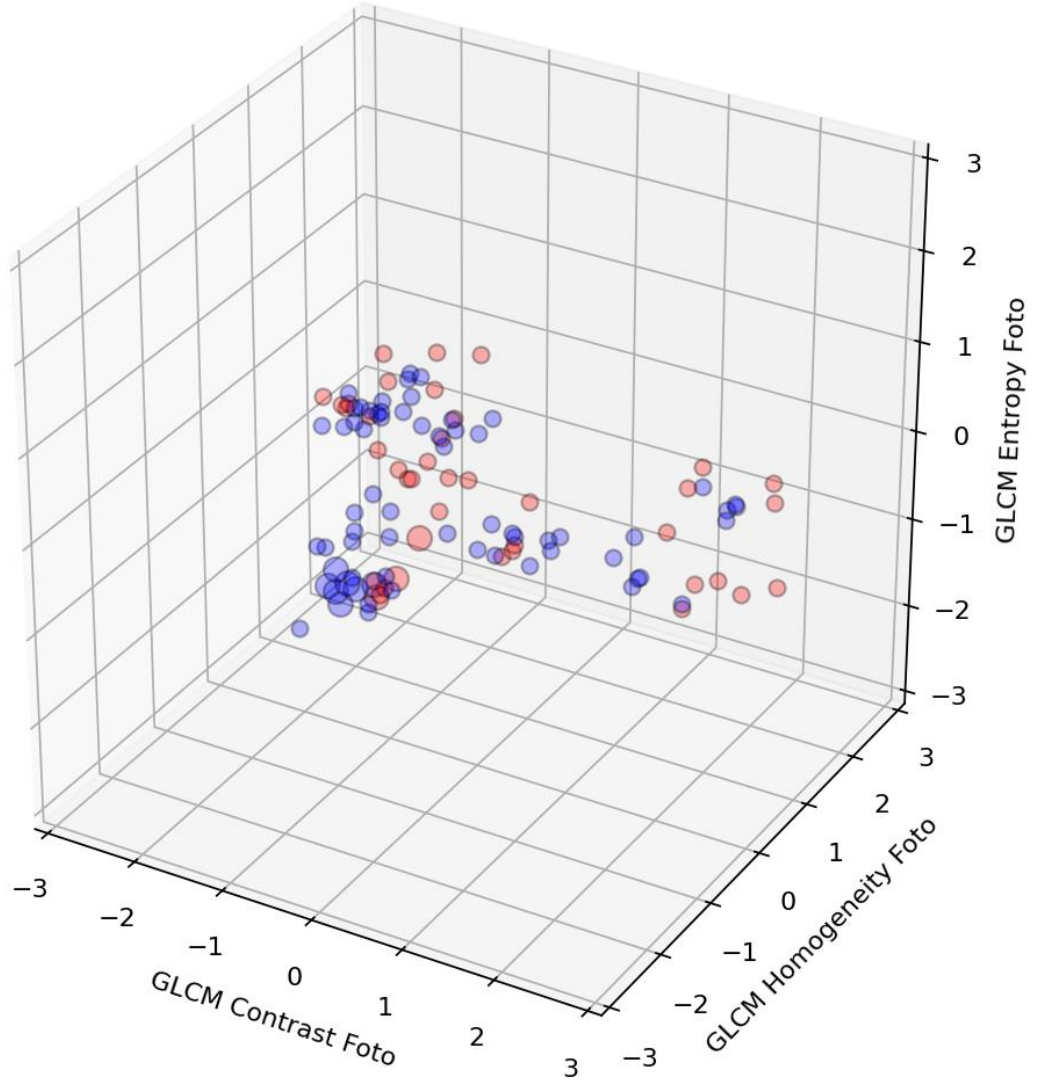
EK.28 Deney 1- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 1 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.22$ mm/dev, $a=0.4$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



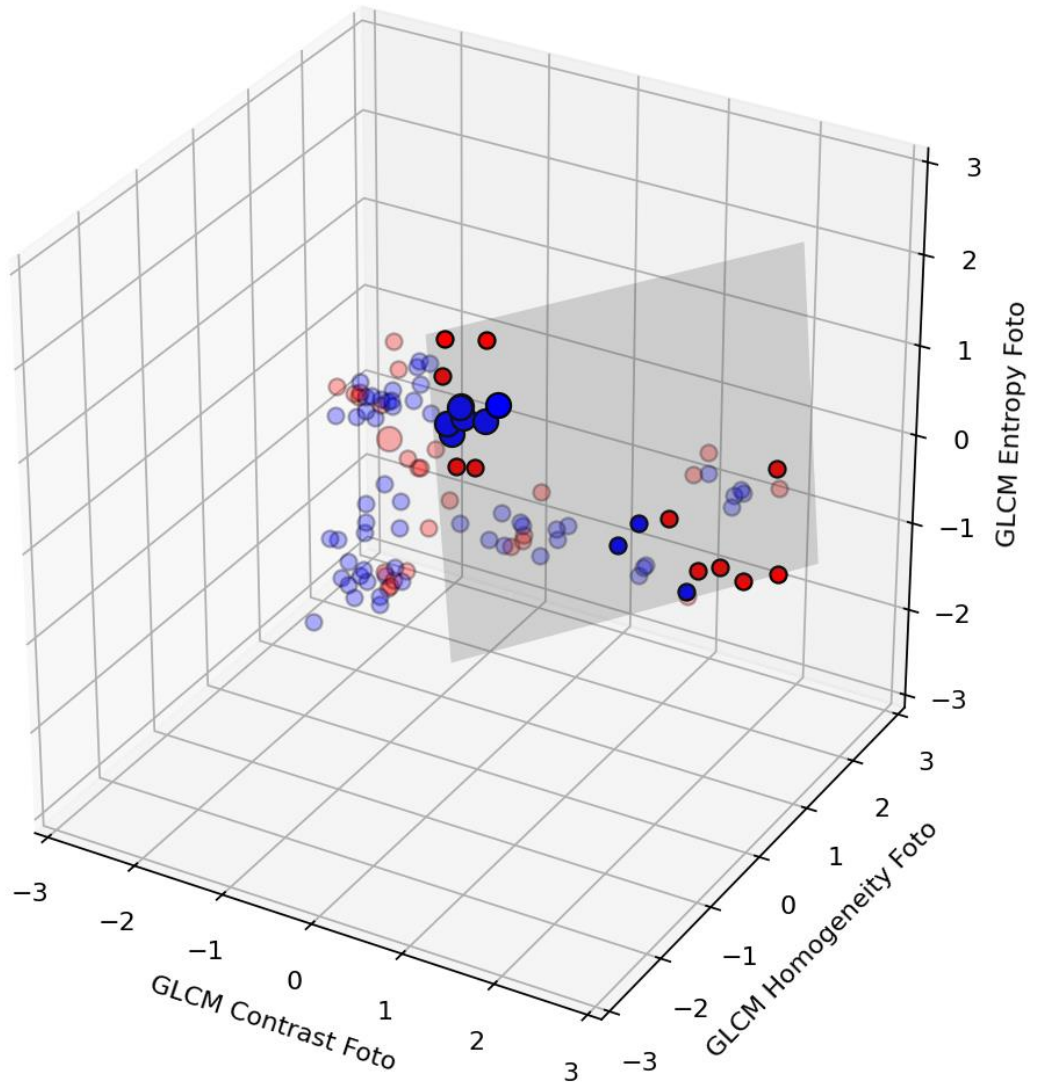
