

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SIKI GEÇME OPERASYONU İÇİN
ANFİS VE YAPAY SİNİR AĞLARI MODELLEMESİNİN
MATEMATİKSEL MODEL İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan Şimşir

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

FEBRUARY 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SIKI GEÇME OPERASYONU İÇİN
ANFIS VE YAPAY SİNİR AĞLARI MODELLEMESİNİN
MATEMATİKSEL MODEL İLE KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Oğuzhan Şimşir
(518151021)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ

FEBRUARY 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**COMPARISON OF ANFIS AND ANN MODELING
WITH MATHEMATICAL MODEL
FOR PRESS-FITTING OPERATION**

M.Sc. THESIS

**Oğuzhan Şimşir
(518151021)**

Department of Mechatronic Engineering

Mechatronic Engineering Programme

Thesis Advisor: Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ

FEBRUARY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 518151021 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Oğuzhan Şimşir, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SIKI GEÇME OPERASYONU İÇİN ANFİS VE YAPAY SİNİR AĞLARI MODELLEMESİNİN MATEMATİKSEL MODEL İLE KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğretim Üyesi Onur AKBATI**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tufan KUMBASAR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Şubat 2024**
Savunma Tarihi : **26 Şubat 2024**





Aileme,



ÖNSÖZ

Başta, bu çalışmanın gerçekleşmesinde gösterdiği kıymetli destekler nedeniyle kıymetli hocam Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans ve tez yazım sürecim desteklerini esirgemeyen, sevgili annelerim Gülin ŞİMŞİR ve Hatice CAN ile, babalarım Mustafa ŞİMŞİR ve Ali CAN'a bir teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için başta kıymetli yöneticim Fethi Semih ÖZKAN'a, çalışma alanındaki destekleri için de Ragıp Orkun SEÇER, Hasan UYANIKER, Aytaç PÜRTAŞ ve Barış KURT'a teşekkür etmek isterim.

Son olarak, tüm süreç boyunca yanımdaki sandalyede uyuyarak katkı gösteren Aykız ile, her aşamasında hem motivasyonu hem de sürece olan katkılarıyla kıymetli eşim ve yol arkadaşım Öykü CAN ŞİMŞİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2024

Oğuzhan Şimşir
Kontrol ve Otomasyon Mühendisi

İÇİNDEKİLER	
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	Sayfa
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xx
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. SİSTEMİN İNCELENMESİ	7
2.1 Model Fabrika	7
2.1.1 Üretilen ürün ve üretim akışı	8
2.1.2 Rulman çakma operasyonu	12
2.1.2.1 Üretim sırasında yaşanan problemler	16
2.1.2.2 Geçmiş verilerin toplanması ve değerlendirilmesi	17
3. MATEMATİKSEL MODELLEME	25
3.1 Model Tasarımı	25
3.1.1 Elastik ve plastik deformasyon	25
3.1.2 Sıkı geçme operasyonu için matematiksel modeller	27
3.1.3 Sistemin parametreleri	30
3.1.4 Sistemin matematiksel modelinin oluşturulması	31
3.1.5 Geçmişte üretilen veriler ile karşılaştırma	36
3.2 Matematiksel Modelin Genel Değerlendirmesi	44
4. VERİLERİN İNCELENMESİ	45
4.1 Veri Standartlaştırma	45
5. SİSTEMİN ANFİS VE YSA İLE MODELLENMESİ	49
5.1 Kullanılacak Yöntemlerin İncelenmesi	49
5.1.1 Bulanık mantık	49
5.1.2 Yapay sinir ağları	50
5.1.3 Adaptif ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFİS)	51
5.2 Rulman Çakma Operasyonunun ANFİS ile Modellenmesi	51
5.2.1 Uygun parametrelerin seçimi	52
5.2.2 Sistem modelleme	53
5.2.3 Modelin tüm veriler ile karşılaştırılması	59
5.3 Yapay Sinir Ağları Modeli	67
5.3.1 Uygun parametrelerin seçimi	67
5.3.2 Sistem modelleme	68
5.3.3 Modelin tüm veriler ile karşılaştırılması	69
6. K-MEANS İLE ÇEVİRİMLERİN SINIFLANDIRILMASI	77
7. SONUÇLAR	87
8. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	91



KISALTMALAR

AGV	: Automated Guided Vehicle
AI	: Artificial Intelligence
ANFIS	: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference Systems
ANN	: Artificial Neural Network
App	: Appendix
ASRS	: Automated Storage-Retrieval System
BT	: Bilgi Teknolojileri
CNC	: Computer numerical control
ERP	: Enterprise Resource Planning
FEM	: Finite Elements Method
FN	: False Negative
FP	: False Positive
IoT	: Internet of Things
IIoT	: Industrial Internet of Things
ISO	: International Organization for Standardization
MAD	: Median Absolute Deviation
MESS	: Türkiye Metal Sanayicileri Sendikası
MEXT	: MESS Teknoloji Merkezi
NAR	: Nonlinear Autoregressive
NOK	: Uygun olmayan çevrim
OK	: Uygun çevrim
OT	: Operasyonel Teknolojiler
St	: Station
PLC	: Programmable Logic Controller
RMSE	: Root Mean Square Error
TN	: True Negative
TP	: True Positive
YSA	: Yapay Sinir Ağları



SEMBOLLER

d	: Mahalanobis uzaklığı
E_{alu}	: Alüminyum Young modülü
E_{steel}	: Çelik Young modülü
F	: Kuvvet
f	: Sürtünme katsayısı
L	: Girişim ilerlemesi
mm	: Milimetre
N	: Newton
P	: Basınç
S	: Kovaryans
r	: Çap
r_{in}	: Mil iç çapı
r_{out}	: Yatak dış çapı
t	: Zaman
x	: Mesafe
Z	: Girişim miktarı
z	: z skoru değeri
μ	: Aritmetik ortalama
μ_{alu}	: Alüminyum Poisson oranı
μ_{steel}	: Çelik Poisson oranı
π	: Pi sayısı
σ	: Standart sapma



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Malzeme listesi [13]	10
Çizelge 2.2 : Operatör etiketlemeleri sonrasında değişim	22
Çizelge 3.1 : Malzeme Özellikleri	30
Çizelge 3.2 : Matematiksel Model için hesaplanan RMSE değerleri	36
Çizelge 3.3 : Matematiksel Model Sonrası Etiketleme Değişimi	40
Çizelge 3.4 : Matematiksel model sonrası operatör etiketleme değişimi	42
Çizelge 3.5 : Hata Matrisi	42
Çizelge 3.6 : Matematiksel model sonrası hata matrisi değerleri	43
Çizelge 3.7 : Hata metriklerinin hesaplanması	43
Çizelge 3.8 : Matematiksel model sonrası hata metrikleri	43
Çizelge 5.1 : ANFIS ile kural bazlı etiketleme karşılaştırılması	65
Çizelge 5.2 : ANFIS ile operatör etiketlemesi karşılaştırılması	66
Çizelge 5.3 : YSA ile kural bazlı etiketleme karşılaştırılması	73
Çizelge 5.4 : YSA ile operatör etiketlemesi karşılaştırılması	73
Çizelge 6.1 : k-means ile kural bazlı etiketleme karşılaştırılması	86
Çizelge 6.2 : k-means ile operatör etiketlemesi karşılaştırılması	86
Çizelge 7.1 : Etiketlemelerin F Skoru Karşılaştırılması	88



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Sanayi Devrimleri [1]	2
Şekil 2.1 : MESS Teknoloji Merkezi Model Fabrika'nın yukarıdan görüntüsü [16]	7
Şekil 2.2 : Model fabrikada üretilen dişli kutusu [17]	9
Şekil 2.3 : Dişli kutusu kapağı teknik resim [18]	10
Şekil 2.4 : Dişli kutusu test istasyonu [17]	11
Şekil 2.5 : 32205 Rulman bileziği teknik resim [17]	13
Şekil 2.6 : 32013 Rulman bileziği teknik resim [17]	13
Şekil 2.7 : 30304 Rulman bileziği teknik resim [17]	13
Şekil 2.8 : ISO 286 tolerans tablosu [2]	14
Şekil 2.9 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği.....	19
Şekil 2.10 : 6699-2022-03-31-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği.....	19
Şekil 2.11 : 5272-2021-11-23-NOK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği...	20
Şekil 2.12 : 5390-2021-11-25-OK-R çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği	20
Şekil 2.13 : 6219-2022-02-03-NOK-R çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği ..	21
Şekil 2.14 : 7447-2022-11-04-OK-R çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği	21
Şekil 3.1 : Mekaniksel gerilim tipleri [22]	26
Şekil 3.3 : Deneyisel şekil değiştirme çalışması [23]	26
Şekil 3.2 : Gerilim-Şekil değiştirme eğrisi [9]	27
Şekil 3.4 : Sıkı geçme ile malzemelerin montajlanması [9]	28
Şekil 3.5 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için matematiksel model karşılaştırılması.....	33
Şekil 3.6 : 7002-2022-06-16-OK-L çevrimi için matematiksel model karşılaştırılması.....	33
Şekil 3.7 : 7363-2022-10-13-NOK-L çevrimi için matematiksel model karşılaştırılması.....	34
Şekil 3.8 : 7648-2023-01-19-OK-L çevrimi için matematiksel model karşılaştırılması.....	35
Şekil 3.9 : Tüm çevrimler için RMSE değerinin sırasıyla değişimi	37
Şekil 3.10 : Matematiksel model ile hesaplanan RMSE değerlerinin histogramı ...	37
Şekil 3.11 : En düşük RMSE değeri veren çevrimin grafiği	38
Şekil 3.12 : En yüksek RMSE değeri veren çevrimin grafiği.....	39
Şekil 3.13 : Matematiksel model ile karşılaştırılarak, NOK kabul edilen çevrimler	40
Şekil 3.14 : OK iken NOK olarak değiştirilen çevrim	41
Şekil 3.15 : NOK iken OK olarak değiştirilen çevrim	41
Şekil 4.1 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için standartlaştırılmış verilerle kuvvet(N)-yol(mm) grafiği	46
Şekil 4.2 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için standartlaştırılmış verilerle kuvvet(N)-yol(mm) ifadesinin Mahalanobis uzaklığı gösterimi	48

Şekil 5.1 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için Mahalanobis uzaklığı fonksiyonun parçalı otekorelasyon çıktısı	52
Şekil 5.2 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği.....	54
Şekil 5.3 : Bulanık Kural Kümesi	55
Şekil 5.4 : Bulanık Mantık Yapısı	56
Şekil 5.5 : 7002-2022-06-16-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği.....	57
Şekil 5.6 : 5283-2021-11-23-NOK-R çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği ..	58
Şekil 5.7 : ANFIS modelinin NOK bir çevrim ile çalıştırılması ile elde edilen sonuç	58
Şekil 5.8 : 5484-2021-12-02-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği.....	59
Şekil 5.9 : ANFIS modelinin tüm çevrimler ile çalıştırılması sonucu elde edilen RMSE değerleri	60
Şekil 5.10 : ANFIS modeli ile en düşük RMSE değeri olan çevrim için Mahalanobis uzaklığı ifadesi	61
Şekil 5.11 : ANFIS modeli ile düşük RMSE değeri olan çevrim.....	62
Şekil 5.12 : ANFIS modeli ile en yüksek RMSE değeri olan çevrim	63
Şekil 5.13 : ANFIS modelinin çevrimlere uygulanması ile oluşan RMSE histogramı	64
Şekil 5.14 : ANFIS modeli çalıştırılarak NOK kabul edilen çevrimler	65
Şekil 5.15 : ANFIS modeli çalıştırılarak NOK kabul edilen örnek çevrim	66
Şekil 5.16 : ANFIS modeli çalıştırılarak OK kabul edilen örnek çevrim	67
Şekil 5.17 : YSA modeli ile çalıştırılan tüm çevrimlerin RMSE degerleri	69
Şekil 5.18 : YSA modeli ile en düşük RMSE değeri olan çevrim.....	70
Şekil 5.19 : YSA modeli ile en yüksek RMSE değeri olan çevrim	71
Şekil 5.20 : YSA modeli ile çalıştırılan tüm çevrimlerin RMSE degerleri histogramı	72
Şekil 5.21 : YSA modelinin tüm çevrimler ile çalıştırılması sonucu elde edilen RMSE degerleri histogramı	72
Şekil 5.22 : YSA modelinin çalıştırılması ile NOK olarak değiştirilen çevrim.....	74
Şekil 5.23 : YSA modelinin çalıştırılması ile OK olarak değiştirilen çevrim.....	75
Şekil 6.1 : Davies-Boulding indeksi ile küme sayıları grafiği.....	80
Şekil 6.2 : YGap istatistiği ile elde edilen küme sayıları grafiği	80
Şekil 6.3 : Silüet yöntemi ile elde edilen küme sayıları gösterimi	81
Şekil 6.4 : Dirsek yöntemi ile belirlenen küme sayıları	82
Şekil 6.5 : K-Means algoritması ile elde edilen 1. küme çıktıları.....	82
Şekil 6.6 : K-Means algoritması ile elde edilen 2. küme çıktıları.....	83
Şekil 6.7 : K-Means algoritması ile elde edilen 3. küme çıktıları.....	84
Şekil 6.8 : K-Means algoritması ile elde edilen kümelerin merkezleri	84

SIKI GEÇME OPERASYONU İÇİN ANFIS VE YAPAY SİNİR AĞLARI MODELLEMESİNİN MATEMATİKSEL MODEL İLE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Çağımızın en önemli olgularından birisi dijital dönüşümdür. Dijital dönüşüm teknolojileri sayesinde, evlerimizdeki klimalardan, sokaklardaki kameralara kadar her bir cihaz internete bağlanabilmekte ve bizlere kolaylıklar sağlamaktadır. Günümüzde, dijital olarak cihazlara erişimin oldukça kolaylaşması sayesinde, artık herkesin, her şeyin bir dijital varlığı oluşmuştur. Verilerin toplanması ve saklanması oldukça kolaylaşması sayesinde de attığımız her adım bizim hareketlerimizi şekillendirebilecek verilere dönüşmüştür.

Doğal olarak; hayatın her alanında olduğu gibi, endüstriyel tesislerde de dijital dönüşüm oldukça hızlanmıştır. Endüstride dijital dönüşüm ile birlikte, sahadan veri toplamak daha da önemli bir hale gelmiştir. Sensör teknolojilerinin gelişmesi ve veri toplamanın yollarının gelişmesi ile birlikte sistemlerden artık çok detaylı veriler toplanabilmektedir. Bunun da yanında veri saklama sistemleri de çok yüksek miktarda verinin saklanabilmesine olanak tanımaktadır.

Her ne kadar verinin kullanması ile gerçekleştirilebilecek geliştirmelerin çok büyük kapılar açabileceği uzun yıllardır akademik camia tarafından biliniyor olsa da; verilerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için bilgisayar teknolojilerinde gerçekleşecek gelişmelere ihtiyaç duyulmuştur. Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesinden önce fiziksel sistemlerin matematiksel hesaplamalarının kullanıldığı yapılar çok daha fazla yer kaplamaktaydı. Bu matematiksel modeller gerçek sistemlerin bilinmezliklerini hesaba katamıyor olsalar da, büyük oranda hata tespiti gibi işlemler için çok büyük fayda sağlamaktaydılar.

Verinin kullanılabilir hale gelmesi ile birlikte, bugüne kadar teorik olarak geliştirilmiş birçok hesaplama yöntemini üretim sahalarında da etkin bir şekilde görüyoruz. Görüntü işleme, hata tespiti, hat dengeleme gibi birçok sürecin geliştirilmesinde teorilerin yanında geçmiş verilerden beslenen hesaplama yöntemleri de yoğun bir şekilde kullanılmaya başlandı.

Bu çalışmada da, bugüne kadar kural bazlı olarak çalışan bir rulman çakma operasyonundan toplanan veriler incelendi. Bu veriler, aynı üretim hattının kalite verileri ile karşılaştırılarak doğruluğu değerlendirildi. Matematiksel modelleme ile karşılaştırılıp gerçeğe ne kadar yakınsadığı incelendi. Ardından da, sistem bulanık mantık ve yapay sinir ağları algoritmaları ile yeniden modellenerek, bir kalite tahminleme sistemi geliştirildi. Son olarak da, tüm veriler k-means yöntemi ile sınıflandırılarak, tüm bu etiketlemelerin performansı değerlendirildi.

Üretim sahalarında sıkı geçme operasyonları, ürün kalitesini etkileyen önemli bir operasyondur. Bu operasyonun doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi, ürünlerin

kalitesini artırırken hatalı ürünlerin sayısını azaltabilir. Bu nedenle, birçok farklı yöntemle matematiksel modeller geliştirilmiştir. Matematiksel formüllerde, birçok sabit bulunsa da, geliştirilen modellerde birçok değer ortam koşullarına bağlıdır. En basitinden, geliştirilen matematiksel modellerde tüm yüzeyler silindir olarak düşünülmüştür. Üretim tesislerinde ise tüm yapılar bu kadar keskin değildir. Bu nedenle, güncel modelleme yöntemleri kullanılarak bu bilinmeyen faktörler veriler üzerinden hesaba katılarak daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışmada, öncelikle bir üretim hattında çalışan sıkı geçme operasyonu değerlendirilmiştir. Bu operasyonun kaliteye etkisi, operasyonda yaşanabilecekler sorunlar incelenmiştir. Çalışanların tecrübelerine dayalı olarak, yaşanan problemlerin üretim süreçlerini nasıl etkilediği değerlendirilmiştir. Mevcutta bulunan kural tabanlı sistemin ne kadar doğru çalıştığı, ortam koşullarından etkilenip etkilenmediği değerlendirilmiştir.

Ardından çalışan sistem matematiksel modeller ile karşılaştırılmıştır. Matematiksel modeller, tüm koşullar bilindiği takdirde oldukça başarılı sonuçlar veriyor olsa da gerçek üretim koşullarında her şey bu kadar sabit tutulamamaktadır. Bu nedenle de üretilmiş olan veriler ile matematiksel modelleme her zaman doğru bir şekilde uyuşmamaktadır. Ek olarak, plastik deformasyon bölgesi adı verilen bölgenin belirsizliğinin yüksek olması da matematiksel modellemenin gerçek ile birebir uyuşamamasına sebep olmaktadır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda geleneksel matematiksel modelleme yöntemleriyle elde edilen sonuçların, yapay sinir ağları ve bulanık modelleme yöntemleriyle elde edilen sonuçlara göre gerçek çalışma koşullarında daha az doğruluk elde edebildiği görülmüştür. Bu durum, güncel modelleme yöntemlerinin, sıkı geçme operasyonlarında daha doğru modellemeler sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu da üretim sahalarında daha etkili kararlar alınmasına yardımcı olabilir ve ürün kalitesini artırabilir.

Ayrıca, bu çalışma sadece matematiksel modellerin performansını değil, aynı zamanda mevcut kural tabanlı sistemin performansını da değerlendirmiştir. Bu, endüstride yaygın olarak kullanılan bir sistem olmasına rağmen, güncel modelleme yöntemlerinin daha doğru sonuçlar sağladığını göstermektedir. Bu da işletmelerin mevcut sistemlerini gözden geçirmelerini ve güncel modelleme yöntemlerine geçiş yapmalarını teşvik edebilir. Ayrıca, yapılan bu çalışma şu anda halen veri üretmekte olan sisteme entegre edilmiştir ve sonuçlar incelenmiştir.

Sonuç olarak, üretim sahalarında sıkı geçme operasyonlarının doğru bir şekilde modellenmesi, ürün kalitesinin artırılması ve hatalı ürünlerin azaltılması açısından büyük öneme sahiptir. Belirsizlikleri ortadan kaldırabilecek modelleme yöntemlerini, keskin matematiksel modellerin yerine kullanmanın daha etkili sonuçlar verebileceği üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

COMPARISON OF ANFIS AND ANN MODELING WITH MATHEMATICAL MODEL FOR PRESS-FITTING OPERATION

SUMMARY

One of the most important phenomena of our age is digital transformation. Thanks to digital transformation technologies, every device, from the air conditioners in our homes to the cameras on the streets, can connect to the internet and provide us with convenience. Nowadays, thanks to easier access to digital devices, everyone and everything has a digital existence. Thanks to the ease of collecting and storing data, every step has turned into data that can shape our actions.

Naturally; as in all areas of life, digital transformation has accelerated in industrial facilities. With digital transformation in the industry, collecting data from the field has become even more important. With the development of sensor technologies and data collection methods, very detailed data can now be collected from systems. In addition, data storage systems allow storing huge amounts of data.

While the academic community has long recognized the immense potential of utilizing data for significant improvements, it is important to note that effective data utilization requires advancements in computer technologies. In the past, physical systems heavily relied on mathematical calculations, which occupied significant space. Although these mathematical models were unable to account for the unknown variables in real systems, they played a vital role in processes such as error detection.

As data availability continues to increase, we are witnessing the practical application of many theoretically developed calculation methods in production areas. Alongside these theories, calculation methods driven by historical data are being extensively utilized in the development of various processes, including image processing, error detection, and line balancing.

The focus of this study is the examination of data collected from a bearing interference fit operation, which has traditionally operated based on predefined rules. To evaluate the accuracy of this data, it was compared with quality data from the same production line. Mathematical modeling was employed to assess its proximity to reality. Additionally, a quality estimation system was developed by remodeling the existing system using fuzzy logic and artificial neural network algorithms.

In the realm of production areas, interference fit operations play a crucial role in ensuring high product quality. Accurate execution of these operations can significantly reduce the number of defective products and enhance overall quality. To achieve this, mathematical models have been developed using various methods. However, it is important to note that while mathematical formulas may contain numerous constants, many values in the developed models are dependent on environmental conditions. The simplest form of these mathematical models considers all surfaces as cylinders.

However, it is crucial to account for the fact that not all structures in production facilities adhere to this shape. Therefore, incorporating these unknown factors into data using current modeling methods can yield more precise and realistic results.