EK.29 Deney 2- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 2 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



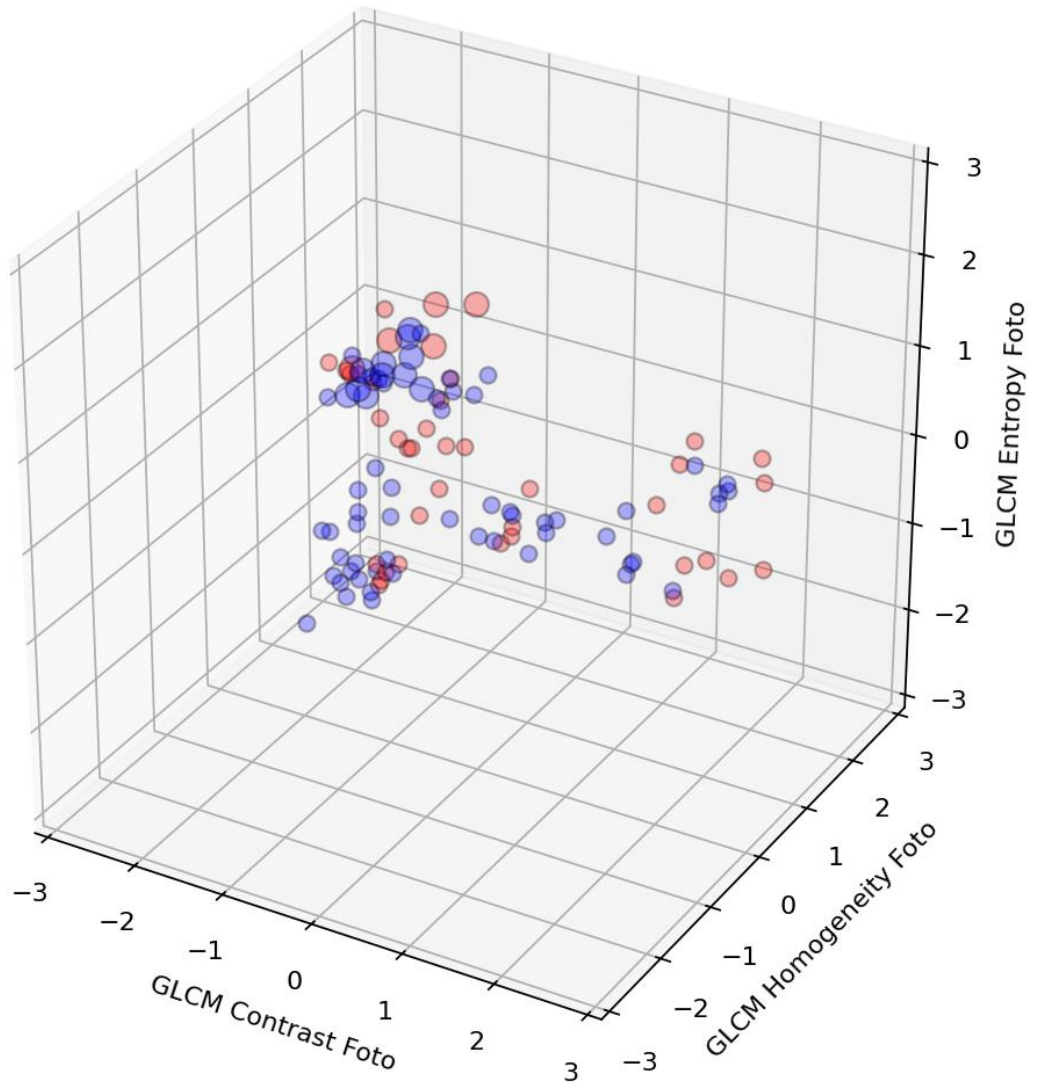
EK.30 Deney 3- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 3 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



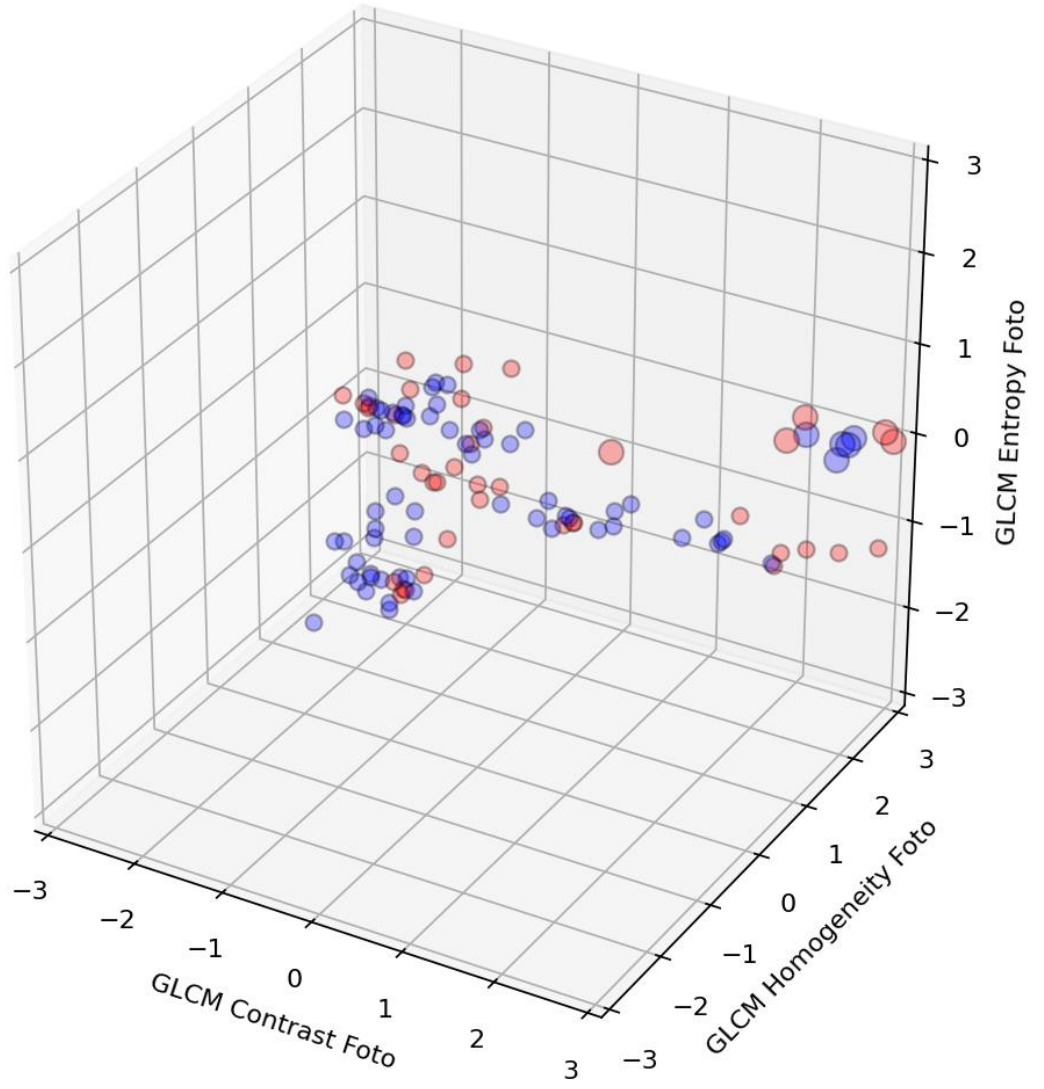
EK.31 Deney 4- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 4 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



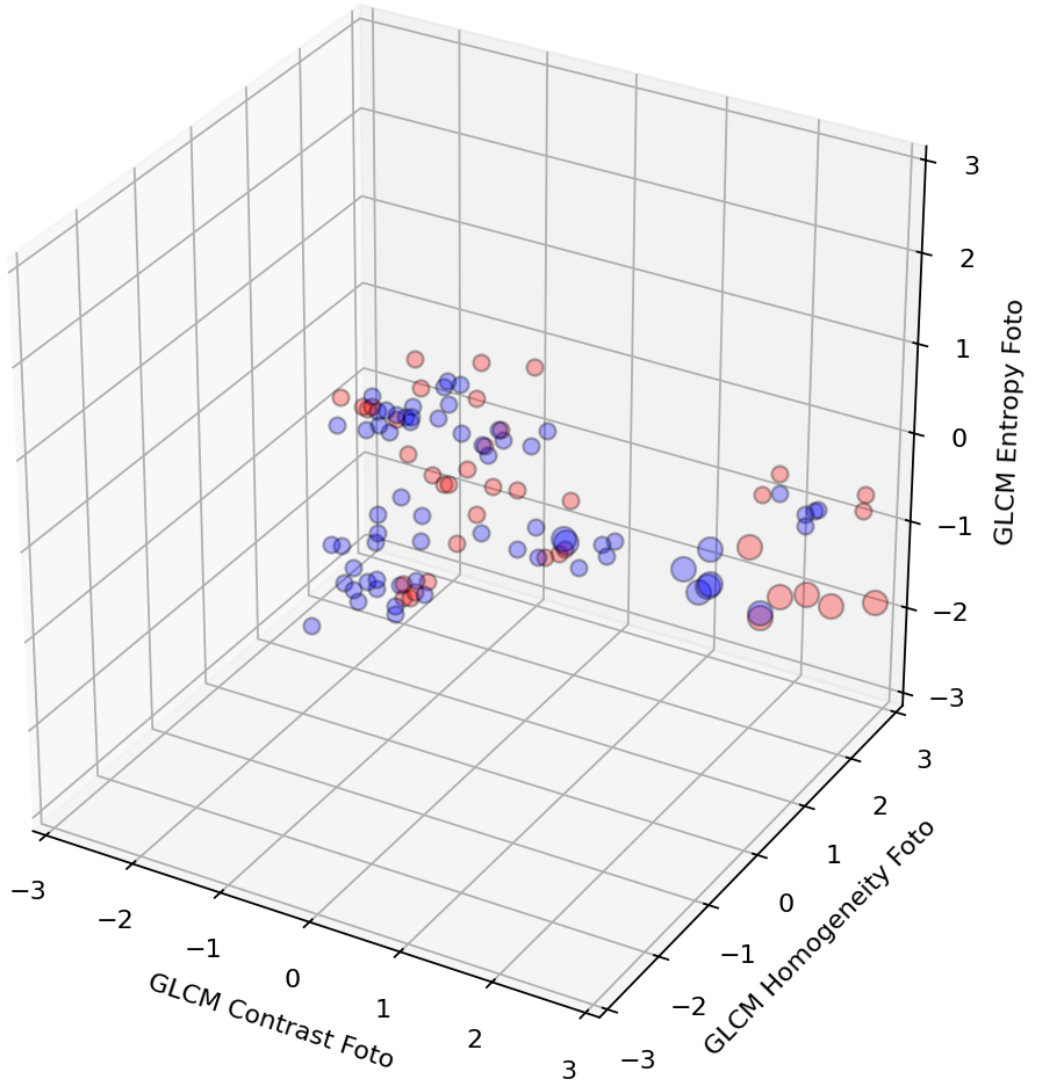
EK.32 Deney 5- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 5 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



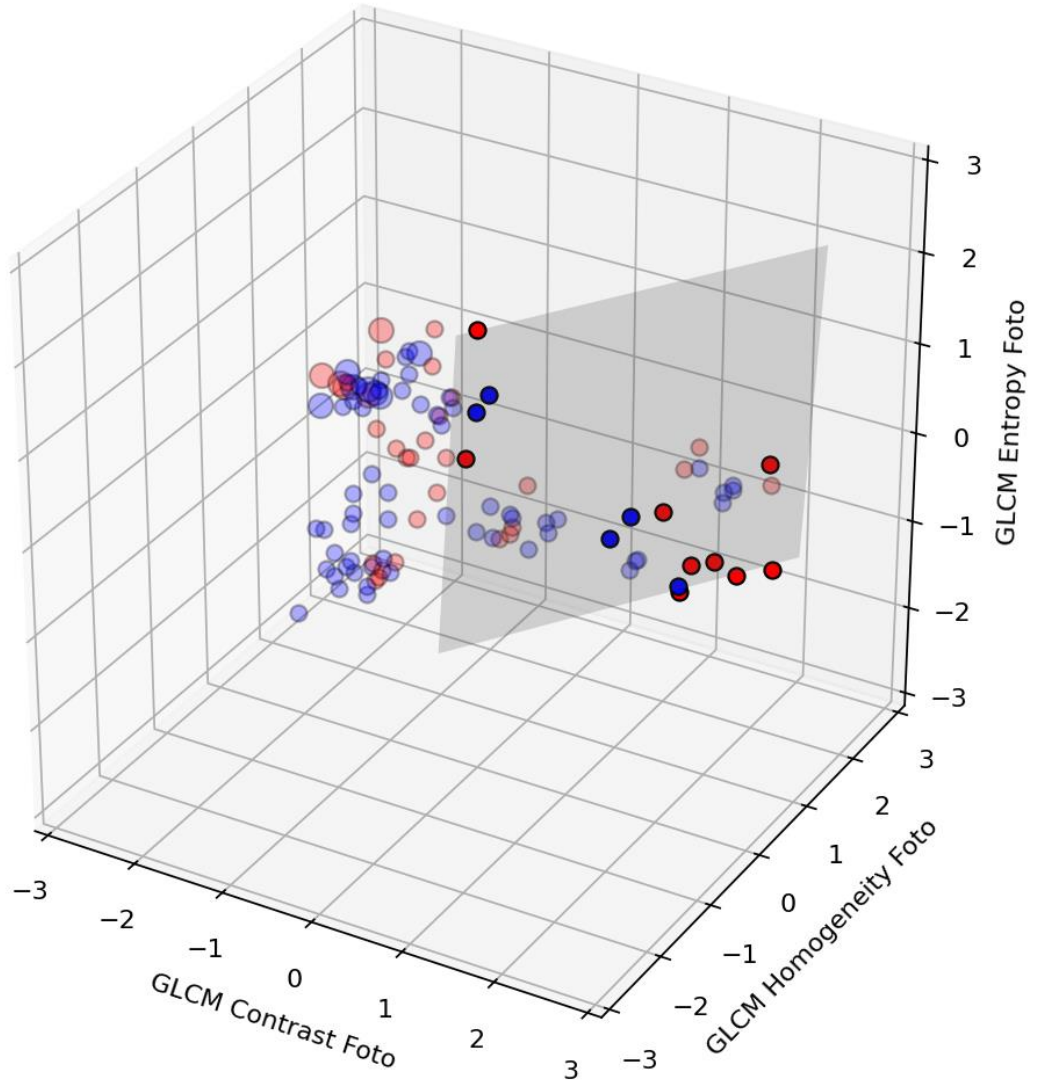