The initial phase of this study involves evaluating the interference fit operation on a production line. The impact of this operation on quality and potential issues during the process are thoroughly examined. By leveraging the experiences of the employees, the study assesses how these problems affect production processes. Furthermore, the accuracy and susceptibility of the existing rule-based system to environmental conditions are rigorously evaluated.

Subsequently, the working system is compared with mathematical models. While mathematical models can provide highly accurate results when all the conditions are known, it is important to acknowledge that real production conditions are not always constant. As a result, there may be discrepancies between the collected data and the outcomes of mathematical modeling. Moreover, the high level of uncertainty in the plastic deformation zone further hinders the complete alignment of mathematical modeling with reality.

Through calculations and analysis, it has been revealed that traditional mathematical modeling methods tend to yield less accurate results in real working conditions compared to artificial neural networks and fuzzy modeling methods. This finding indicates that current modeling methods offer more precise modeling in interference-fit operations. Consequently, these improved modeling methods can facilitate more effective decision-making in production environments, ultimately leading to enhanced product quality.

Moreover, this study goes beyond evaluating the performance of mathematical models and also investigates the effectiveness of the existing rule-based system. Despite being widely used in the industry, the results demonstrate that current modeling methods provide more accurate outcomes. This finding may encourage businesses to reevaluate their existing systems and consider transitioning to updated modeling methods. Additionally, this study integrates seamlessly into the system that is currently generating data and meticulously examines the results.

In conclusion, accurate modeling of interference-fit operations in production areas significantly contributes to enhancing product quality and reducing defective products. This study sheds light on the importance of utilizing modeling methods that can account for uncertainties, rather than relying solely on precise mathematical models. By embracing these improved modeling approaches, we can achieve more effective and reliable results in various production environments.

To further extend the study, future research can explore the integration of machine learning algorithms and predictive analytics into production environments. By leveraging the power of artificial intelligence, we can analyze large volumes of data in real time and make proactive decisions to optimize production processes. Additionally, the study can investigate the impact of data utilization on other aspects of the production line, such as maintenance scheduling, supply chain management, and energy efficiency. Understanding how data-driven approaches can improve overall

operational efficiency and reduce costs in these areas will be valuable for businesses in the industry.

Furthermore, the study can expand its scope to evaluate the performance of different modeling methods in various production environments, such as assembly lines, machining operations, quality control processes, and inventory management. By comparing the accuracy and effectiveness of different modeling approaches, we can identify the most suitable methods for specific production scenarios. Additionally, the study can explore the potential of combining multiple modeling methods to achieve even higher accuracy and reliability in data utilization.

In summary, by continuously advancing our understanding and utilization of data in production environments, we can unlock new opportunities for improving product quality, reducing defects, optimizing operational efficiency, and minimizing waste. This extended study provides valuable insights into the importance of data utilization, the limitations of traditional modeling methods, and the potential of advanced techniques such as artificial neural networks and fuzzy modeling. By embracing these advancements, businesses can make more informed decisions, achieve higher levels of quality, and gain a competitive edge in the industry.



1. GİRİŞ

Teknolojik ilerlemeler, sanayi devriminin başlangıcından bu yana sürekli olarak endüstriyel verimlilikte büyük artışlara işaret etmektedir. Bu ilerlemeler sayesinde üç ana aşama kat edilmiş ve endüstriyel üretim alanında devrim niteliğinde değişiklikler yaşanmıştır [1].

18. yüzyılın sonlarına gelindiğinde, fabrikalarda buhar gücüyle çalışan makineler kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemde, üretim sürecindeki mekanik güç, insan gücünün yerini almış ve üretim hızı ve verimlilik önemli ölçüde artmıştır [1].

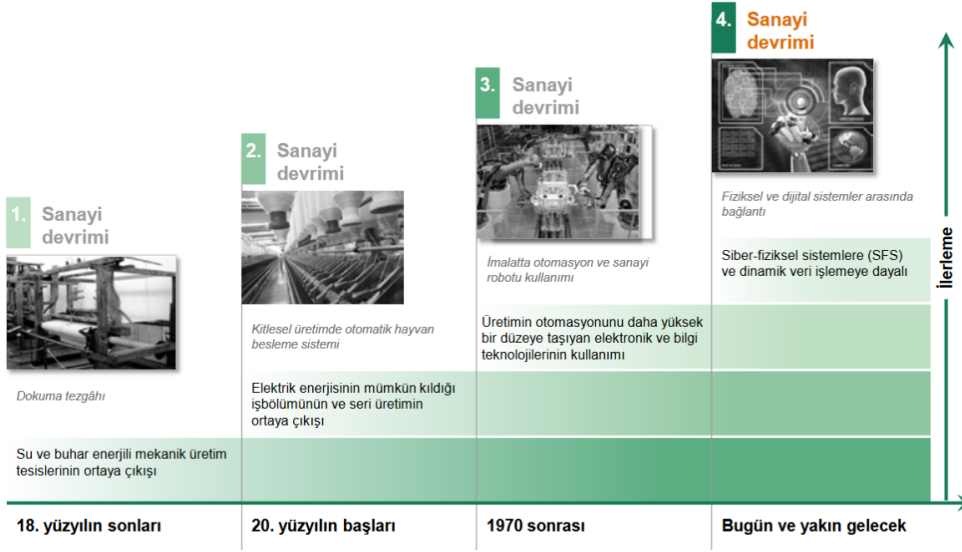
20. yüzyılın başında ise, elektrik enerjisi kullanılarak seri üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu sayede, tekdüze ve hızlı üretim yapılabilen ve üretim süresi önemli ölçüde kısaltılmaktadır. Elektrik enerjisinin kullanımıyla birlikte, üretim sürecindeki işgücü ihtiyacı da azalmış ve otomasyonun temelleri atılmıştır [1].

1970'lerden itibaren ise, elektronik ve bilgi teknolojileri (BT) ile sanayide otomasyon yaygınlaşmıştır. Bu dönemde, bilgisayarlar ve kontrol sistemleri ile üretim süreçleri daha da optimize edilmiş ve insan müdahalesi azaltılmıştır. Otomasyonun artmasıyla birlikte, üretim hızı ve hassasiyet artmış, hatalar ve maliyetler ise azalmıştır [1].

Günümüzde ise, siber-fiziksel sistemler ve dinamik veri işleme ile değer zincirlerinin uçtan uca bağlandığı, sanayi devriminin dördüncü evresine tanıklık ediyoruz. Bu evrede, nesnelerin interneti (IoT), yapay zeka (AI) ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerin kullanımıyla üretim süreçleri daha da akıllı hale gelmekte ve daha fazla verimlilik sağlanmaktadır. Ayrıca, üretim ve tedarik zincirleri arasındaki iletişim ve işbirliği de daha etkin bir şekilde gerçekleşmektedir [1].

Sanayi devrimleri Şekil 1.1'da görülebileceği gibi, kademeli bir şekilde, mevcut teknolojilerin tüm faydalarından yararlanılarak gelişmiştir.

Sanayi 4.0, sanayi (d)evriminin dördüncü aşaması



Şekil 1.1 : Sanayi Devrimleri [1]

Teknolojik ilerlemelerin sürekli olarak devam etmesiyle birlikte, endüstriyel verimlilikteki artışın da devam etmesi beklenmektedir. Bunun da gelecekte daha yenilikçi ve verimli üretim yöntemlerinin ortaya çıkmasına olanak sağlayacağı öngörülmektedir [1].

Tüm cihazların internete bağlanabilmesi, verilerinin toplanabilmesi ve bu verilerin güvenli bir şekilde saklanabilmesi sayesinde, sanayide gerçekleştirilebilecek gelişmeler için çok fazla kapı açıldı. Karmaşık süreçler için son yirmi yılda hızla gelişen ve günümüzde birçok endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılan veri tabanlı teknikler, araştırma dünyasında en popüler konulardan biri haline gelmiştir. Bu teknikler, büyük miktardaki işlem verilerini kullanarak değerli bilgiler elde etmeyi hedefler. Model tabanlı yaklaşımlara kıyasla, veri tabanlı teknikler farklı endüstriyel sorunlar için etkili ve verimli çözümler sunar [2].

Verilerin toplanabildiği noktalar artık neredeyse sınırsızdır. Bu çalışmada da bir rulman çakma operasyonundan elde edilen veriler değerlendirilerek, çalışmakta olan bir sistemin performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Hareketli parçalar içeren birçok üründe; çamaşır makineleri, otomobiller, hidrolik presler ve oyuncaklar dahil hayatımızın her noktasında rulmanlar kullanılmaktadır.

Rulmanlar, mühendislik alanında önemli bir rol oynayan ve genellikle iki yapı arasında yük aktarımını sağlamak için kullanılan önemli bir bileşendir. Bir iç bilezik, bir dış bilezik ve hareket kolaylaştıran bilyalardan oluşan rulmanların en temel amacı, kendisine bağlı yapılar arasında yüklerin aktarılmasını gerçekleştirirken, göreceli konumlandırma ve dönme özgürlüğü sağlamaktır. Bu şekilde, bir makinede yüklerin hareket halindeki yüzeyler arasında aktarılması gerektiğinde, rulmanlar kayar elemanlar arasına yerleştirilen yuvarlanma elemanları sayesinde hareketin en etkili şekilde kolaylaştırılmasını sağlamaktadır.

Makaralı rulmanlar, basit ve etkili bir yapıya sahiptir. Bir makinede, kayma sırasında karşılaşılan sürtünme direncinin yerini, yuvarlanma ile ilişkili çok daha küçük bir direnç alır. Bu da daha verimli bir yük aktarımı sağlamaktadır. Ancak, rulmanların bu düzenleme süreci, etkili yük aktarımının sınırlı bölgelerinde yüksek gerilimlere maruz kalmasına neden olabilir [3].

Rulmanlar, birçok endüstride yaygın olarak kullanılan önemli bir bileşen olup, otomotiv, havacılık, enerji, makine ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyet, dayanıklılık ve verimlilik gibi özelliklere sahip olan rulmanlar, makine ve ekipmanların doğru ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, rulmanlar, titreşim ve gürültüyü azaltarak daha konforlu bir çalışma ortamı oluşturur.

Rulman teknolojisi sürekli olarak gelişmekte olup, yeni malzemeler ve tasarımlarla daha yüksek performans ve dayanıklılık sağlamaktadır. Özellikle yüksek hızlarda ve ağır yük altında çalışan makinelerde, doğru rulman seçimi ve bakımı büyük önem taşır. Bu sayede, maksimum performans ve uzun ömür elde edilebilir [4].

Rulmanlar genellikle iç ve dış halka denilen iki yapının arasında bilyalar olacak şekildedir. Bu halkalara parça montajı ise genellikle sıkı geçme yöntemi ile gerçekleştirilir [3].

Sıkı geçme operasyonu, silindirik bir milin biraz daha küçük bir çaplı bir silindirik deliğe yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu girişimi gerçekleştirebilmek için milin radyal olarak daralması ve deliğin genişlemesi gerekir. Bu da arayüzde radyal temas gerilimi üretir [5]. Günümüzde sıkı geçme operasyonları sürtünme etkilerinin

yardımıyla bir mili bir deliğe sıkıca sabitleyebilme yeteneği nedeniyle havacılık, enerji, tarım, ulaşım ve tıp gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

Sıkı geçme montajı endüstride sıklıkla kullanılan geleneksel yöntemlerden biridir ve montaj kalitesi birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir. Genel olarak, montajların dayanıklılığı, müdahale miktarı, malzeme özellikleri, fiziksel boyutlar, eşleşen parça geometrisindeki düzensizlikler ve temas yüzeylerinin sürtünme katsayısı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır [7]. Bu nedenle, sıkı geçmenin yük taşıma kapasitesi üzerindeki çeşitli parametrelerin etkisini araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Sıkı geçme operasyonlarını simüle etmek ve incelemek için sonlu elemanlar yönteminin (FEM) kullanımı yaygındır. Teng ve diğerleri [8], silindirik bir sıkı geçme operasyonunun gerilim dağılımını FEM ile analiz etti ve etkileşim çapı, etkileşim genişliği, kaplamanın dış çapı gibi faktörlerin bu operasyonu nasıl etkilediğini incelediler. Sürtünme katsayısı da yük taşıma kapasitesi için önemli bir faktör olduğundan, Seifi ve Abbasi (2015) güncellenmiş bir sonlu elemanlar modeli ile mil ve delik arasındaki sürtünme katsayısını tahmin etmiştir [7].

Sıkı geçme operasyonu parçaya yüksek seviyelerde kayma gerilmesi ve şekil değiştirme gerilmesi uygulamaktadır [9]. Rulman montajı zor olduğu kadar, sorunlu rulmanların sökülmesi de bir o kadar zordur. Parçalarda bozulma yarattığı için de geleneksel yöntemlerle sökmek parçanın tekrar kullanımını riske atmaktadır [10].

Slocum 1997 yılında yayınlamış olduğu kitabında sıkı geçme modellemesi ile detaylı bir matematiksel model sunmuştur. Bu matematiksel modelde, parça tipi, etkileşim mesafesi, çap, sürtünme katsayısı gibi bir çok parametrenin etkisi detaylı olarak incelenmiştir [11]. Bu hesaplamalardaki birçok fiziksel parametre hakkında bilgiler elimizde mevcuttur. Ancak; Slocum'un kitabında paylaşmış olduğu gibi, modelleme sırasında sürtünme katsayısı değerine de malzeme sertliği, pürüzlülük, yağlama miktarı ve tipi, sıcaklık, nem gibi birçok farklı parametreden etkilendiği için ihtiyaç duyulmaktadır. Benuzzi ve Donzella 2004 yılında yaptıkları çalışmada, sürtünme katsayısını deneysel olarak hesaplamışlardır [12]. Wang ve ekibi 2017 yılında yayınladıkları "A new analytical method for press-fit curve prediction of interference fitting parts" başlıklı çalışmalarında, Fx grafiği için analitik

bir tahminleme geliştirmişlerdir [13]. 2015 yılında You ve ekibi 'Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting Force' başlıklı çalışmalarında kalite odaklı bir modelleme çalışması gerçekleştirmişlerdir [14].

Bu çalışmada, bir üretim hattında gerçekleştirilen sıkı geçme operasyonunun değerlendirilmesi yapılacaktır. Operasyonun kalite üzerindeki etkisi incelenirken, karşılaşılabilecek sorunlar da gözden geçirilecektir. İlk bölümde, çalışanların deneyimlerine dayanarak, yaşanan problemlerin üretim süreçlerini nasıl etkilediği değerlendirilecek, mevcut kural tabanlı sistemin doğruluğu ve çevresel koşullardan etkilenme durumu da incelenecektir.

Ardından, çalışan sistem matematiksel modellerle yeniden gözden geçirilecek ve tüm koşulları sabit tuttuğumuz sürece modellerin başarılı bir şekilde sonuç verebileceği gösterilmesi hedeflenmektedir. Ancak gerçek üretim koşullarında her şey bu kadar sabit tutulmadığı için, gerçek verilerle matematiksel modelleme her zaman tam olarak uyuşmamaktadır. Üretim esnasında karşılaşılabilecek birçok belirsizlik, matematiksel modellemenin gerçeklikle tam olarak örtüşmemesine neden olmaktadır.

Yapılan hesaplamalar, geleneksel matematiksel modelleme yöntemlerinin, yapay sinir ağıları ve bulanık modelleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında gerçek çalışma koşullarında daha az doğruluk sağladığını göstermektedir. Bu durum, sıkı geçme operasyonlarında güncel modelleme yöntemlerinin daha doğru sonuçlar sunabileceğini düşündürmektedir. Bu da üretim sahalarında daha etkili kararlar alınmasına ve ürün kalitesinin artırılmasına yardımcı olabilir. Bu nedenle, bu çalışmada bu iki yöntem kullanılarak, sistemin davranışı yeniden incelenecektir. Sistemin geçmişte ürettiği veriler kullanılacak, sistemin doğru sonuçlar verdiği garanti edilebilen veri setleri ile modellemeler gerçekleştirilecektir.

Bu çalışmanın sonucunda, hali hazırda gerçekleştirilen kalite etiketlemeleri, güncel modeller ile yeniden elden geçirilecektir. Yapılan çalışma, akmakta olan üretim hattına uygulanacaktır ve performans yeniden değerlendirilecektir.

Sonuç olarak, sıkı geçme operasyonlarının doğru bir şekilde modellenmesi, ürün kalitesinin artırılması ve hatalı ürünlerin azaltılması açısından büyük önem taşımak-

tadır. Belirsizlikleri ortadan kaldırabilen modelleme yöntemlerinin, keskin matematiksel modellerin yerine kullanılması daha etkili sonuçlar verebilir. Bu çalışmada da farklı modelleme yöntemlerinin performansı detaylı olarak değerlendirilecektir.



2. SİSTEMİN İNCELENMESİ

2.1 Model Fabrika

MESS Teknoloji Merkezi, kısa adıyla MEXT; firmalara dijital olgunluk değerlendirmeleri, eğitimler, yol haritaları ve işbirlikleri gibi hizmetler sunarak dijital dönüşüm süreçlerine destek olmayı amaçlayan bir kurumdur [15]. MESS Teknoloji Merkezi'nin hizmetleri, firmaların mevcut dijital yetkinliklerini değerlendirmek için dijital olgunluk değerlendirmeleri ile başlamaktadır. Bu değerlendirmeler, firmaların dijital dönüşüm ihtiyaçlarını belirlemek ve hedeflerini saptamak için önemli bir adımdır. Değerlendirmeler sonucunda firmalara, dijital dönüşüm için bir yol haritası sunulmaktadır.



Şekil 2.1 : MESS Teknoloji Merkezi Model Fabrika'nın yukarıdan görüntüsü [16]

Yol haritası doğrultusunda, MESS Teknoloji Merkezi firmalara üretim hatlarında çalışan uzmanlardan, genel müdür seviyesine kadar her seviyede çalışanların dijital dönüşüm konusunda bilgi ve becerilerini geliştirmelerini amaçlayan eğitimler sunmaktadır. Bu süreçte, katılımcılar Model Fabrika içerisinde dijital dönüşüm

senaryolarını deneyimleme fırsatı bulmaktadır. Model Fabrika, dijital dönüşümün faydalarını gösteren birçok senaryo içermektedir ve katılımcılar bu senaryoları doğrudan deneyimleyerek yeni teknolojilerin etkisini daha iyi anlamaktadır.

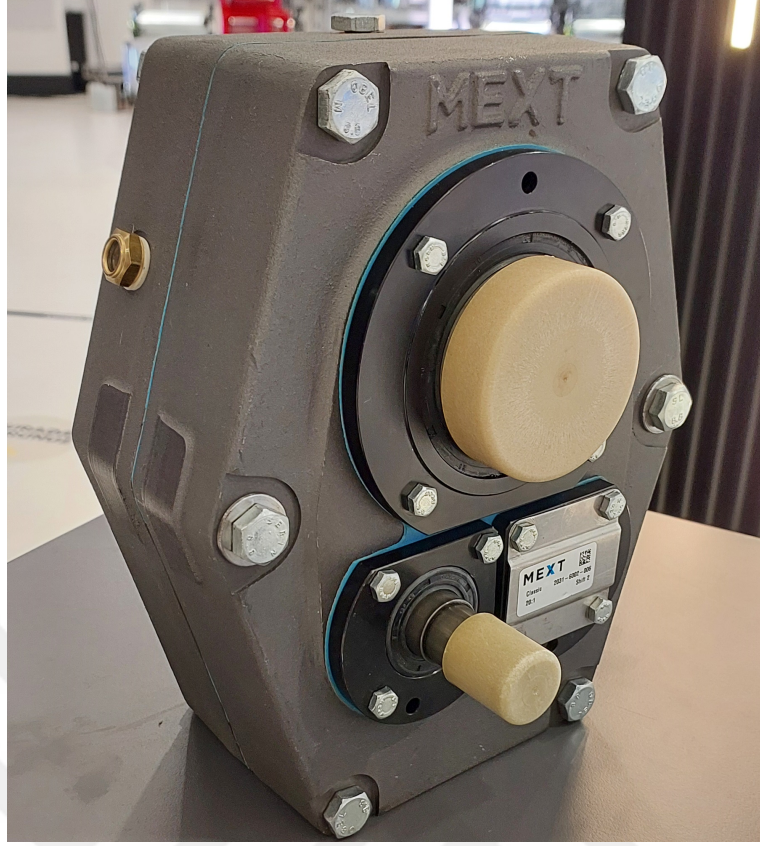
Bu çalışmada incelenen istasyon, Model Fabrika içerisinde bulunan ve eğitimlerde de kullanılan rulman çakma istasyonudur. Bu çalışma alanında, model fabrikada üretilen dişli kutularının kasalarına rulman bileziklerinin yerleştirilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Rulman çakma istasyonu, dişli kutusu üretim hattının önemli bir parçası olarak ürünün kalitesini etkileyen en önemli adımlardan biridir.

2.1.1 Üretilen ürün ve üretim akışı

Teknoloji Merkezi'nde bulunan Model Fabrika içerisinde, bir dişli kutusu (Şekil 2.2) üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen dişli kutusu ile basitçe giriş miline verilen torkun 20 katı kadar tork, çıkış milinden alınmaktadır. Aynı şekilde devir sayısı da yirmide birine düşürülmektedir. Her ne kadar model fabrikada üretilmiş olan ürünler satılmasa da, kalite ile ilgili senaryolar da verilen eğitimlerin konusu altındadır. Bu nedenle, doğru üretilmiş bir dişli kutusu, dijital dönüşüm konusunda katılımcılara doğru bir aktarım gerçekleştirebilmek için büyük önem taşımaktadır.