EK.33 Deney 6- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 6 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



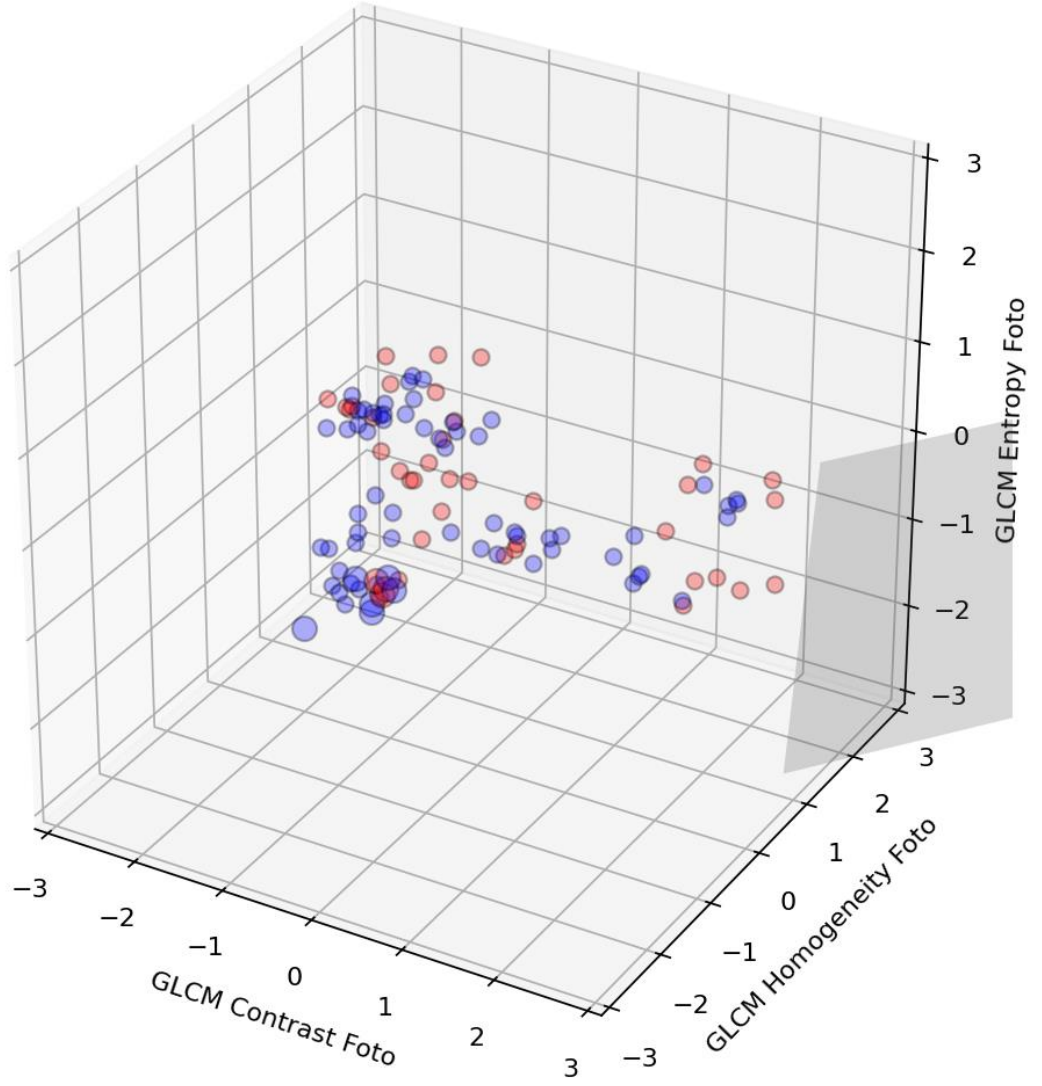
EK.34 Deney 7- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 7 | $V=180.0$ m/dk, $f=0.2$ mm/dev, $a=0.3$ mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