Model fabrikada üretilen dişli kutusu, her biri üretilecek dişli kutusunun kalitesinden takibine birçok farklı amaca hizmet eden birçok farklı bileşenden oluşmaktadır. Bileşenlerin kısa bir özeti Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Üretilen ürünlerdeki oluşabilecek kalite problemlerini anlayabilmek için basitçe üretim montaj akışından da bahsetmek gerekmektedir. Üretim süreci, robotlu depolama sistemi ile başlatılmaktadır. Bu sistem, kutuların otomatik bir vinç tarafından raflardan alınıp, deponun hem giriş hem de çıkış noktası olan konveyör hattına yüklenmesini sağlamaktadır. Konveyör hattının çıkışında, otonom güdümlü araçlar (AGV) kutuları alır ve ön hazırlık istasyonuna taşır. Bu istasyonda, 3 boyutlu kameraların yardımıyla, kutularda rastgele dağılmış ürünler belirlenir ve bu ürünler, 6 eksenli bir endüstriyel robot tarafından parça taşıyıcıya, üretim emrinin reçetesine göre yerleştirilir. Ek olarak, CNC istasyonunda farklı dönüşüm oranlarına sahip dişli blokları üretilir. Üretilen bu dişliler, pres istasyonunda rulman iç bilezikleri ile sıkı geçme yöntemi kullanılarak birleştirilir.



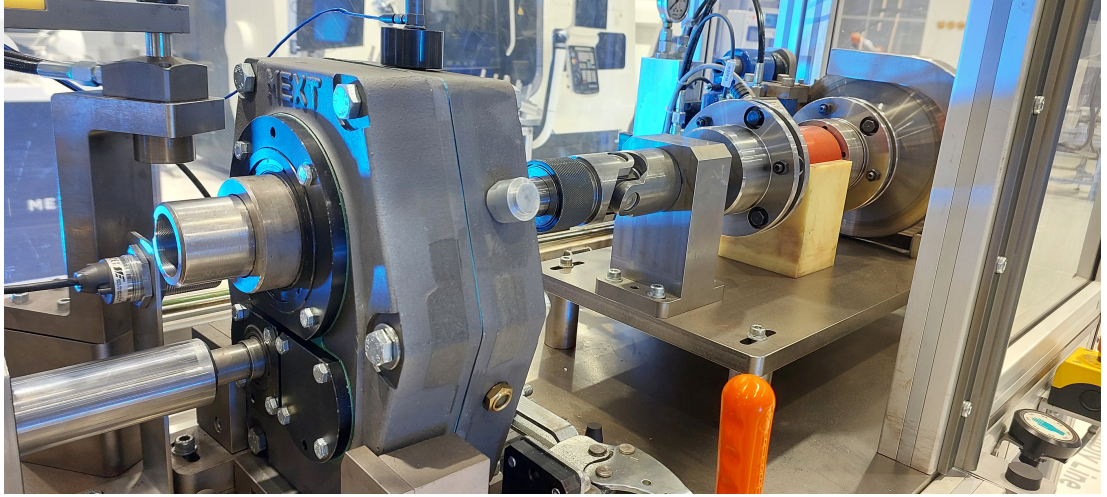
Şekil 2.2 : Model fabrikada üretilen dişli kutusu [17]

Ön hazırlık istasyonunda, reçeteye uygun olarak hazırlanan parça taşıyıcılar yine otonom güdümlü araçlar ile üretim hattına taşınır. Eğer temel dönüşüm oranında bir dişli kutusu üretilmeyecekse CNC istasyonunda üretilip, bu çalışmada odaklanılan benzer bir presleme istasyonunda yarı mamül haline getirilirler. CNC istasyonunda üretilen, özel üretim dişliler, üzerine bir işbirlikçi robot entegre edilmiş farklı bir otonom güdümlü araç ile üretim hattına taşınır ve robot ile parça taşıyıcıya yerleştirilirler.

Reçeteye uygun hazırlanan parça taşıyıcılar, üretim hattında 7 farklı istasyondan geçmektedirler. Birinci istasyonda, bir operatör, çift kollu bir işbirlikçi robot ile birlikte çalışarak ürün kapaklarını ve somunları hazırlamaktadır. Bir sonraki istasyonda, 6 eksenli geleneksel bir endüstriyel robot vardır. Bu istasyonda, kasaların üzerinde bulunan rulman bileziklerinin yerleştirileceği bölgelere gres yağı uygulanmaktadır. Bu istasyonda, yağlama miktarı herhangi bir şekilde ölçülmemektedir. Sadece, rulman yuvalarına yapılan yağlamanın tüm çapı kapsadığının garanti edilmesi adına kamera

ile kontrol yapılmaktadır. Eğer gres yağı tüm bölgelere temas etmediyse, yetersiz yağlanan bölgeler robot ile yeniden yağlanmaktadır. Sonrasında yine aynı istasyonda aynı robot, rulman bileziklerini preslenecekleri yuvaya yerleştirmektedir.

Üretim hattındaki üçüncü istasyonda, rulman bilezikleri pres istasyonunda dişli kutusunun kasasına çakılmaktadır. Detayları bir sonraki bölümde verilecek bu istasyondan sonra, parça taşıyıcı konveyör ile manuel istasyon olan bir sonraki istasyona ilerlemektedir. Bu istasyonda miller ilgili noktalara yerleştirilir ve kasalar kapatılır. Ardından, civata ile kasalar birbirlerine sabitlenir. Bir sonraki istasyonda da mil kapakları otomatik sıkıcı ile sabitlenmekte ve en son istasyonda da tamamlanmış ürün etiketlenerek, test istasyonuna (Şekil 2.4) aktarılmaktadır.



Şekil 2.4 : Dişli kutusu test istasyonu [17]

Üretimi tamamlanan dişli kutusu test istasyonuna yerleştirilir ve 3 eksenli titreşim ve ses ölçümleri gerçekleştirilerek analiz yapılır. Bu istasyonda, dişli kutusu 1200 rpm gibi hızlara çıkarılırken, aynı zamanda çıkış miline de değişken bir karşı kuvvet uygulanmaktadır. Böylece, dişli kutusunun uygunluğu test edilebilir. Uygun olan dişli kutuları için, kurumsal kaynak planlama sisteminde (ERP) bir satış bilgisi oluşturulur. Satışı yapıldığı varsayılan dişli kutuları AGV'ler ile söküm istasyonuna götürülmektedir.

Test sonrasında, uygun olmadığı tespit edilen dişli kutuları arasından tamir edilebilecek olanlar, yine AGV'ler ile tamir-bakım istasyonuna taşınmaktadır. Bu istasyonda tamir

edilerek, o ürün için tekrar satış emri oluşturulabilir. Tamir edilen ürün de, satış emri ile birlikte söküm istasyona götürülmektedir. Tamir edilemeyecek durumda olan dişli kutuları ise ERP sisteminde hurda olarak tanımlanarak, yine AGV'ler ile söküm istasyonuna iletilmektedir. Söküm istasyonunda, üretilen tüm dişli kutuları yeniden üretim döngüsüne için sökülmeaktadır. Söküm istasyonunda sıkı geçme ile montajı gerçekleştirilen kasa ve miller de dahil olmak üzere sökülür. Sıkı geçme parçaların sökümünü gerçekleştirebilmek için manuel presler kullanılmaktadır.

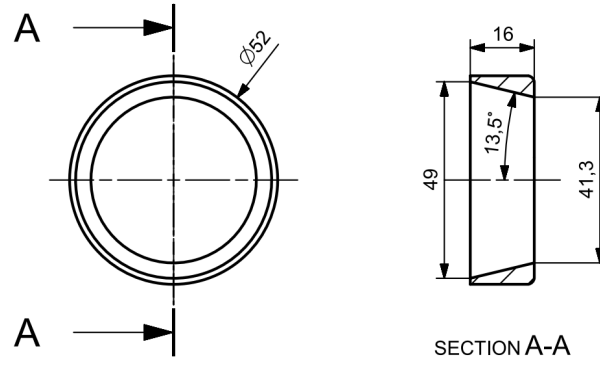
Tüm bileşenler sökülüp kutulara yerleştirilen ürünler, Model Fabrika tarafından bir satın alma emri oluşturularak otonom güdümlü araçlara yüklenmektedir. Bu otonom güdümlü araçlar, ilgili kasaları depolama sisteminin giriş konveyörüne beslenmektedir. Bu kasalar, depolama yönetimi sisteminin uygun gördüğü yerlere otomatik vinç ile yerleştirilmektedir. Kısaca Model Fabrika kapalı bir çevrim halinde çalışmakta ve bütün bileşenler, işlevlerini tamamen yitirene kadar tekrar tekrar kullanılmaktadır. Bahsedilen süreç boyunca takılıp tekrar sökülen parçalarda bozulmalar görülmektedir. Ancak, ticari bir ürün olmaması sebebi ile montajda sorun yaratmayacak kadar bozulmalar eğitim akışları sırasında gözardı edilebilmektedir.

2.1.2 Rulman çakma operasyonu

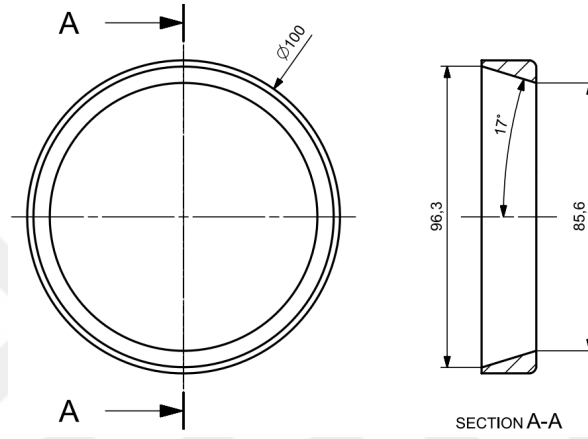
Üst ve alt kasa üzerinde 3'er adet rulman bileziği yuvası bulunmaktadır. Rulman bilezikleri kasa üzerine dış yüzeylerinden sıkı geçme ile sabitlenmişken, rulmanlar iç halkaları ile millere sıkı geçme ile sabitlenmiştir. Rulmanlar ve miller, CNC ve mobil işbirlikçi robot ile beslenen bir presleme istasyonunda üretim hattından bağımsız olarak preslenmektedirler.

Kasalara montajlanan 3 farklı rulman bileziği için boyutlar farklıdır. Rulman bilezikleri 30304 (Şekil 2.7), 32205 (Şekil 2.5) ve 32013 (Şekil 2.6) modeldir. Yükseklikleri farklı olduğu için press başlığı da farklı rulman tiplerine uygun olarak tasarlanmıştır.

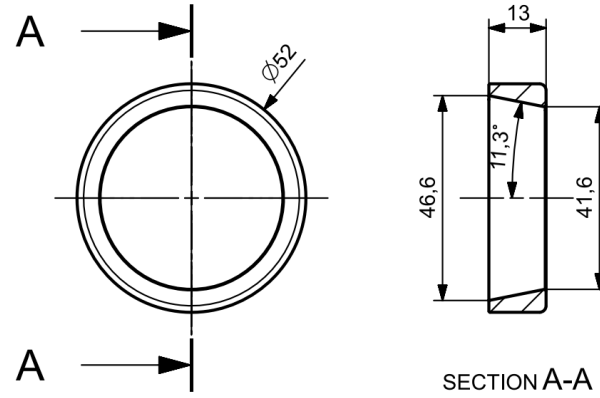
Herhangi bir kuvvet altında bileziklerin ve millerin sabit durabilmesi için, belirli bir sıkı geçme toleransında olması gerekmektedir. Rulman bileziklerinin montajlanması operasyonunda, sıkı geçme toleransı, ISO286-2 standartlarına göre, delikler için M7



Şekil 2.5 : 32205 Rulman bileziği teknik resim [17]



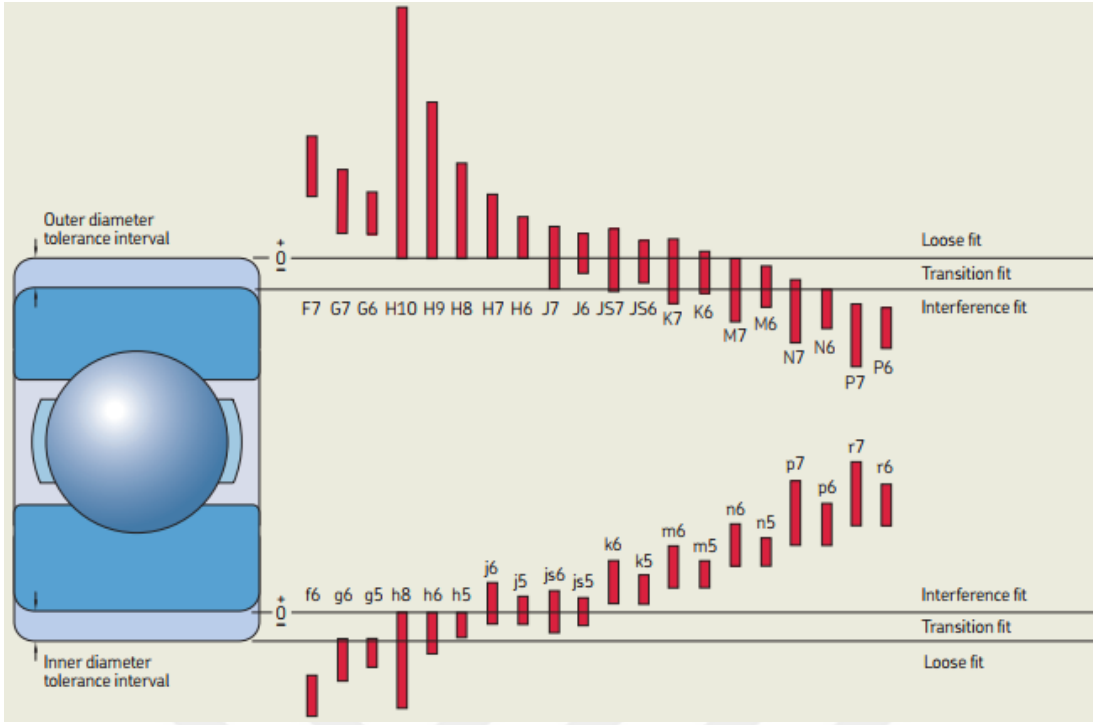
Şekil 2.6 : 32013 Rulman bileziği teknik resim [17]



Şekil 2.7 : 30304 Rulman bileziği teknik resim [17]

olarak tanımlanmıştır. Rulman bilezikleri ise fabrika çıkışlı oldukları için birebir ölçülerde kabul edilmektedir [18].

Şekil 2.8’de gösterilen ISO286-2 standartları, birbirine geçirilmek istenen delik ve millerin standartlarını içermektedir. Bu standarttaki değerlere göre, el ile montaj



Şekil 2.8 : ISO 286 tolerans tablosu [2]

yapılabilecek boşluklu geçme, basit el aletleri ile montaj yapılabilecek ara geçme ve presle montaj yapılması gereken sıkı geçme ölçüleri tanımlanmıştır [47].

Sıkı geçme bağlantıları, mil ve göbek çifti arasında tork iletimini sürtünmeye dayalı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Hikmet Rende ve arkadaşlarının (2015) yaptığı çalışmada da belirttikleri gibi, bu bağlantıların uygulanması kolay olduğu için yapısal avantajlarından dolayı tercih edilmektedirler. Göbek üst toleransı, milin alt toleransından daha küçüktür; bu durum, geçme işlemi gerçekleştirildikten sonra mil ve göbek arasında bir basınç oluşmasına neden olur. Bu basınç, sürtünme ve buna bağlı olarak tork iletiminin temelini oluşturur. Yani sıkı geçme ile birleştirilen parçalar arasında doğrudan bir tork iletimi gerçekleşir. Göbek veya milden birine kuvvet uygulandığında her ikisi de bir bütünmüş gibi hareket ederler [19].

Rulman çakma operasyonunda rulman bilezikleri, dişli kutusu kasasına sıkı geçme mantığı ile preslenerek sabitlenmektedir. Çelik bilezikler, alüminyum kasaya yüksek bir kuvvetle yerleştirilmektedir. Rulman yatakları, rulman bileziklerinin çapından belirlenen tolerans aralığında daha dar olduğu için daha sert bir malzeme olan çelik

bilezikler, alüminyum kasayı esnetir. Esneyen alüminyum, iç kısmındaki bileziğe bir kuvvet uygulayarak onun içeride sabit kalmasını sağlamaktadır.

Operasyonun başında, yağlama istasyonu ile rulman yatakları, yağlanmış kasaların olduğu parça taşıyıcı ilgili pres istasyonuna getirilerek bekletilmektedir. Parça taşıyıcının altında bulunan pistonlu sabitleme düzeneği, taşıyıcıyı yaklaşık 3 mm kadar yukarıya kaldırmaktadır. Bu olay, parça taşıyıcısının konveyörden koparılmasını, presleme sırasında konveyöre yük bindirilmemesini sağlamaktadır.

Pres işlemi gerçekleştirilirken, pnömatik pistonlardaki hava basıncının etkisi ile bir miktar sıkışmaktadır. Bu sıkışma operasyon sırasında gözlemlenebilmektedir, fakat ölçüm ek bir maliyet oluşturacağı için ölçüm yapılmamaktadır. Diğer taraftan bu sıkışma sebebi ile, operasyon sırasında gerçekleştirilen kuvvet-yol ölçümünde operasyona başlanan nokta ile bitiş noktası arasında olması gerekenden, daha yüksek bir değer görülebilmektedir.

Parça taşıyıcı kaldırıldıktan sonra, servo motorlu pres sistemi devreye girmektedir. Her iki kasaya da yerleştirilmiş olan rulman bilezikleri, preslenerek sabitlenmekte ve Kistler marka 9323A model piezoelektrik sensörü ile tüm presleme sürecine ait veriler toplanmaktadır. Toplanan bu veriler sensörün bağlandığı işletim sistemi olan Kistler maXYmos sisteminde değerlendirilerek işlem sonucu OK (uygun) ve NOK (uygun değil) olarak etiketlenmektedir. Sensör sadece dik ekseninde yani Z ekseninde gerçekleşen kuvveti ölçmektedir. Bu da doğrudan uygulanan/uygulanması gereken kuvvetin bilgisini bize vermektedir.

maXYmos sisteminde kural tabanlı bir yapı vardır [20]. Bu sistemde üretim sonuçları el ile girilen eşik değerlerine göre belirlenmektedir. Bu değerlerin altında veya üstünde bir değer ile işlem sonlandığında sonuç NOK, belirlenen eşik değerleri arasında bir sonuç gerçekleştiğinde ise işlem OK olarak maXYmos tarafından etiketlenir. Etiketlenen tüm veriler her bir çevrim ayrı bir dosya olacak şekilde CSV dosyası olarak sunucudaki bir bilgisayarda saklanmaktadır.

Operasyon sırasında gerçek zamanlı bir ölçüm yapılmamaktadır. Bu durumun sebebi mevcut altyapının buna izin vermemesidir. Kullanılmakta olan sensör sisteminde, sadece operasyonlar tamamlandıktan sonra uygunluk kararı verilebilmektedir. Bu

nedenle; üzerinde çalışılabilecek veriler tamamlanmış operasyonların verileri olabilmektedir.

Operasyon önce arka kasa, sonra da ön kasa şeklinde gerçekleştirilmektedir. Eğer ön kasada uygunsuz bir durum tespit edilmişse, her iki kasa için de ölçülen değerler sunucuda saklanır ve hattın geri kalanında üretimin diğer adımları gerçekleştirilmez. Eğer arka kasada bir uygunsuzluk tespit edilirse, ön kasa için presleme işlemi de dahil olmak üzere hiçbir operasyon gerçekleştirilmez.

Yukarıdaki sebepten ötürü hazırlanan her parça taşıyıcı için ön ve arka kapak verisi bulunmamaktadır. Ancak üretim Herhangi bir çevrim içerisinde gözlemlenebilecek durumlar;

- Arka Kapak: OK ve Ön Kapak OK
- Arka Kapak: OK ve Ön Kapak NOK
- Arka Kapak: NOK ve Ön Kapak -

Yukarıdaki durumlardan ilki, yani her iki kapağa da rulman bileziklerinin uygun olarak preslenmiş olduğuna maXYmos sistemi tarafından karar verildiği durumda, parça taşıyıcı bir sonraki istasyona ilerler ve operasyona devam edilmektedir.

Her iki kapağın da uygun olarak üretilmiş olduğuna, operatörlerin tanımlamış olduğu eşik değerleri ile karar verilmektedir. Bu eşik değerlerinin ne olacağının kararı operatörlerin kabullerine dayanmaktadır. Diğer tüm operasyonların tamamlanması ile birlikte, dişli kutusu üretimi gerçekleştirilmiş olmaktadır.

2.1.2.1 Üretim sırasında yaşanan problemler

Rulman çakma operasyonu dişli kutusunun kalitesi için en önemli operasyonlardan birisidir. Düzgün bir şekilde yerleştirilemeyen rulman bilezikleri operasyonun devamında ve dişli kutusunun kalitesinde probleme sebep olmaktadır. Tecrübelerle dayalı olarak tespit edilen sorunlar aşağıdaki gibidir [21].

1. Dış halkanın yatağa istenen seviyeden az girmesi, dişli kutusunun montajlanmasına engel olmaktadır. Rulman bileziklerinin arasına yerleştirilen miller ideal durum

için tasarlanmışlardır. Rulman bilezikleri 0,5 mm kadar bile dışarıda kaldıkları takdirde, kapaklar tam olarak kapanamaktadır. Bu nedenle de, kapak civatalarının sıkılması sırasında akıllı sıkıcılardan yeteri kadar sıkma gerçekleştirilemediği bilgisi alınamadığı için NOK, uygun olmayan olarak tanımlanmaktadır.

2. Dış halkanın yatağa istenen seviyeden çok girmesi bilyaların yeteri kadar dış halka ile temas edememesine neden olmaktadır. Bu ise, yük testleri sırasında fazladan titreşime sebep olmaktadır. Bileziklerin gereğinden fazla aşağıya indirilmesi durumunda, rulman bilezikleri ile bilezikler tam olarak temas edemeyeceklerdir. Bu durumda miller, dişli kutusu içerisinde sabit duramayacak ve titreşime sebep olacaktır. Bu titreşim test istasyonunda gözlemlenebilmektedir.
3. Dış halka montajı sırasında düşük kuvvet gözlemlenmesi, iki parça arasında yeteri kadar girişim (interference) olmamasına, bu nedenle de dış halkanın yataktan daha kolay çıkabilmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda dış halka kuvvet altında rulman ile birlikte dönebilmektedir. Ek olarak dişli kutusunun içine motor yağı koyulduğundan, bu motor yağının sızması durumu ile karşılaşılabilir.
4. Belirli bir kuvvetin üzerini ise servo pres karşılayamamaktadır. Bu durumda işlem tamamlanmadan operasyon sonlanmaktadır.

Tüm bu durumlar, maXYmos sisteminde kural bazlı olarak tanımlanmıştır. Çeşitli durumlar gözlemlendikçe, eşikler tekrar tekrar değiştirilmiş ve denemeler gerçekleştirilmiştir. Mevcut sistem en iyi haline operatörler tarafından edinilen tecrübeler ile getirilmiştir.

2.1.2.2 Geçmiş verilerin toplanması ve değerlendirilmesi

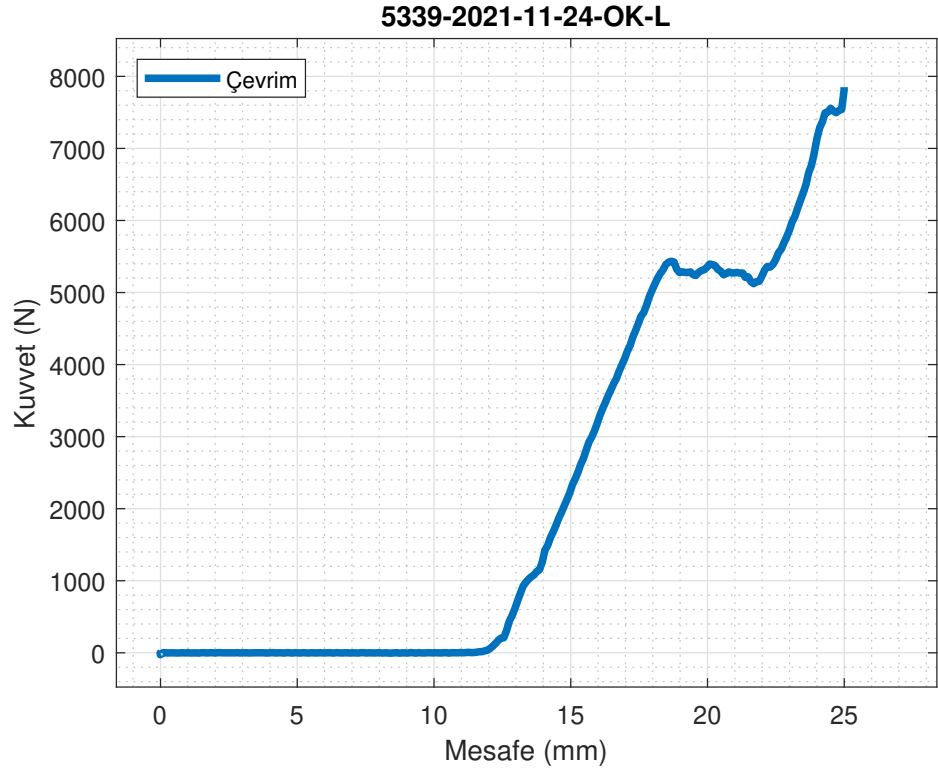
19 Kasım 2021 tarihinden itibaren maXYmos sisteminin ürettiği veriler sunucuda saklanmaya başlanmıştır. Bu tarihten, 24 Ocak 2023 tarihine kadar, 2431 adet çevrim gerçekleştirilmiştir. Üretim verileri 24 Ocak 2023 tarihinden sonra da hala saklanmaya devam etmektedir.

- Tüm veriler ön kapak ve arka kapak olacak şekilde etiketlenmiştir. Burada bir önceki bölümde de bahsedilen, Arka kapağın NOK olması durumunda diğer

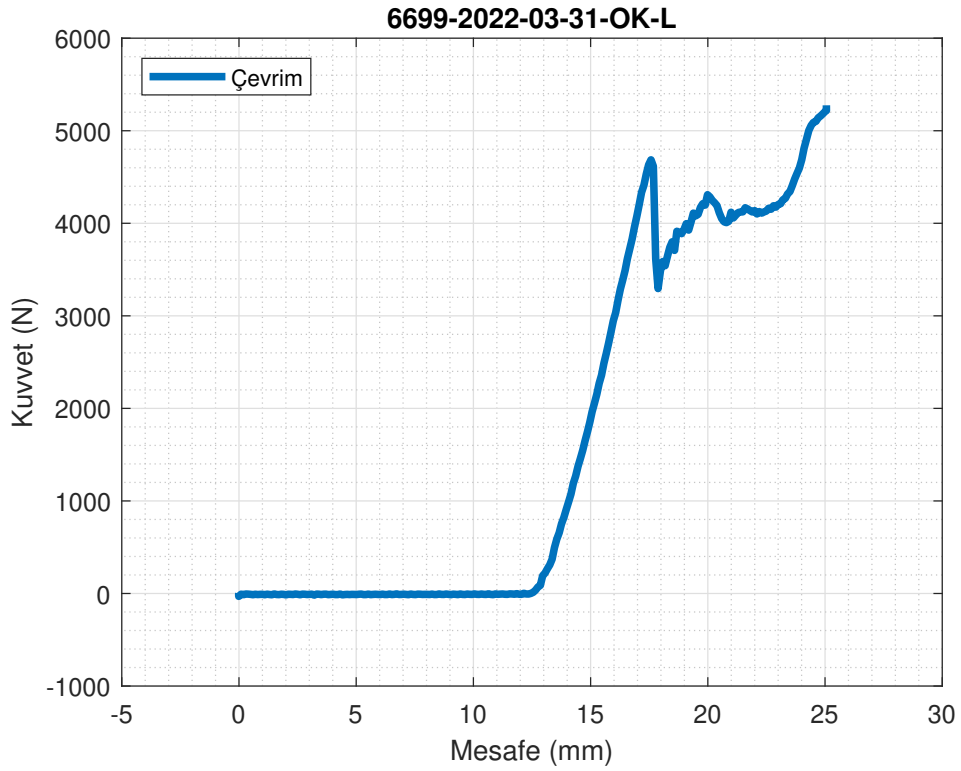
çevrimin gerçekleşmemesi ile ilgili durum hesaba katılmıştır. Ayrıca tüm dosya isimlerine ön veya arka kapak olduğunu belirten L (Left-sol) ve R (Right-sağ) ifadeleri eklenmiştir.

- Tüm veriler içerisinde kullanılmayacak olan bilgi kısmı ayrılmıştır. Sadece Kuvvet, uzunluk ve zaman bilgileri bırakılmıştır.
- Dosya isimleri sadeleştirilmiştir. Dosya isimlerinde sadece tarih, saat, kapak ve uygunluk bilgileri bulunacaktır.
- Her çalışma günü için ayrı ayrı dizinlenmiş dosyalar, tek bir dizin altında toplanmıştır.

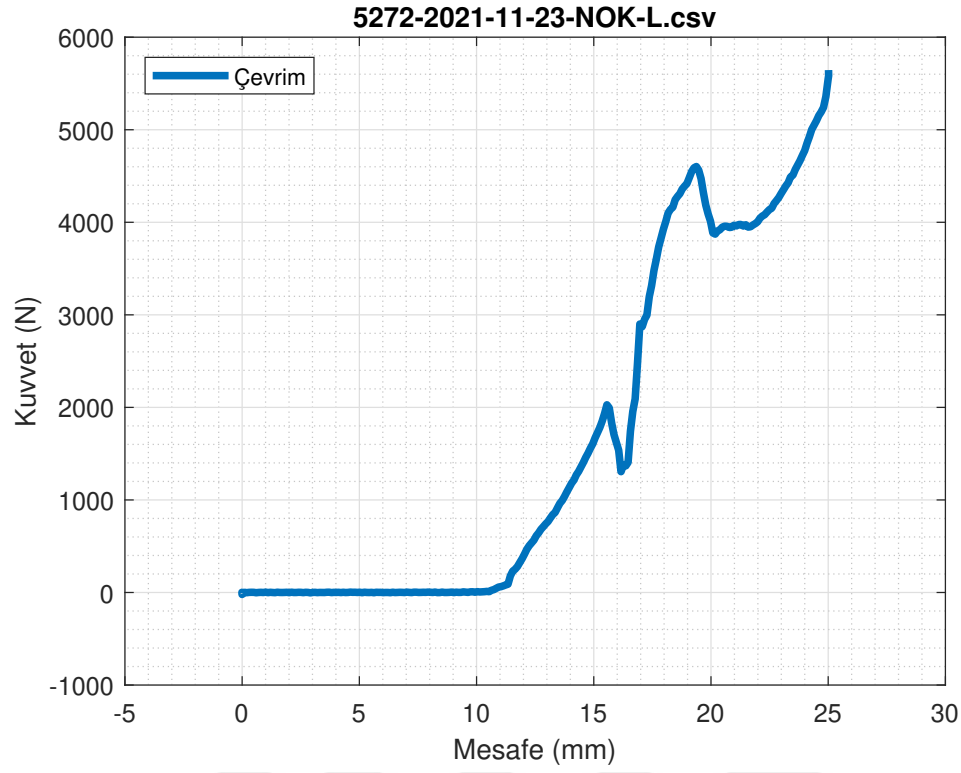
Elde edilen çevrim çıktılarında, Bölüm 2.1.2’de bahsedilen belirsizlikler incelenmiştir. Bu durumun, beklendiği gibi, ölçümün tamamlandığı son nokta olan 24,7 mm ile 25,3 mm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Bu seviyenin altında kalan çevrimler ise tamamlanmamış operasyonlar olarak işaretlenmiştir. Dosyalar düzenlendikten sonra, artık sistemin davranışı incelenebilir. Her iki kapak için de seçilmiş, uygun ve uygun olmayan durumlar için birkaç örnek şekilde gibidir. Şekil 2.9, Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’te sol ve sağ kapaklara ait OK/NOK olarak işaretlenmiş örnek çevrimlere ait kuvvet yol grafikleri gözlemlenmektedir. Bu çevrimlerden, 5339-2021-11-24-OK-L ile 5272-2021-11-23-NOK-L sol kapağa ait sistem tarafından sırası ile uygun olan ve olmayan olarak tanımlanan çıktılar iken; sağ kapağa ait sistem tarafından uygun bulunanlar 5390-2021-11-25-OK-R ile 7447-2022-11-04-OK-R, uygun olmayan olarak belirtilen ise 7447-2022-11-04-OK-R çevrimlerdir.



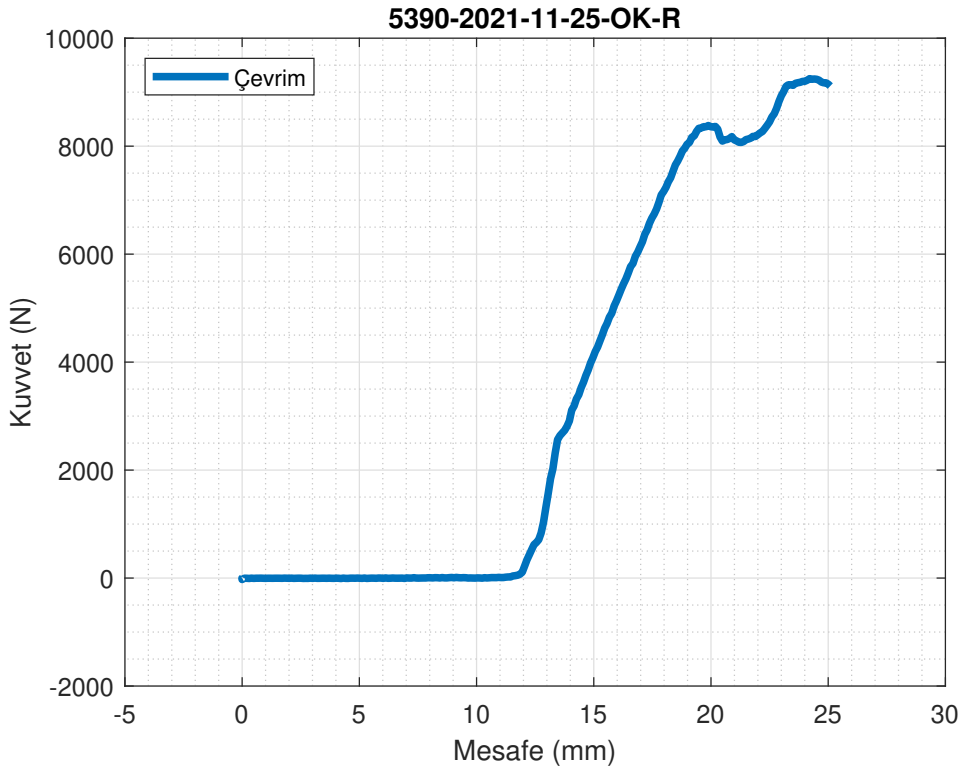
Şekil 2.9 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği



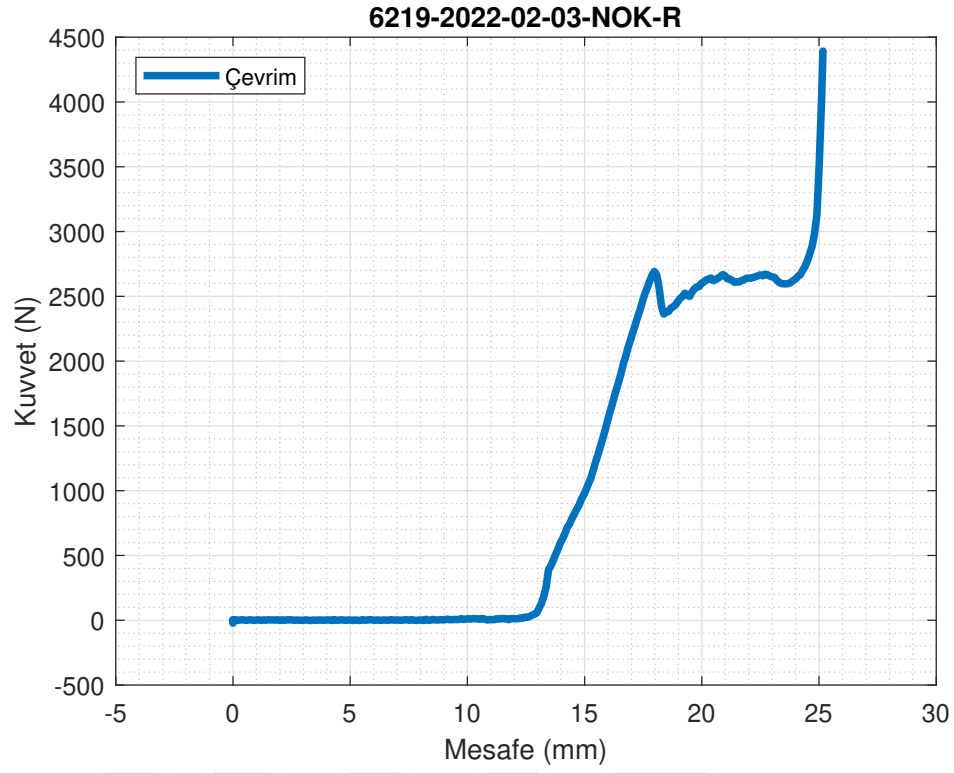
Şekil 2.10 : 6699-2022-03-31-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği



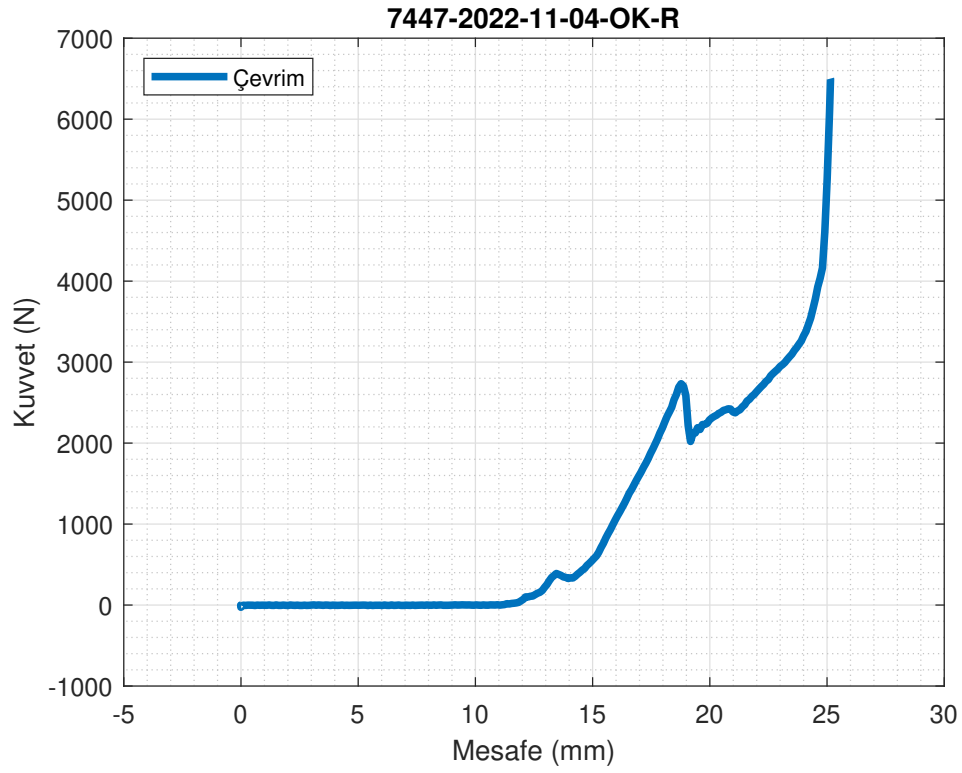
Şekil 2.11 : 5272-2021-11-23-NOK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği



Şekil 2.12 : 5390-2021-11-25-OK-R çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği



Şekil 2.13 : 6219-2022-02-03-NOK-R çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği



Şekil 2.14 : 7447-2022-11-04-OK-R çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği

Tüm grafiklerde x eksenini mesafeyi, yani pres kafasının ilerlemesini gösterirken, y eksenini o sırada uygulanan kuvveti göstermektedir. Çevrimin yarısı kadar olan bir süre boyunca, sisteme kuvvet uygulamamaktadır. Bunun sebebi, ölçümlerin pres kafası kasaya değdiğinde değil, yaklaştığında başlamasıdır. Grafikler detaylı olarak incelendiğinde, öncelikle doğrusal bir davranış gösteren bir bölge olduğu söylenebilir. Bu doğrusal bölgenin sonunda, grafikte bir noktada kırılma olmakta ve sensör bir anda daha az bir kuvvet deneyimlemeye başlamaktadır. Bu noktadan sonra kuvvetin davranışı değişken olmakta, yani doğrusal olmayan bir aşamaya geçiş yapmaktadır. Bahsedildiği gibi çevrimlerin Ok olarak işaretlenebilmesi için çeşitli kriterler bulunmaktadır. 2021'den beri izlenen operasyon çıktılarına göre, 24.6 mm seviyesinden daha az derinlikte tamamlanan çevrimlerin sorunsuz olarak tamamlanamadığı ve NOK olarak işaretlendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sistem için 4000 N kuvvet ve altının düşük, 15000 N ve üstündeki kuvvetlerin ise sistemin beklentisinden yüksek değerler olduğu söylenebilmektedir. Bu davranışları daha iyi anlayabilmek, sistemdeki hata etiketlerinin daha doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi adına büyük önem arz etmektedir. Bahsedilen durumlara benzer değerlerdeki çevrimler bu çalışma için ayıklanacak olup kuvvet veya derinlik sonucunda hatalı olarak işaretlenen NOK çevrim sayıları sırası ile 184 ve 13 adet olmaktadır. Ayrıca, bu sorunlara ek olarak geriye kalan 2418 adet çevrim, bütünsel olarak incelendiğinde etiketlemede 802 adet daha hatalı etiketleme olduğu görülmektedir. Tüm değerler, karşılaştırmalı bir şekilde Çizelge 2.2 ile incelenebilmektedir.

Çizelge 2.2 : Operatör etiketlemeleri sonrasında değişim

Kural Bazlı Durum	Operatör Tarafından Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	1608
OK	NOK	639
NOK	OK	8
NOK	NOK	163

Bu değerler incelendiğinde sistem tarafından NOK olarak etiketlenmiş olan çevrimlerden 8'inde, OK olarak etiketlenmiş olan çevrimlerden ise 639 adedinde hatalı işaretleme olduğuna ulaşılmaktadır. Böylece, OK çevrimlerin yaklaşık %28.5'i, NOK çevrimlerin ise %4.6 kadarı hatalı olarak olarak işaretlenmiştir. Ayrıca burada operatör

tarafından üretilen hatalı sonuçların olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, tüm çevrimler için etkili bir etiketleme yöntemi bulmak önemlidir.

Sistemdeki, hatalı parçaların daha doğru bir şekilde ayrıştırabilmesi için literatürdeki çalışmaların değerlendirilmesi ve kullanılması faydalı olacaktır.