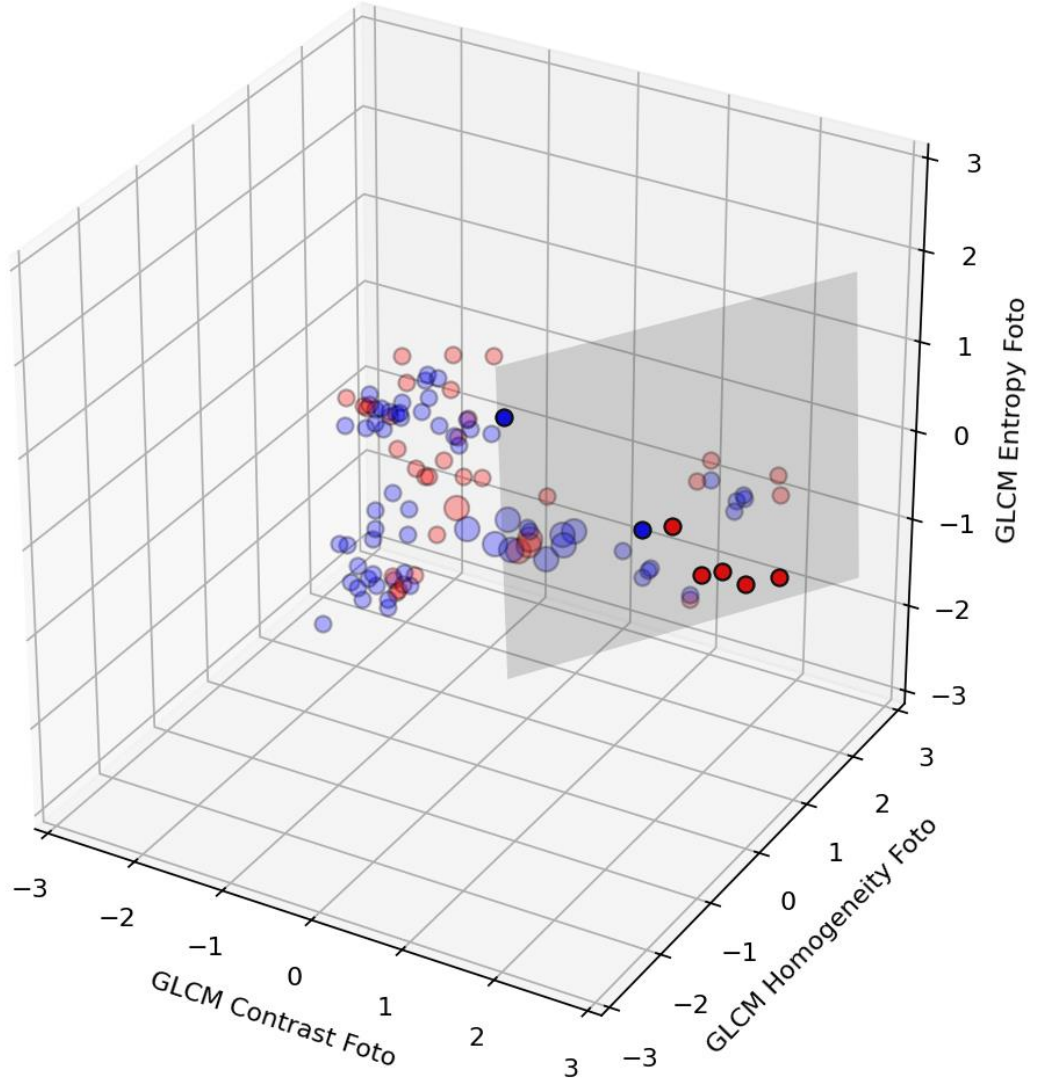
EK.35 Deney 8- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayırım
uzayı

[standard] Deney 8 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



EK.36 Deney 9- Foto Karelerinden çıkarılan GLCM öznitelikleri için SVM ayrım
uzayı

[standard] Deney 9 | V=180.0 m/dk, f=0.2 mm/dev, a=0.3 mm
Özellikler: GLCM Contrast, GLCM Homogeneity, GLCM Entropy



ÖZGEÇMİŞ

Muzaffer Tacettin KÜLLAÇ, lise öğrenimini Mürşide Ermumcu Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında Ukrayna Ulusal Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesiyle mezun oldu. Lisans eğitiminden sonra beş yıl süreyle özel sektörde görev yaptı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2019 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı ve hâlen aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak görevini sürdürmektedir.

Küllaç, M. T., & Çuvalcı, O. (2023). Correlation statistics of a Fourier transform feature with flank wear on different sections of turned surface images for real time monitoring applications. *Measurement*, 207, 112399.

Küllaç, M. T., & Çuvalcı, O. (2025). Assessing sine and Gaussian fitting for surface feature extraction in real-time wear monitoring of turning operations. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 61, 51–69.