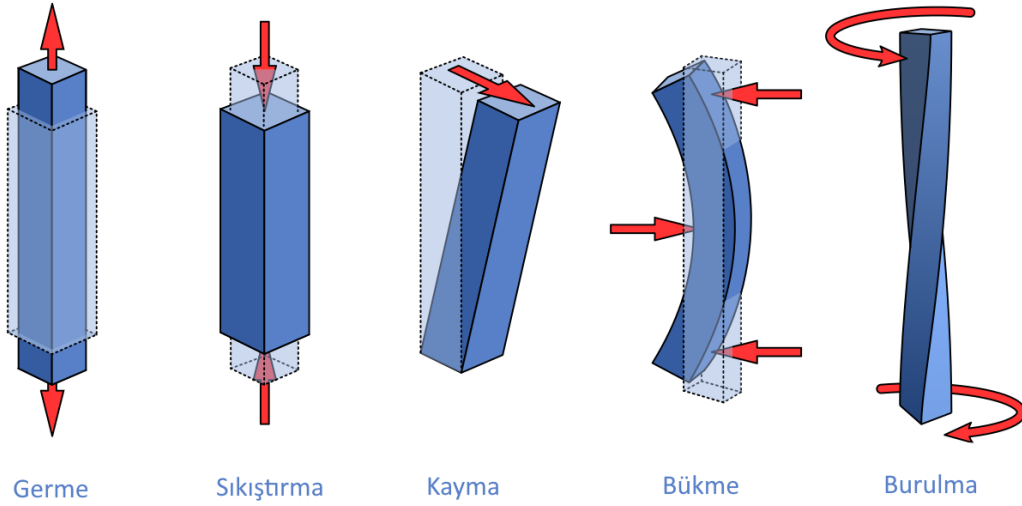
3. MATEMATİKSEL MODELLEME

3.1 Model Tasarımı

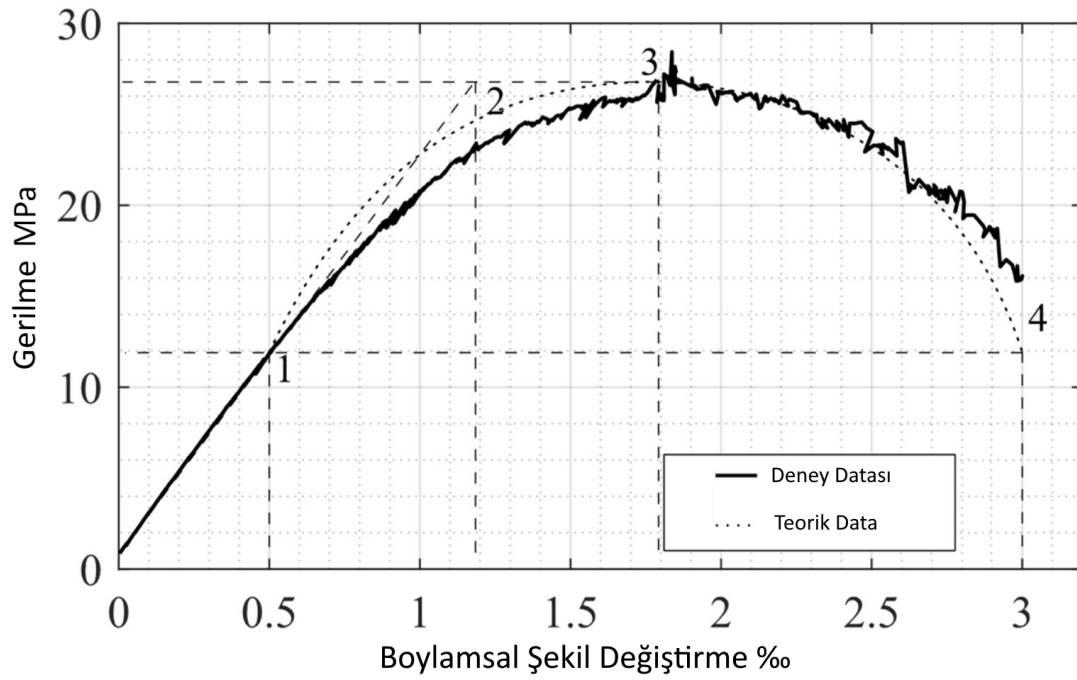
Sistemin matematiksel modellemesi yapılırken, öncelikle sistemden beklenen davranışın detaylı olarak anlaşılabilmesi gereklidir. Bu nedenle sistem davranışının tüm özellikleri belirlenmelidir.

3.1.1 Elastik ve plastik deformasyon

Malzemenin tipine, uygulanan kuvvetin şiddetine ve uygulanma yöntemlerine bağlı olarak, tüm malzemelerin belirli kuvvetler altında bozunuma uğraması beklenmektedir. Bir malzemeye germe, sıkıştırma, kayma, bükme ve/veya burulma yönünde kuvvetler uygulanabilmektedir (Şekil 3.1). Bir malzemeye belirli bir süre kuvvet uygulanıp malzeme serbest bırakıldıktan sonra eğer malzeme eski formuna geri dönebiliyorsa elastik, dönemiyorsa plastik deformasyon meydana gelmiş denilmekte ve malzemenin, elastik deformasyon sürecinden plastik deformasyon sürecine geçtiği kuvvete akma noktası adı verilmektedir [11]. Böylece, akma noktasına denk gelen kuvvet değerini aşan malzeme için, kuvvet ortadan kalktıktan sonra bile eski formuna dönemeyeceği söylenebilmektedir. Elastik deformasyon bölgesindeki bir malzemenin kuvvet-mesafe grafiğinin doğrusal olması, plastik deformasyon bölgesindekinin ise doğrusal olmaması beklenmektedir [11].

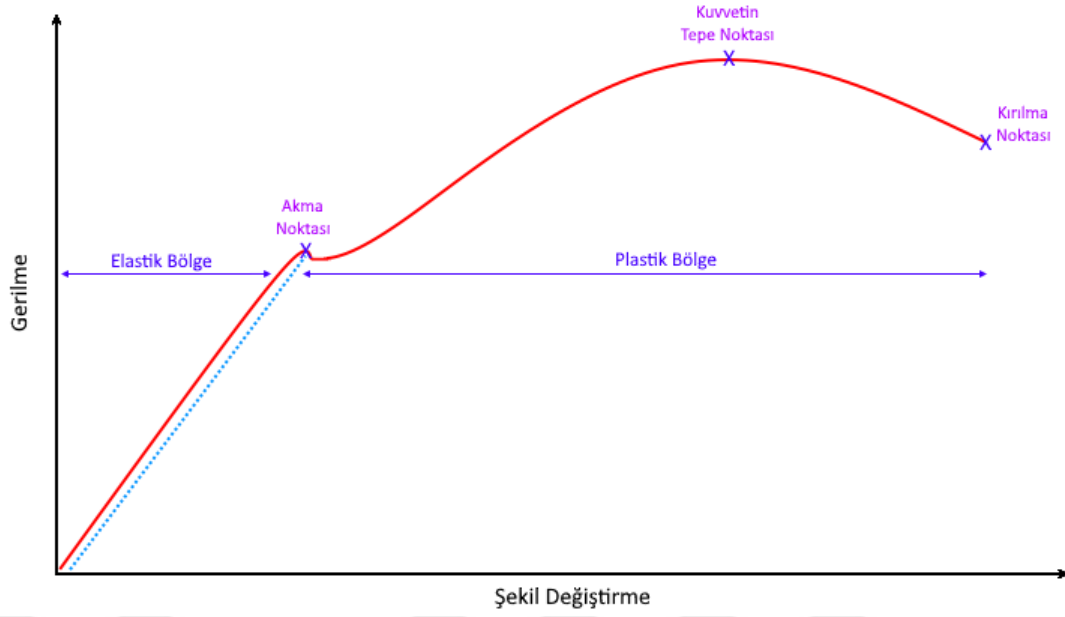


Şekil 3.1 : Mekaniksel gerilim tipleri [22]



Şekil 3.3 : Deneysel şekil değiştirme çalışması [23]

Plastik deformasyon bölgesi için, farklı tipte uygulanan kuvvetlerde için farklı hesaplama yöntemleri vardır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, bir malzemeye kuvvet



Şekil 3.2 : Gerilim-Şekil değiştirme eğrisi [9]

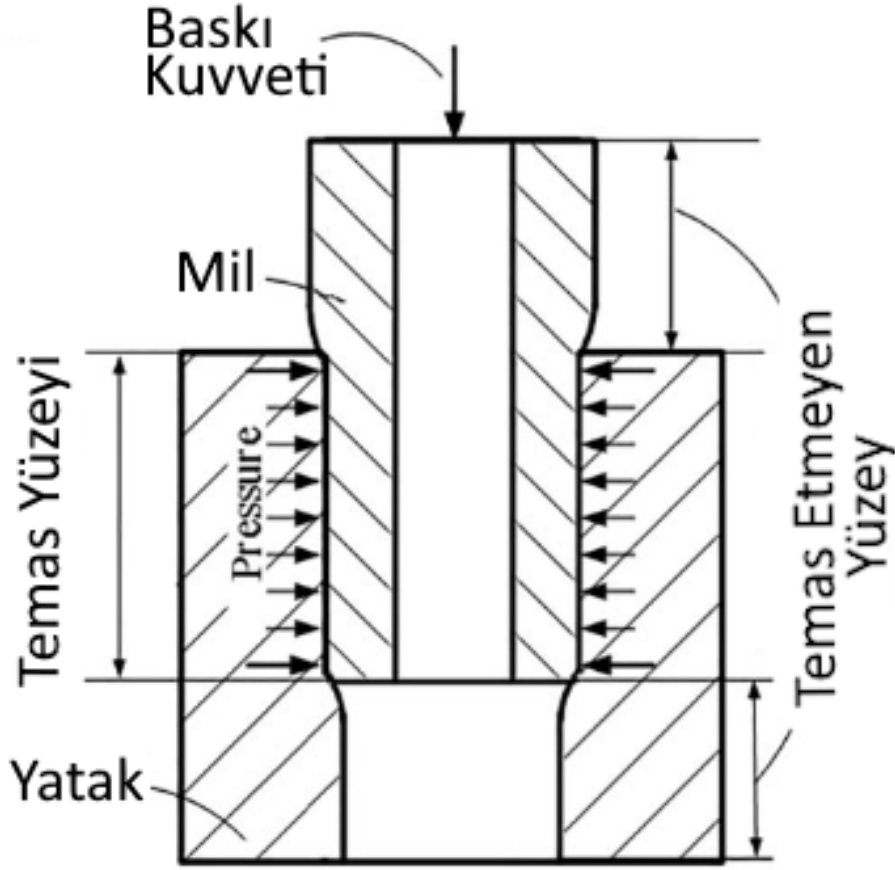
uygulandığında boyuttaki binde şekil değiştirme ve malzemede oluşan gerilmeler arası ilişki, teorik hesaplamalar ile birebir örtüşmemektedir [23].

Sıkı geçme operasyonu da bir mekanik gerilme işlemidir. Bu doğrultuda sıkı geçme operasyonu için yapılan çalışmalar ve hesaplamalar ile bu çalışmada incelenen üretim istasyonunun davranışı hesaplanmaya çalışılacaktır. Bunun sonucunda da tüm veriler üzerinden bir etiketleme gerçekleştirilerek, gelecekte de üretilecek olan parçalardan, kalitesi uygun olanların ve olmayanların daha yüksek başarımla ayrıştırılması hedeflenmektedir.

3.1.2 Sıkı geçme operasyonu için matematiksel modeller

Sıkı geçme operasyonu basitçe elastik ve plastik deformasyonun getirileri ile gerçekleştirilen bir işlemdir. Şekil 3.4’de de görülebileceği gibi, sıkı geçme operasyonu bir iç halka, bir dış halka ve bir kuvvet kaynağından oluşmaktadır.

Basit bir anlatımla, sıkı geçme operasyonunda (interference fit) iç halka yani mil dış halkadan yani yataktan belirli bir miktar daha büyük seçilmektedir. Bu miktar mil ve yatak malzemesinin esneyip, birbirlerine kuvvet uygulayabileceği ve milin yatak içerisinde serbestçe hareket etmesini engelleyecek kadardır. Eğer ki bu sıkı geçme



Şekil 3.4 : Sıkı geçme ile malzemelerin montajlanması [9]

toleransları doğru bir şekilde şekilmezse, ya mil yatak içerisinde hareket edecek ya da her iki malzemedeki demontaj işlemi gerçekleştirilecek kadar esneme olmayacaktır [11].

Montajlama işlemi sırasında, çok yüksek kuvvetler uygulanabilmektedir. Bu işlemde, hem içteki hem de dışındaki halka deformasyona uğramakta iken uğradıkları deformasyon nedeniyle her iki malzeme de eski formlarına dönmeye çalışmaktadırlar. Böylece birbirlerine karşı da kuvvet uygulamaktadırlar [11].

Her iki halkanın da birbirine uyguladıkları kuvvet, malzemelerin sıkıca birbirlerine tutunmasına sebep olur. Bu kuvvetler sayesinde malzemeler bir bütünmüş gibi davranabilirler [11].

Bu yöntem ile montajlanmış parçaların içeride hareket etmesi veya sökülmesi için montaj kuvvetinden daha yüksek kuvvetler uygulamak gerekebilir. Hatta eğer montaj sırasında plastik deformasyon bölgesine geçildiyse, söküm sonrasında malzeme tekrar ilk formuna geri dönemezler [49].

Bu yapının nasıl davrandığını daha iyi anlayabilmek adına, matematiksel olarak da ifade etmekte fayda var.

$$P = \frac{Z}{\frac{r}{E_{steel}} * \left(\frac{r^2 + r_{in}^2}{r^2 - r_{in}^2} + \mu_{steel} \right) + \frac{r}{E_{alu}} * \left(\frac{r^2 + r_{out}^2}{r^2 - r_{out}^2} + \mu_{alu} \right)} \quad (3.1)$$

$$F = 2\pi r P L f \quad (3.2)$$

Sistemin matematiksel modellemesinde, esnek davranış bölgesi modellenmiştir. Bu bölgenin hesaplanabilmesi için 3.1 ve 3.2 numaralı formüller [11] kullanılmıştır. Formülde Z girişim miktarını, r ortak çapı, r_{in} rulman iç çapını, r_{out} yatak dış çapını, f ise sürtünme katsayısını göstermektedir. L değeri de milin yatak içerisinde ne kadar derine girdiğini ifade etmektedir. Aynı zamanda formül sonucu malzeme özelliklerinden de etkilenmektedir. E değeri her iki malzeme için de Young modülünü, μ ise malzemelerin Poisson oranını ifade etmektedir. Alt indisler ise malzeme tipini bize göstermektedir. Son olarak F değeri ise uygulanması gereken baskı kuvvetini ifade etmektedir.

3.1 ile yapılan hesaplamada öncelikle iki her iki malzemenin de birbirlerine temas ettiği noktalarda birbirlerine, karşılıklı olarak uyguladıkları basınç hesaplanmaktadır. Kuvvet, mil ile rulmanın yatağa girdiği tüm süreç boyunca uygulanmakta olup birbirine temas eden tüm yüzeylere karşılıklı etki etmektedir.

3.2 ile yapılan hesaplamada ise 3.1 ile hesaplanan basıncın milin tüm çevresindeki ve milin yatağa giriş derinliğindeki etkisini göstermektedir. Bu denklemin sonucunda, sıkı geçme operasyonunun gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan baskı kuvvetin elde edilmesi planlanmaktadır.

Özet olarak, bu iki denklem göstermektedir ki, kullanılan malzeme özellikleri, malzemelerin boyutları, milin yatak içerisinde ne kadar derine itildiği ve 2 malzeme arasındaki tolerans farkı en önemli parametrelerdir.

3.1.3 Sistemin parametreleri

Teknoloji merkezinde gerçekleştirilen sıkı geçme işleminde kullanılan rulman bileziklerinin malzemesi 304 çelik [3] iken, kasa ise alüminyum alaşımlı bir malzemedir (AlSi10Mg) [17]. Çizelge 3.1'deki malzeme bilgileri incelendiğinde Poisson oranı yüksek olan çeliğin, alüminyuma göre daha mukavvemetli olduğu söylenebilmektedir [24]. Bu nedenle, deformasyonun büyük oranda alüminyum kapaklarda yaşanacağı söylenebilmektedir. Sürtünme hesaplamalarında, sürtünme kuvvetini belirlemek için iki malzeme arasındaki sürtünme katsayısı dikkate alınmıştır. Yağlama işlemi, sistemdeki sürtünme kuvvetini azaltmak ve parçaların daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla bir robot tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu robot, belirli bir program dahilinde hareket ederek yağın sistemdeki tüm yüzeylere eşit bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu sayede, sürtünme kuvvetinin azaltılması ve montajın kolaylaştırılması hedeflenmektedir. Ancak, yağın iki malzeme arasındaki yüzeyine kadar doldurduğu ve bu yüzeyde sürtünme katsayısını ne kadar etkilediği hesaplanmamıştır. Tasarımsal süreçte, bu hesaplamaların eksikliği nedeniyle, matematiksel modelde, yağlama işlemi uygulanmadan operasyonun gerçekleştirildiği varsayılmış, yağlamanın etkisi ihmal edilmiştir. Bu varsayım, matematiksel modelin doğruluğunu ve sonuçlarının güvenilirliğini etkileyebilmektedir.

Çizelge 3.1 : Malzeme Özellikleri

Malzeme Tipi	Young Modülü (GPa) (E)	Poisson Oranı (birimsiz) (μ)
304 Çelik	193 [25]	0,33 [27]
AlSi10Mg	69 [26]	0,265 [27]

Dişli kutusunda rulman çakılan 3 adet yatak bulunmaktadır. Bu rulmanlar, farklı yüksekliklere sahip oldukları için her biri için etkileşime girme anı farklıdır. Hesaplama yapılırken her bir rulmanın etkileşime girmesi gereken noktadan başlayan mesafe değeri kullanılmaktadır. Bu şekilde, her bir rulman için ayrı ayrı hesaplanan değerler toplanarak, toplam gereken kuvvet hesaplanmaktadır.

Tasarımda iki malzeme arasındaki girişim miktarı, iki malzeme arasındaki tolerans olan 0,03 mm olarak belirlenmiştir. Ancak, bu tolerans miktarı malzemeden malzemeye değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, 0,02 mm ile 0,035 mm arasında bir

bant oluşturularak, farklı tolerans değerlerine uygun bir çözüm sunulmuştur. Hata hesaplaması ise her durumda 0,03 mm üzerinden yapılacaktır.

Son olarak yatak dış çapı, yatağın genişlemesini doğrudan etkileyen bir faktördür. Basitçe, yatak ne kadar ince olursa o kadar kolay genişler. Literatürdeki çalışmalarda, malzemenin bir silindir olduğu varsayımı bulunmaktadır. Ancak, bu çalışmadaki yatağın dış çapı düzgün olmadığı için, yatak dış çapı hesaplamalarında, en düşük bölge dikkate alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmektedir.

3.1.4 Sistemin matematiksel modelinin oluşturulması

Presin kuvvete maruz kaldığı an ilk ölçüm anından başlamamaktır. Pres kafası aşağıya indirilirken, belirli bir noktadan sonra ölçümler gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle hangi noktadan itibaren girişimin başladığı tespit edilmelidir. Ölçümler başlatıldıktan 10 mm sonra kayda değer bir kuvvet ölçümü gerçekleşmeye başlamaktadır. Bu nedenle hesaplamalarda 10 mm'den sonra olan ölçümler için çalışma gerçekleştirilecektir. Buna ek olarak, 3 adet rulman montajı yapılmaktadır, fakat tüm rulman bileziklerinin yükseklikleri farklı olduğu için, her bir rulman bileziği için farklı bir anda sıkı geçme operasyonu gerçekleştirilmektedir. Yapılacak hesaplamalarda, kuvvetin ilk tespit edildiği an, yüksekliği en fazla rulmana ait kabul edilmiştir. Bu farklı yükseklikler sebebi ile sıkı geçme hesaplamasında, tüm rulmanlar için farklı bir anda hesaplama başlatılacaktır. Girişimin başladığı an sıfır yükseklik kabul edilecek ve tüm rulmanlar, kasaya tam olarak montaj yapıldığında hesaplama bitirilmiş olacaktır. Buna göre oluşan hesaplama Formül 3.9'da gösterilmiş olduğu gibi gerçekleştirilmiştir.

$$P_{32205} = \frac{Z}{\frac{r_{32205}}{E_{steel}} * \left(\frac{r_{32205}^2 + r_{in32205}^2}{r_{32205}^2 - r_{in32205}^2} + \mu_{steel} \right) + \frac{r_{32205}}{E_{alu}} * \left(\frac{r_{out32205}^2 + r_{32205}^2}{r_{out32205}^2 - r_{32205}^2} + \mu_{alu} \right)} \quad (3.3)$$

$$F_{32205}(x) = 2\pi r_{32205} P_{32205} L_{32205}(x) f \quad (3.4)$$

$$P_{30304} = \frac{Z}{\frac{r_{30304}}{E_{steel}} * \left(\frac{r_{30304}^2 + r_{in30304}^2}{r_{30304}^2 - r_{in30304}^2} + \mu_{steel} \right) + \frac{r_{30304}}{E_{alu}} * \left(\frac{r_{out30304}^2 + r_{30304}^2}{r_{out30304}^2 - r_{30304}^2} + \mu_{alu} \right)} \quad (3.5)$$

$$F_{30304}(x) = 2\pi r_{30304} P_{30304} L_{30304}(x) f \quad (3.6)$$

$$P_{32013} = \frac{Z}{\frac{r_{32013}}{E_{steel}} * \left(\frac{r_{32013}^2 + r_{in32013}^2}{r_{32013}^2 - r_{in32013}^2} + \mu_{steel} \right) + \frac{r_{32013}}{E_{alu}} * \left(\frac{r_{out32013}^2 + r_{32013}^2}{r_{out32013}^2 - r_{32013}^2} + \mu_{alu} \right)} \quad (3.7)$$

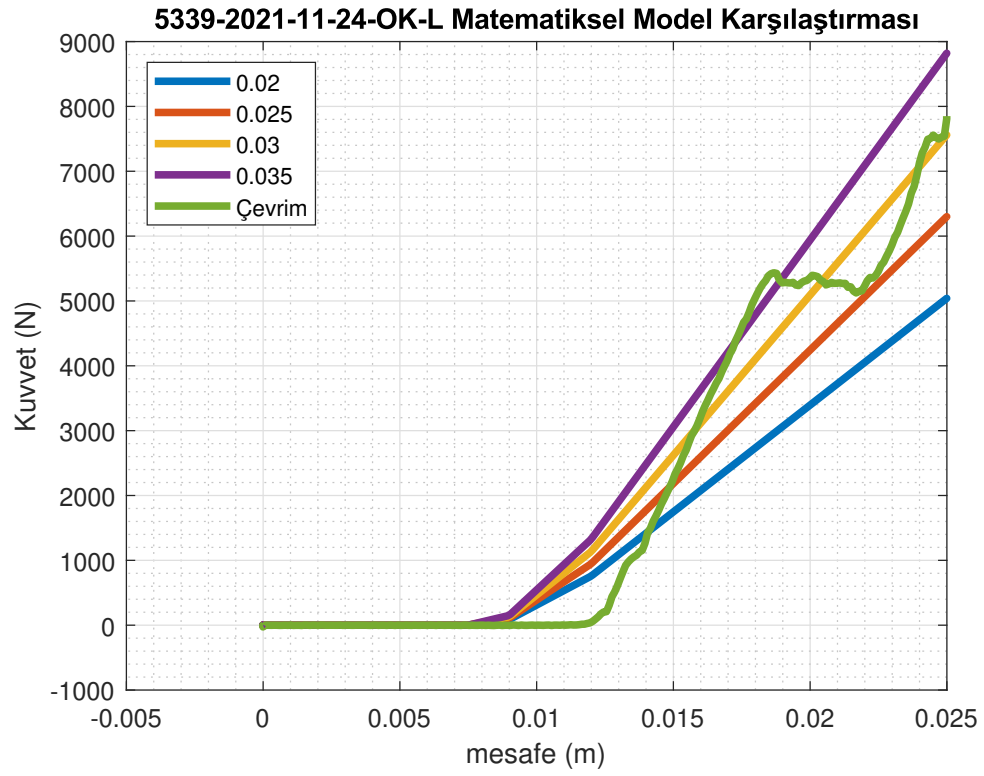
$$F_{32013}(x) = 2\pi r_{32013} P_{32013} L_{32013}(x) f \quad (3.8)$$

$$F_{toplamlam}(x) = F_{32205}(x) + F_{30304}(x) + F_{32013}(x) \quad (3.9)$$

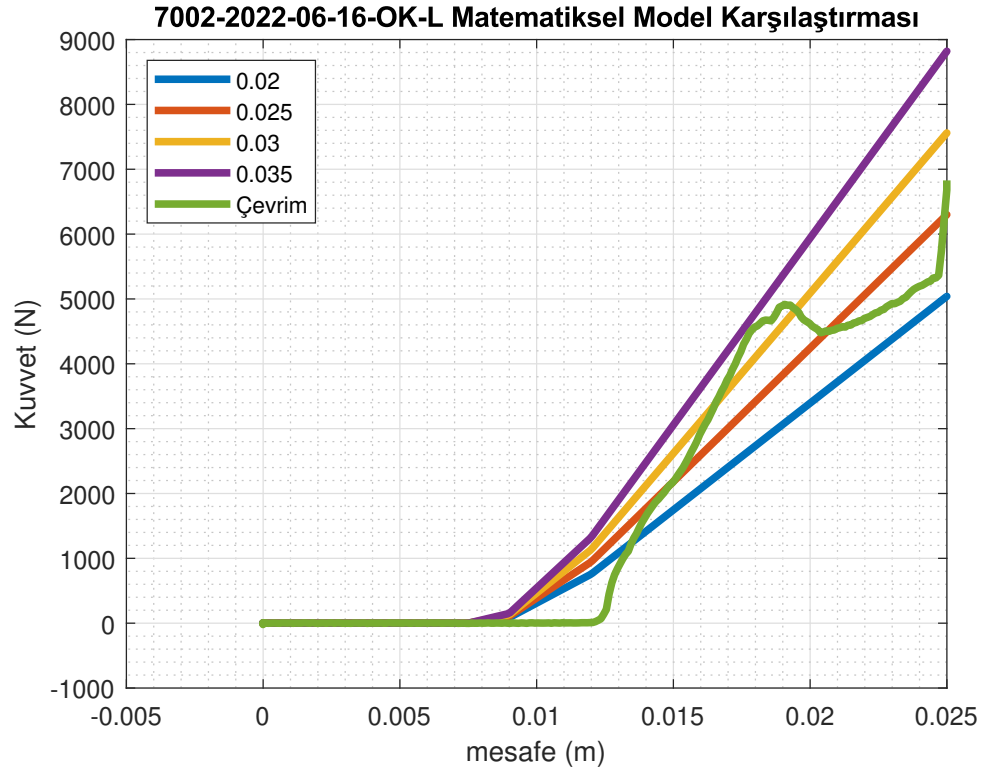
Bu hesaplamalar, MATLAB yazılımı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Yine aynı platformda grafik hale getirilmiştir. Ön ve arka kapaklar için mevcut sistem tarafından uygun (OK) ve uygun olmayan (NOK) olarak etiketlenen sonuçlar arasından rasgele seçilen bazılarının grafiği oluşturulmuştur. Teknik resimden (Şekil 2.3) ve literatürden belirlenen ilgili değerler önce birer değişken olarak tanımlanmıştır. Tüm bu parametreler arasında sabit olmayan tek parametre L yani milin, yatağa girme miktarıdır. Bu değer yol verisinin bir dizi halinde giriş olarak alınmıştır. Dolayısıyla F yani kuvvet çıktısı da bu yol verisine bağlı bir dizi olarak elde edilmiş olacaktır. Sonuç olarak, tüm bu veriler ile bir kuvvet yol grafiği oluşturulması hedeflenmektedir.

Tamamen silindirik, tek bir mil ve yatak ile gerçekleştirildiğinde, sonlu elemanlar yöntemi ve teorik modeller arasında kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir [28]. Ancak, buradaki uygulama gibi karmaşık geometriler ve çoklu sistemler için sonlu elemanlar yöntemleri (finite elements method-FEM) kullanılmasının çok daha etkin sonuçlar vereceği söylenebilmektedir.

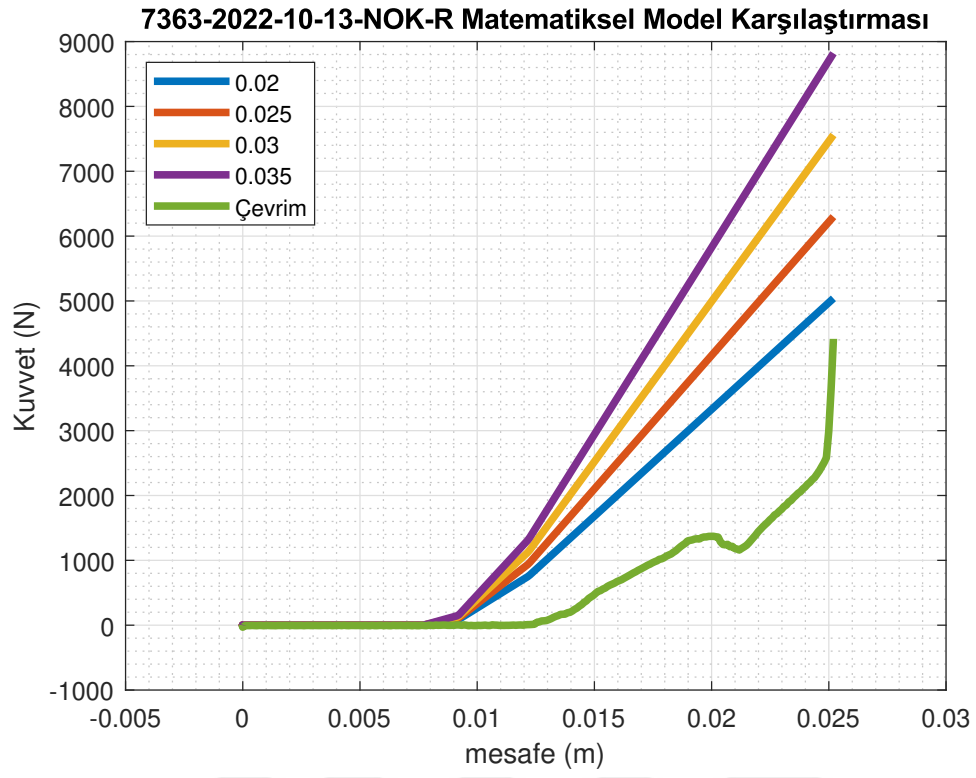
Bu çalışmada, plastik bölgenin teorik olarak hesaplanması gerçekleştirilmeyecektir. Plastik bölgedeki hesaplamanın zorluğu, kullanılan malzemelerin geometrisi ve sistemdeki çok sayıda belirsizlik nedeni ile plastik bölgenin hesaplanmasında zorluk yaşanması beklenmektedir. Bu nedenle, matematiksel model ve çevrimlerin uygunluğunun hesaplanması, tamamen elastik bölgedeki davranış üzerinden gerçekleştirilecektir.



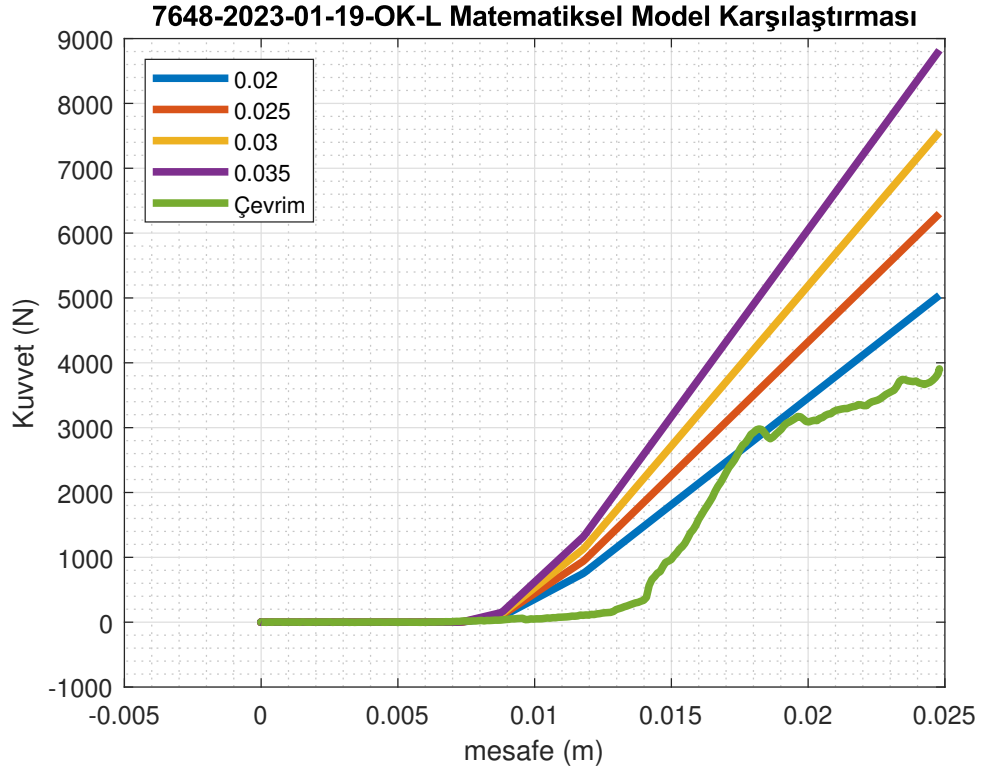
Şekil 3.5 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için matematiksel model karşılaştırılması



Şekil 3.6 : 7002-2022-06-16-OK-L çevrimi için matematiksel model karşılaştırılması



Şekil 3.7 : 7363-2022-10-13-NOK-L çevrimi için matematiksel model karşılaştırılması



Şekil 3.8 : 7648-2023-01-19-OK-L çevrimi için matematiksel model karşılaştırılması

Görülebileceği gibi, grafikler sadece elastik deformasyon gerçekleştiği varsayılarak oluşturulmuştur. Yatak ve bilezik arası tolerans bilinmediği için, farklı tolerans değerleri için oluşan eğriler grafikte farklı renklerle gösterilmiştir. 0,03 mm tolerans değeri tasarımsal değerdir. Ancak grafikler bize göstermektedir ki, malzemelerin tasarımsal farklılıklarından dolayı daha az veya daha çok eğimler gözlemlenebilmektedir.

Sistemin matematiksel model ile karşılaştırıldığında nasıl davrandığını daha iyi anlayabilmek adına, RMSE (3.2) yani hataların karelerinin ortalamasının karekökü yöntemi ile inceleme gerçekleştirilebilmektedir [29].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{calc} - F_{actual})^2} \quad (3.10)$$

Denklemden n değeri toplam veri adedini, F_{calc} belirli bir giriş mesafesindeki hesaplanan kuvveti, F_{actual} ise o mesafedeki ölçülen gerçek kuvveti göstermektedir.

Grafikleri yukarıda çizdirilmiş olan, Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 çevrimleri için RMSE hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan RMSE değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

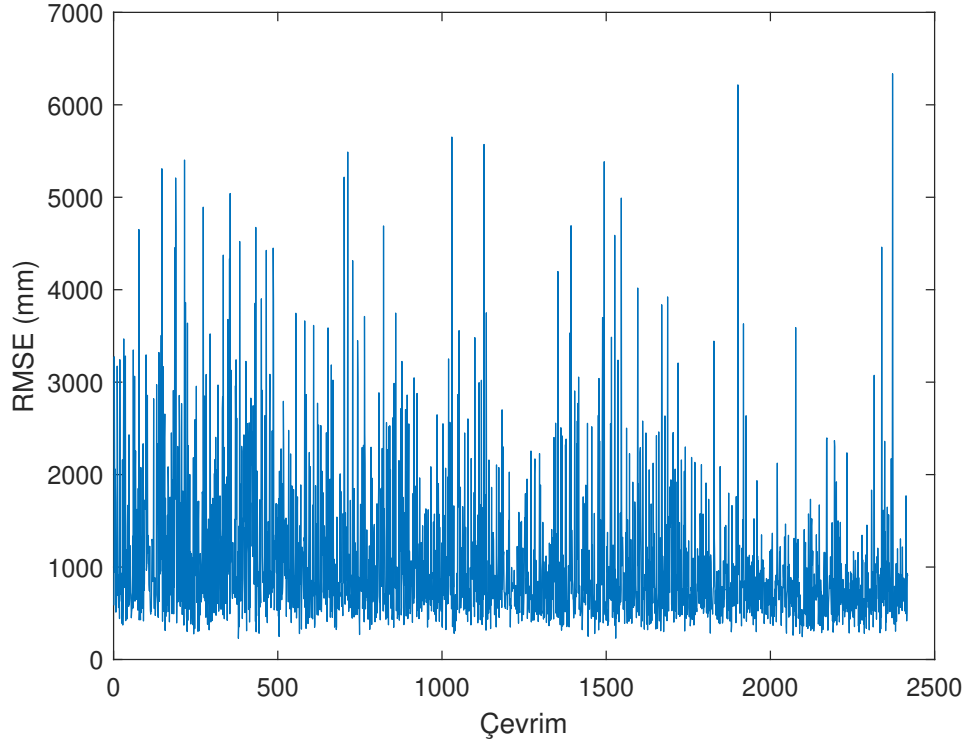
Çizelge 3.2 : Matematiksel Model için hesaplanan RMSE değerleri

Çevrim Adı	Hesaplanan RMSE (mm)
5339-2021-11-24-OK-L	629,39
7002-2022-06-16-OK-L	1953.3
7363-2022-10-13-NOK-R	2958.4
7648-2023-01-19-OK-L	1660,6

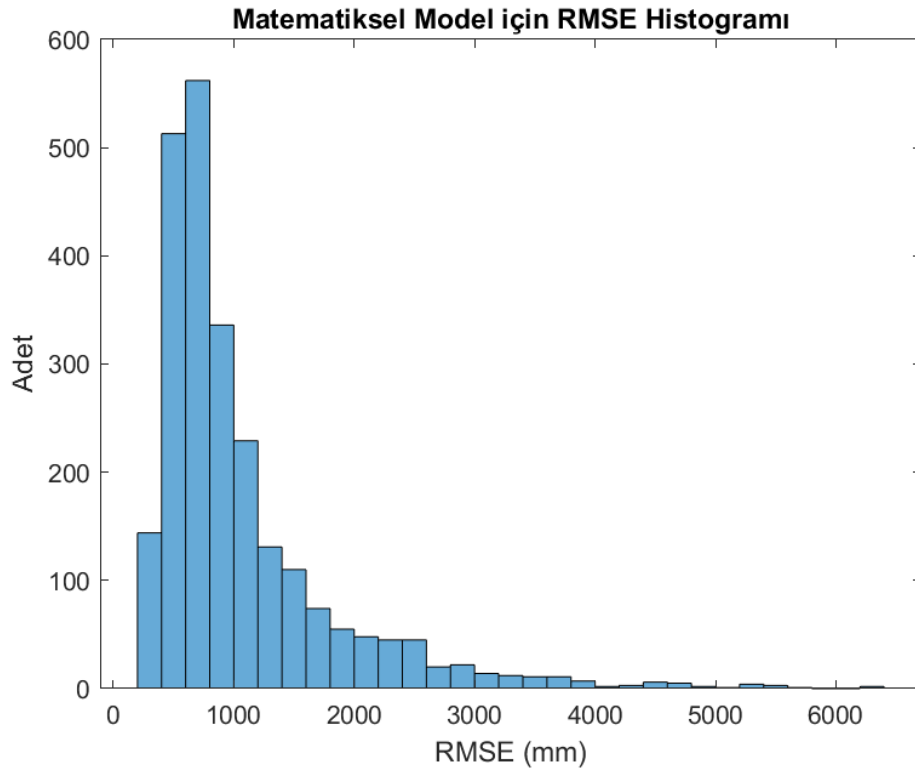
Grafikler incelendiğinde, özellikle belirli bir tolerans kabulü ile çevrim davranışının matematiksel modellere uygun gerçekleştiği söylenebilmektedir. Bu bölümde değerlendirilen bu bilgiler, geçmiş veriler ile değerlendirilmelidir.

3.1.5 Geçmişte üretilen veriler ile karşılaştırma

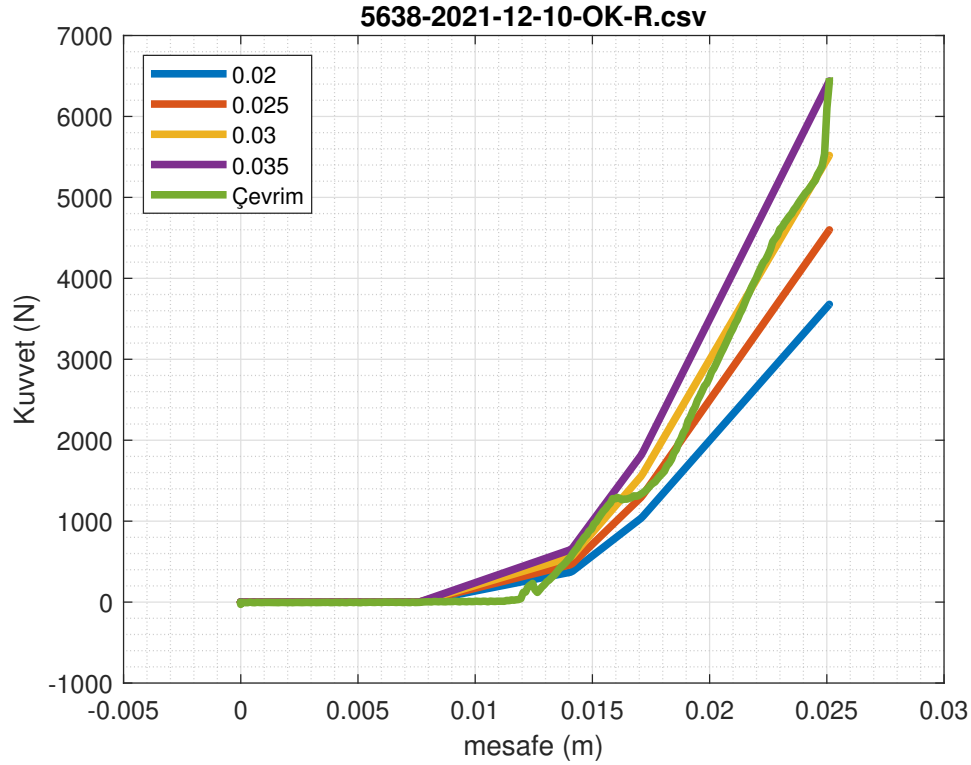
Tüm çevrimler için matematiksel model ile karşılaştırabilmek adına RMSE hesaplaması gerçekleştirildi. Şekil 3.9’te, ilk çevrimden son çevrime kadar, gerçekleşen operasyonun matematiksel modelden farkı gösterilmektedir. Şekil 3.9’da x eksenı çevrimin sırasını, y eksenı ise o çevrimin matematiksel modele göre hesaplanan RMSE değerini ifade etmektedir.



Şekil 3.9 : Tüm çevrimler için RMSE değerinin sırasıyla değişimi

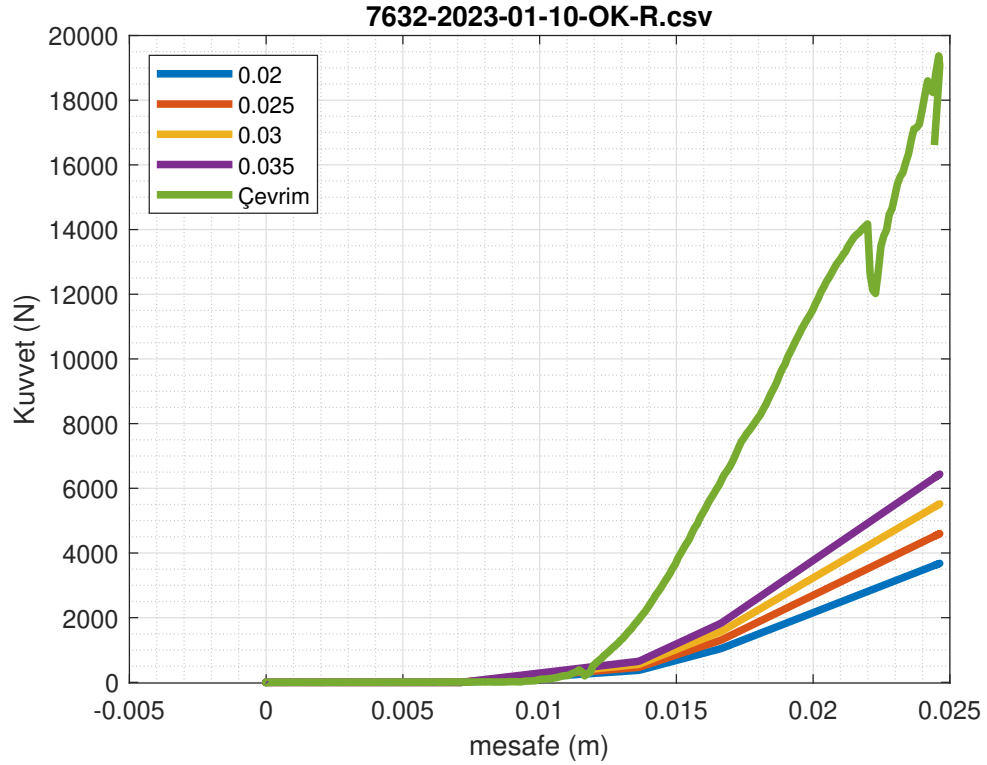


Şekil 3.10 : Matematiksel model ile hesaplanan RMSE değerlerinin histogramı



Şekil 3.11 : En düşük RMSE değeri veren çevrimin grafiği

Bu çalışmada, RMSE değeri en yüksek ve en düşük olan çevrimler tüm değerlerin arasından seçilmiştir. Şekil 3.11’de 5638-2021-12-10-OK-R çevrimine ait grafik incelendiğinde, 0,3 mm tolerans değeri ile hesaplanan elastik davranış grafiğine büyük oranda örtüştüğünü söylenebilmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken konu, çalışmada plastik bölgenin hesaba katılmamış olmasıdır. Bu çevrim, mevcut etiketleme sistemi tarafından da uygun olarak etiketlenmiştir. Ancak, burada çalışmakta olan bir operatör, bu çevrimi uygun olmayan bir çevrim olarak etiketleyecektir. Diğer taraftan, Şekil 3.5 ile gösterilen 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi, tasarımsal aralıkların dışında davranmaktadır. Özellikle doğrusal davranan elastik bölgelerin eğiminin benzer olmasını beklenmektedir. söylenebilir ki, gerçek ürünlerde girişim miktarı tasarımsal değer olan 0,03 mm değerinden daha yüksektir. Diğer tüm çevrimler de incelendiğinde farklı parçalarda aynı miktarda girişim olmadığı da söylenebilmektedir. RMSE değeri en yüksek olan çevrimin grafiği Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde ilk göze çarpan durum, baskı kuvvetinin 20.000 N değerine çok yaklaşmış olmasıdır. Eğer ki, sistem 20.000 N değerinden daha yüksek bir kuvvete

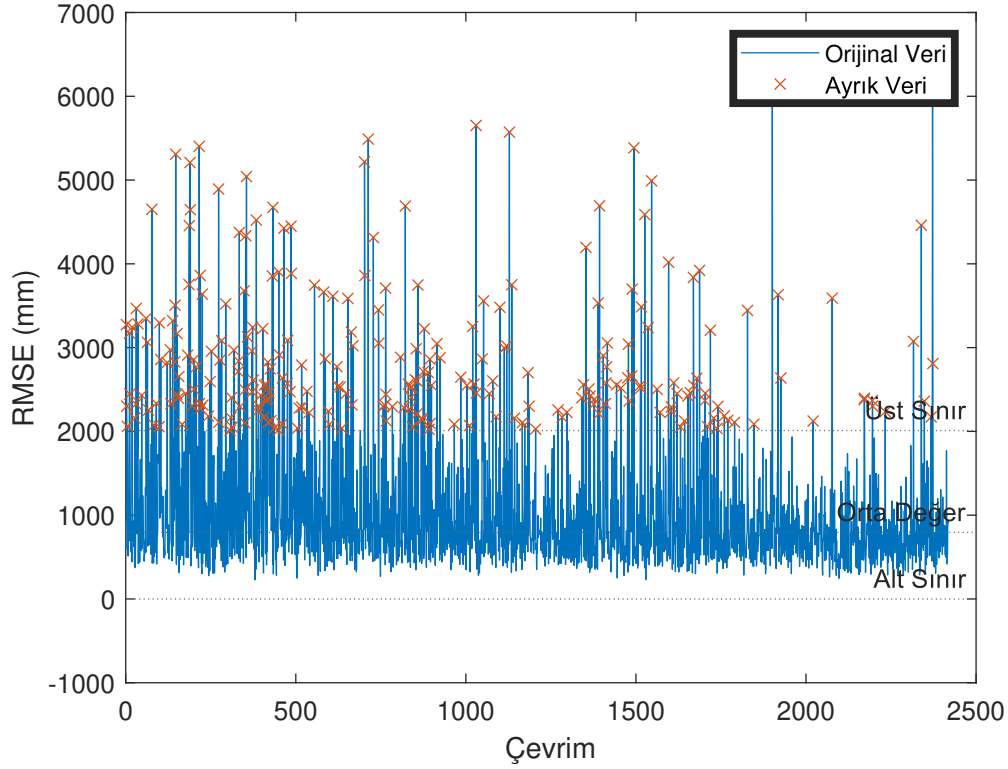


Şekil 3.12 : En yüksek RMSE değeri veren çevrimin grafiği

daha önce ulaşmış olsaydı operasyon tamamlanmadan sonlandırılıp, doğrudan hatalı olarak tanımlanacaktı. Bu çevrimde bileziklerin yerleştirilmesi sırasında, çok yüksek kuvvetlere erişildiği için tartışmasız olarak hatalı bir çevrimdir.

Tüm bunların ardından, hangi hata seviyesindeki çevrimlerin hatalı hangilerinin uygun üretim olduğuna karar vermemiz gerekmektedir. Bu nedenle, RMSE değerinin belirli bir değeri için eşik belirlemek gereklidir. Burada çok farklı yöntemler kullanılabilir. Ampirik bir şekilde, ne kadarlık bir hata seviyesinin kabul edilebilir olduğu konusunda bir değerlendirme yapılabilir. Bu çalışmada medyan mutlak sapma (MAD-Median Absolute Deviation) ile eşik değeri belirlenecektir.

MATLAB'ta yapılan çalışmada, 2010,3 mm RMSE değerinden daha büyük hatalar için ilgili çevrim NOK kabul edilmiştir. Şekil 3.13'de görüldüğü şekilde, 261 adet çevrim, NOK olarak belirlenmiştir. Bu çevrimler, grafikte turuncu x ile etiketlenmiştir. Burada bulunan 261 adet hatalı çevrim, kural bazlı yapının hesaplamış olduğu 171 sayısının üzerindedir.

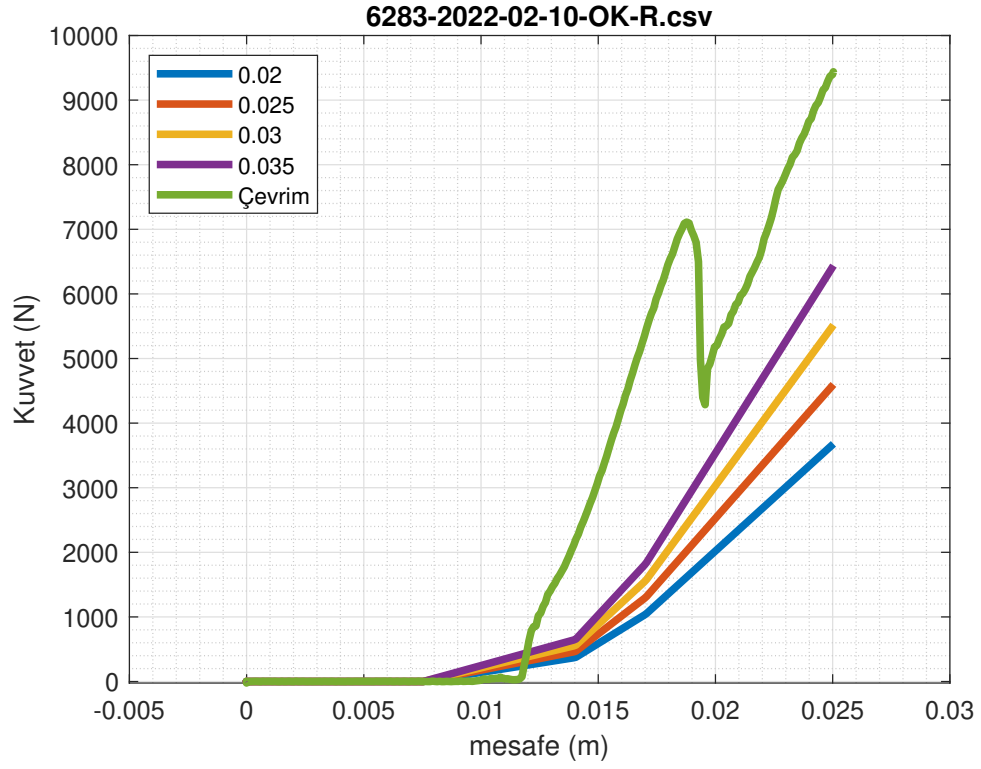


Şekil 3.13 : Matematiksel model ile karşılaştırılarak, NOK kabul edilen çevrimler

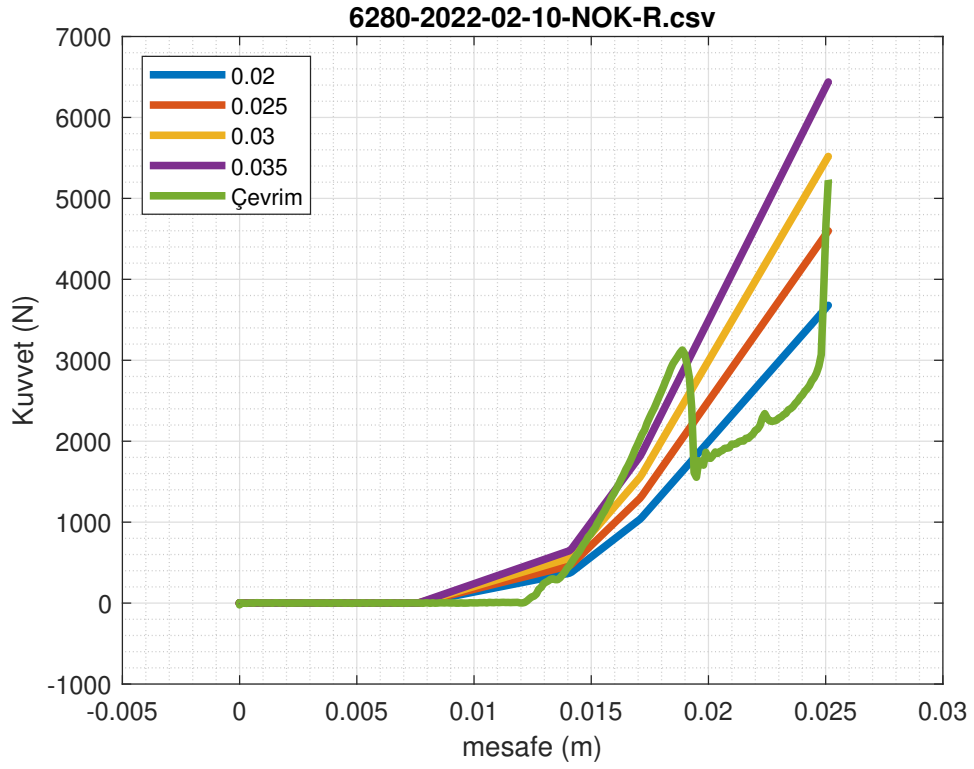
Çizelge 3.3 : Matematiksel Model Sonrası Etiketleme Değişimi

Kural Bazlı Durum	Matematiksel Model ile Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	2003
OK	NOK	244
NOK	OK	154
NOK	NOK	17

Çizelge 3.4 ile hangi etiketlemelerin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Kural bazlı sistemin NOK olarak etiketlemiş olduğu 171 adet çevrimin yalnızca 17 adedi NOK olarak kalmaya devam etmiştir. 154 tanesi ise OK olarak etiketlenmiştir. OK olarak etiketlenmiş çevrimlerin ise 244 adedi NOK olarak etiketlenmiştir.



Şekil 3.14 : OK iken NOK olarak değiştirilen çevrim



Şekil 3.15 : NOK iken OK olarak değiştirilen çevrim

Bu değişimlere Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 grafikleri üzerinden inceleyecek olursak, ilk gözümüze çarpan yine tasarım hatası olmaktadır. Şekil 3.14 ile gösterilen çevrim, deneysel olarak belirlenmiş olan kutunun içerisinde kalmıştır. Ancak Şekil 3.15 ile gösterilen çevrimde beklenenden çok düşük kuvvetler gözlemlenmiştir. Bu çevrim tasarımsal olarak doğru sonuç veriyor olsa da, bu seviyede gerçekleştirilen operasyon sonucu üretilen parçaların test istasyonunda hata vermesi sebebiyle eşikler operatör tarafından değiştirilmiştir.

Çizelge 3.4 : Matematiksel model sonrası operatör etiketleme değişimi

Operatör Etiketlemesi	Matematiksel Model ile Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	1400
OK	NOK	216
NOK	OK	757
NOK	NOK	45

Çizelge 3.4 ile verilen tabloda, matematiksel modelin ardından, operatör etiketlemeleri ile karşılaştırmalı durum gösterilmiştir. Matematiksel model kullanılarak gerçekleştirilen etiketlemenin ne kadar başarılı olduğu operatör etiketlemeleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Burada kullanılan yöntem f-skoru olmuştur. F-skoru yöntemi, etiketlenen veriler ve model çıktılarının ne kadar başarılı olduğunu gösteren ve model çıktılarını değerlendirmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [48].

F-skoru yönteminde öncelikle bazı hesaplamaları gerçekleştirmek gereklidir.

Çizelge 3.5 : Hata Matrisi

		Tahmin Çıktısı	
		p	n
Gerçek Değer	p'	Gerçek Pozitif (TP)	Hatalı Negatif (FN)
	n'	Hatalı Pozitif (FP)	Gerçek Negatif (TN)

F-skoru yönteminde öncelikle, yukarıdaki Çizelge 3.5 tablosuna, Çizelge 3.4 ile hesaplanan değerleri yerleştirmemiz gereklidir. Bu değerler Çizelge 3.6 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 : Matematiksel model sonrası hata matrisi değerleri

Durum	Tanım	Adet
OKOK	TP	1400
OKNOK	FN	216
NOKOK	FP	757
NOKNOK	TN	45
Toplam	Total	2418

Çizelge 3.7 tablosunda ise, hata metriklerinin hesaplama yöntemleri paylaşılmıştır [48].

Çizelge 3.7 : Hata metriklerinin hesaplanması

Metrik	Formül
Doğruluk Accuracy	$\frac{TN+TP}{Total}$
Keskinlik Precision	$\frac{TP}{TP+TN}$
Geri Kazanma Recall	$\frac{TP}{FP+TN}$
F Skoru F-score	$\frac{2*Precision*Recall}{Precision+Recall}$

Çizelge 3.8 tablosunda ise bu hesaplamalara ilişkin sonuçlar paylaşılmıştır.

Çizelge 3.8 : Matematiksel model sonrası hata metrikleri

Metrik	Değer
Doğruluk	0,5976
Keskinlik	0,8663
Geri Kazanma	0,6490
F skoru	0,7421

F skoru için olası en yüksek değer 1'dir. Bu da hem 'Keskinlik' hem de 'Geri Kazanma' değerlerinin yine 1 olduğu, yani modelin kusursuz doğruluk ile çalıştığı durumlarda geçerlidir. F skorunun 1 değerine yakın ne kadar yakın olduğu modelin ne kadar başarılı sonuç verdiğinin göstergelerinden bir tanesidir.

3.2 Matematiksel Modelin Genel Değerlendirmesi

Matematiksel modellemeler, doğrusal bir davranış gösteren elastik bölgede, başarılı bir sonuç vermektedir. Ancak sistemin tahmin edilemez parametrelerin olması ve plastik bölgenin her çevrimde farklı bir davranış sergiliyor olmasından dolayı hesaplama zorluğu yaratması sebebiyle, hatalar yüksek çıkmaktadır.

Bu seviyede bir belirsizliğin olması nedeni ile OK veya NOK sınıflandırılması yapmanın kolay olmadığı, hataların da yüksekliğinden dolayı görülebilmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde, mevcut sistemde deneysel olarak kabul edilen limitler, tasarımsal parametreler ile hesaplanan matematiksel modele uymamaktadır. Yağlamanın etkisinin gözardı edilmiş olması, malzemeler arasındaki girişim miktarının parçaların döküm malzeme olması sebebi ile çok değişken olması, malzemelerin sürekli olarak sökülüp takılıyor olması gibi etmenler sonuçları doğrudan etkilemektedir.

Bu gibi nedenlerle; alternatif yöntemler kullanılarak yapılacak etiketlemeler değerlendirilerek, sistemin hatalı parçaları belirleme performansı iyileştirilebilir.

4. VERİLERİN İNCELENMESİ

Bu çalışmadaki veri setleri hakkında yorum yapmamızı sağlayacak olan durum, değişkenlerin birbirileri ile olan ilişkileridir. Tüm çevrimlerin veri setlerinde 3 farklı değişken vardır. Bu değişkenler, kuvvet, yol ve zaman değişkenleridir. Tüm değişkenler birbirlerinden farklı boyutlarda ve birimlerdedir. Bu nedenle, standartlaştırılmamış değişkenler, model sonuçlarımızı da olumsuz etkileyebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden ötürü, veri setlerinde öncelikle bir standartlaştırma yöntemi uygulanacaktır. Ardından Mahalanobis uzaklığı yöntemi ile değişkenlerin ölçüm anlarındaki ilişkileri ortaya çıkartılacaktır. Sonuç olarak ise modelleme gerçekleştirilebilecek tek değişkenli çevrimler elde edilecektir. Böylece modeller, değişkenleri birimlerinden ve büyüklüklerinden ziyade aralarındaki ilişkileri inceleyecek bir yapıya getirilmesi hedeflenmektedir.

4.1 Veri Standartlaştırma

Veri standartlaştırması, farklı veri setlerinin uyumlu ve karşılaştırılabilir hale getirilmesi sürecidir. Aynı konu üzerinde çalışan farklı kişiler veya kurumlar tarafından üretilen veriler genellikle farklı formatlarda ve yapıda olabilmektedir. Bu durum, verilerin analizini ve yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Veri standartlaştırması, bu tür problemleri çözer ve verinin daha anlaşılır ve kullanışlı hale gelmesini sağlamaktadır [31].

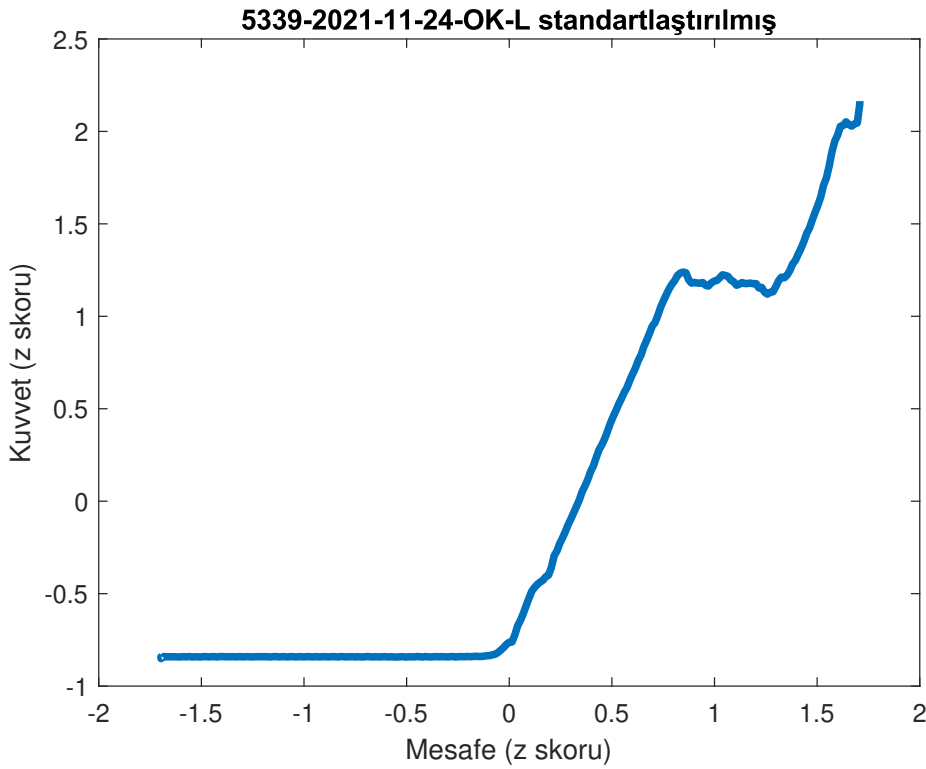
Bu çalışmadaki veriler de bir çok farklı çevrimden oluşmaktadır. Bu çevrimlerde birçok farklı davranış olduğu Bölüm 2 içerisinde incelenmiştir. Bilinmektedir ki, tüm çevrimler aynı tasarımsal özelliklere sahip değildir. Bu nedenle, aynı matematiksel model ile bu farklı kriterler değerlendirilememektedir. Yine Bölüm 2’te belirtilmiş olan belirsizlikler sebebi ile, herhangi bir çevrimin hangi mesafede başladığı, hangi kuvvet ile tamamlanmış olması gerektiğini doğrudan söyleyebilmek mümkün değildir.

Bahsedilen bu tasarımsal belirsiklerin değerlendirilebilmesi için verilerin birbirleri ile karşılaştırılabileceği bir standartlaştırma yapılması faydalı olacaktır.

Bu çalışmada veri standartlaştırma için, Formül 4.1 ile gösterilen z skor yöntemi kullanıldı. İlgili formülde x_i , veri kümesi içerisindeki bir değeri, μ veri kümesinin aritmetik ortalamasını, σ ise veri kümesinin standart sapmasını ifade etmektedir [31]. z skor hesaplaması, kuvvet ve yol değişkenleri için uygulanacaktır.

$$z = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (4.1)$$

Daha önce Şekil 2.9 ile gösterilmiş olan çevrimi ele alalım. Bu çevrimde, kuvvet ve yol değişkenine standartlaştırma uygulandığında Şekil 4.1 ile gösterilen grafikteki gibi bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 4.1 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için standartlaştırılmış verilerle kuvvet(N)-yol(mm) grafiği

Sonrasında Mahalanobis uzaklıkları hesaplanacaktır. Bunun için formül 4.2'den yararlanılacaktır. İlgili formülde d_i i değeri için Mahalanobis uzaklığını, m_i i

satırındaki m değerini, $\bar{m}$ tüm m değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Ayrıca formül 4.3 ile ifade edilen S değeri ise, m ve n değerleri arasındaki kovaryansı ifade etmektedir [32].

$$d^2 = (m - \bar{m})^T S^{-1} (m - \bar{m}) \quad (4.2)$$

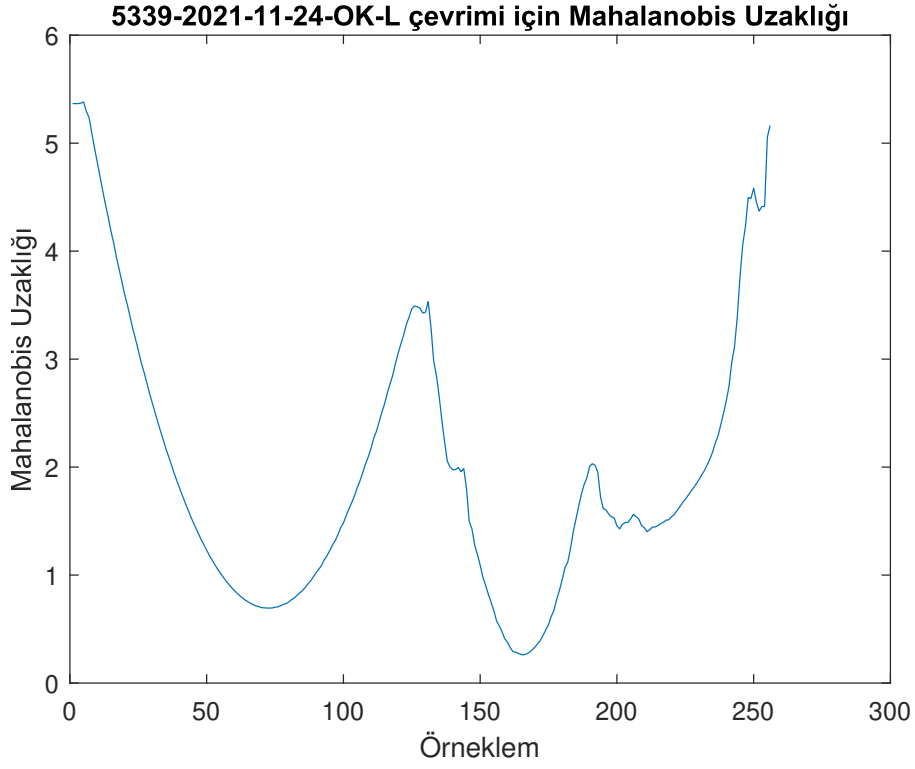
$$S = Cov(m, n) = \frac{1}{N-1} \sum ((m - \bar{m})(n - \bar{n})) \quad (4.3)$$

Mahalanobis uzaklığı ifadesi her bir gözlem noktası için birbirleri arasındaki göreceli uzaklığı tanımladığı için iki değişken tek değişkene indirgenmiş gibi varsayılabilir. Bu çalışmadaki amaç, uzaklık ile kuvvetler arasındaki örüntüye bağlı olarak OK veya NOK diye isimlendirmek olduğu için Mahalanobis uzaklığı tercih edilmiştir. Böylece daha anlamlı bir irdeleme ve gruplama yapılacaktır.

Formül 4.2 ve Formül 4.3 ile gösterilen ifadelerde m ve n değeri olarak Formül 4.4 ile gösterilmiş olan verilerdeki kuvvet ve mesafenin z skoru ile hesaplanmış değerlerinin vektörü kullanılacaktır.

$$m = n = \begin{bmatrix} F_1 & x_1 \\ F_2 & x_2 \\ F_3 & x_3 \\ \dots & \dots \\ F_{256} & x_{256} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

5339-2021-11-24-OK-L çevriminin standartlaştırılmış değerleri kullanılarak Mahalanobis uzaklığı hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Böylece çevrim, kuvvet ve mesafe değerlerinin ortak bir ifadesi olacak biçimde Şekil 4.2 ile gösterilen grafikteki biçimi almıştır.



Şekil 4.2 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için standartlaştırılmış verilerle kuvvet(N)-yol(mm) ifadesinin Mahalanobis uzaklığı gösterimi

Standartlaştırma ve Mahalanobis uzaklığı hesaplaması tüm çevrimler için gerçekleştirilecektir. Bu sayede, birbirlerinden farklı davranan çevrimler ortak bir ifade ile gösterilmiş olacaktır.

5. SİSTEMİN ANFIS VE YSA ile MODELLENMESİ

Bir önceki bölümde incelenen matematiksel modelin, bu uygulama için OK ve NOK sınıflandırması yapmasının yetersiz olabileceği değerlendirilmişti. Bu nedenle, farklı modelleme yöntemleri ile denemeler de gerçekleştirilecektir.

5.1 Kullanılacak Yöntemlerin İncelenmesi

Bu çalışmada, sistemin hatalı parçaları ayıklama performansını iyileştirmek için, uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ve yapay sinir ağları(ANN) ile modelleme yöntemleri üzerine çalışılacaktır. Her iki yöntemin de bu sistemin performansına etkisi değerlendirilecektir.

5.1.1 Bulanık mantık

Bulanık mantık, geleneksel ikili mantık olan 1 ve 0 değerlerinden oluşan, 1965 yılında Lotfi A. Zadeh'in literatüre kazandırdığı bir kavramdır [34]. İkili mantıkta sadece var/yok, A/Adeğil gibi keskin ifadeler kullanılmaktadır. Buna karşılık bulanık mantıkta ifadeler, $[0,1]$ aralığında üyelik dereceleri ile tanımlanmaktadır.

Bu konuda bir örnek irdelemek gerekirse; 150 cm'nin altında olan insanlar "Kısa Boylular", 180 cm'nin üzerinde olanlar "Uzun Boylular", arada kalanlar ise "Orta Boylular" olarak sınıflandırıldığı varsayılabilir. Böyle bir sınıflandırma yapılırken, klasik mantıkta bir kişi, ya kısa boyludur ya orta boyludur ya da uzun boyludur. Ancak bulanık mantık ile sınıflandırmaya üyelik dereceleri de eklendiğinde bir kişi farklı sınıflandırmalara farklı dereceler ile dahil olmaktadır. 155 santimetre uzunluğundaki biri %40 kısa boylu %60 orta boylu olarak tanımlanabilir. Böylece bu kişi farklı kümelerle farklı seviyelerde dahil olur. Sonuç olarak da bir kişinin kümelerdeki derecesi ile ne kadar uzun olduğu tanımlanabilmektedir [34].

5.1.2 Yapay sinir ağıları

Yapay sinir ağıları, insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri otomatik olarak gerçekleştirmek amacı ile geliştirilen bilgisayar sistemleridir.

İlk olarak 1943 yılında McCulloch ve Pitts tarafından önerilmiş olan yapay sinir ağıları, insan beyninde bulunan sinir hücrelerinin çalışmasını taklit eden, birbirine bağlı düğümlerden oluşan yapılardır. YSA modelleri, geleneksel yaklaşımlarla çözümü güç olan tanıma, optimizasyon, kontrol ve tahmin gibi, girdilerle çıktılar arasındaki ilişkinin karmaşık olduğu problemlerin çözümünde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir [35].

Biyolojik sistemlerde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik (synaptic) bağlantıların ayarlanması ile olur. Yani, insanlar doğumlarından itibaren bir yaşayarak öğrenme süreci içerisine girerler. Bu süreç içinde beyin sürekli bir gelişme göstermektedir. Yaşayıp tecrübe ettikçe sinaptik bağlantılar ayarlanır ve hatta yeni bağlantılar oluşur. Bu sayede öğrenme gerçekleşir. Bu durum YSA için de geçerlidir. Öğrenme, eğitime yoluyla örnekler kullanarak olur; başka bir deyişle, gerçekleşme girdi/çıktı verilerinin işlenmesiyle, yani eğitime algoritmasının bu verileri kullanarak bağlantı ağırlıklarını (weights of the synapses) bir yakınsama sağlanana kadar, tekrar tekrar ayarlamasıyla gerçekleştirilir [35].

Yapay sinir ağıları modellerinde 3 temel katman bulunmaktadır.

- Giriş katmanı: Bu katmanda yapay sinir ağıları ile modellenilecek sistemin giriş parametreleri tanımlanmakta; giriş katmanındaki veri kümeleri, basitçe bilinen veya ölçülebilen değerleri ifade etmektedir.
- Gizli katman: Bu katmanda giriş verileri arasındaki ilişkiler tanımlanmaktadır.
- Çıkış katmanı: Bu katmanda ilişkilerin sonucunda bir çıktı elde edilmektedir.

Giriş parametrelerinin seçimi için ise birkaç farklı yöntem kullanılabilir [36].

- Doğrusal olmayan, giriş-çıkış: Bu yöntemde, gizli katmandaki tüm ilişkiler giriş verileri ile kurgulanmaktadır.

- Doğrusal olmayan otoregresif: Bu yöntemde, gizli katmandaki tüm ilişkiler çıkış verileri ile kurgulanmaktadır.
- Doğrusal olmayan otoregresif eksojen: Bu yöntemde gizli katmandaki ilişkiler giriş ve çıkış verilerinin tümü ile kurgulanmaktadır.

5.1.3 Adaptif ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS)

ANFIS basitçe, bulanık mantık üyelik fonksiyonlarının kullanılıp, yapay sinir ağları yöntemi ile öğretilmesidir. Bu yöntem ilk olarak, 1993 yılında J. S.R. Jiang tarafından geliştirilmiş ve doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesinde kullanılmıştır. Hibrit bir öğrenme algoritması olan ANFIS'in gizli katmanı 5 ara katmandan oluşmaktadır [37].

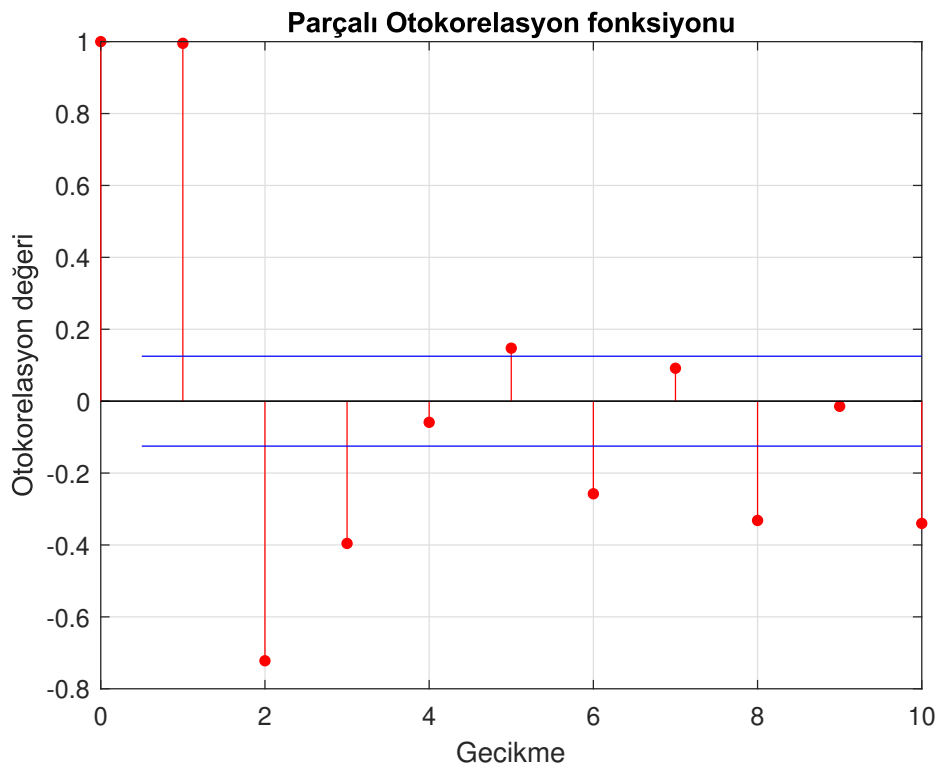
- 1. Katman Bulanıklaştırma Katmanı: Bu katmanda giriş değerleri bulanık üyelik fonksiyonları ile tanımlanmaktadır. Burada kullanılabilecek üyelik fonksiyonları; üçgen, yamuk veya çan eğrisi şeklinde olabilmektedir [34].
- 2. Katman Kural Katmanı: Bu katmanda, giriş üyelik derecelerinin çarpımı yapılmaktadır. Bu katmanın çıkışı, bulanıklaştırma katmanından gelen üyelik derecelerinin çarpımıdır.
- 3. Katman Normalleştirme Katmanı: Bu katmanda kural katmanından gelen çarpım sonucu ile kuralın ateşleme gücü (firing strength) hesaplanmaktadır.
- 4. Katman Durulaştırma Katmanı: Burada bir önceki katmandan gelen değerler ile bulanık olmayan bir sonuç elde edilmektedir.
- 5. Katman Toplama Katmanı: Durulaştırma katmanından gelen tüm sonuçlar toplanmakta ve sonuç katmanına aktarılmaktadır [30].

5.2 Rulman Çakma Operasyonunun ANFIS ile Modellenmesi

Bu kısımda, Bölüm 2'de matematiksel modelini incelemiş olduğumuz rulman çakma operasyonunun sınıflandırılabilmesi adına ANFIS ile modelleme gerçekleştirilecektir.

5.2.1 Uygun parametrelerin seçimi

Öncelikle sistemin modellemesinin gerçekleştirilebilmesi için, Bölüm 4'te gerçekleştirilen Mahalanobis uzaklığı ile indirgenmiş veriler kullanılacaktır. Böylece, kuvvet (N) ve mesafe (mm) değerleri bir sonraki çıkışın ne olduğunu belirlemek için kullanılmış olacaktır. Bu çalışmada, herhangi bir çevrimin uygunluğunun sınıflandırılması yapılmak istendiğinden, sistemin kendisinin modellemesi gerçekleştirilmemiştir. Yapının ANFIS ile modellemesini gerçekleştirirmeden öncelikle giriş ve çıkış katmanlarındaki elemanların neler olacağını belirlemek gereklidir.



Şekil 5.1 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için Mahalanobis uzaklığı fonksiyonun parçalı otokorelasyon çıktısı

Bölüm 4'te Mahalanobis uzaklığı hesaplanması ile, giriş verilerinin adedi teke düşürüldü. Ancak, bu verilerin kendisini ne kadar önceki değerler ile tanımlayabildiğini de bilmek gereklidir. Bunu hesaplayabilmek adına, parçalı otokorelasyon yöntemi uygulanmıştır [33]. Bu yöntem uygulanarak elde edilen çıktı Şekil 5.1 ile gösterilmiştir. Bu sonuç incelendiğinde, fonksiyonun 5 gecikme ile tanımlanması halinde anlamlı bir çıktı elde edilebileceği görülmüştür. Bu nedenle öğretim

gerçekleştirilirken, giriş verileri $n - 1$, $n - 2$, $n - 3$, $n - 4$ ve $n - 5$ anındaki Mahalanobis uzaklığı değerleri olacaktır.

Her bir giriş verisi için ikişer adet üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Öğretim gerçekleştirilirken, farklı sayılardaki üyelik fonksiyonları için de deneme gerçekleştirilmiştir. Tüm giriş parametreleri için, 2'den 5'e kadar tüm kombinasyonlarda ([2,2,2], [2,2,3], [2,3,2]...[5,5,4], [5,5,5]) öğretim ayrıca gerçekleştirilmiştir. En iyi sonuç ikişer üyelik fonksiyonu ile alındığı için seçilmiştir. Daha fazla üyelik fonksiyonu ile, öğretim verisindeki hata(RMSE) sayısal olarak azalmış olsa da, test verileri ile hatalar çok yüksek sayılara ulaşmıştır.

Öğretim gerçekleştirirken kullanılan üyelik fonksiyonu sayısının fazla olması öğretim verisine daha yakın hesaplama gerçekleştirebilmeyi sağlamaktadır. Ancak, farklı verilerle aynı model test edildiğinde model öğretim verisine daha keskin bir yakınlık beklemeye başlamaktadır. Bu nedenle, test verisinden farklı çevrimlerde karşılaştırma yapmanın mümkün olmayacağı hata değerlerine ulaşılmaktadır. Eğer her çevrimin kusursuz olarak birbiri ile aynı şekilde davranması bekleniyor olsaydı, üyelik fonksiyonlarını artırmak faydalı olacaktı. Ancak bu çalışmada seçilen rulman çakma operasyonu için çevrim sonuçları geniş bir çeşitlilik göstermektedir. Sonuç olarak tüm parametreler için üyelik fonksiyonları ikişer adet belirlenmiştir.

Her bir parametre için iki adet üyelik fonksiyonu tanımlanmış olacağı için 2^5 yani 32 adet kural tanımlanmış olacaktır.

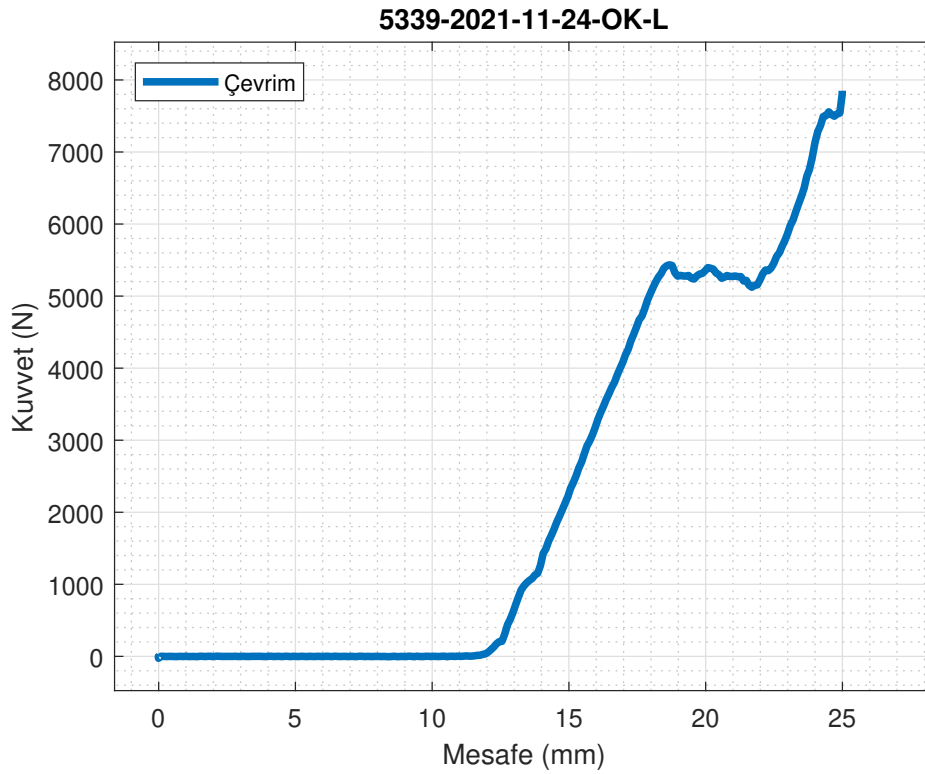
Bu modelleme yapısında, tüm kurallar, çıkıştan alınan farklı gecikmelerdeki sinyal değerleri ile tanımlanmaktadır. Bu nedenle NAR (Nonlinear Autoregressive) yapısında bir modelleme yapıldığı söylenebilir. Bu yapıda çıkış değeri hesaplanırken, kendisinin daha önceki zamanlarda aldığı değerler de hesaba katılmış olur. Tüm bunlar belirdikten sonra, yazılım araçlarıyla sistemin modellemesi gerçekleştirilebilir [36].

5.2.2 Sistem modelleme

ANFIS ile modelleme gerçekleştirmek için MATLAB yazılımının ANFIS aracından faydalanılmıştır. Bu araç sayesinde, modelleme için gerekli temel parametreler belirlenerek model kurulabilmektedir. İçerisindeki algoritmaların başarılı bir şekilde

optimize edilmiş olması sebebiyle de çok uzun sürebilecek modelleme süreçleri çok daha kısa sürelerde gerçekleştirilebilmektedir [39].

Yapılacak tüm çalışmada, tasarımsal olarak civata yuvaları hariç üzerilerine çakılan rulman tiplerinin bile çevrimelrde aynı yerde ve tipte olması sebebi ile ön ve arka kapaklar ayrı ayrı modellenmeyecektir. Sıkı geçme operasyonu için öncelikle, toplanan çevrim verileri arasından, dişli kutusu testi yapılp uygun olan çakma işlemlerinden biri seçilmiştir. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi, MEXT Model Fabrika içerisinde üretilen dişli kutuları, sürekli olarak sökölüp yeniden montajı yapılmaktadır. Bu da malzemelerde zamanla bozulmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle modeller oluşturulurken, öncelikle eski tarihli olan çevrimler tercih edilmiştir. Ardından bu modeller arasından hat sonu testi yapılp uygun olduğu görülenler içerisinde tercih yapılmıştır.

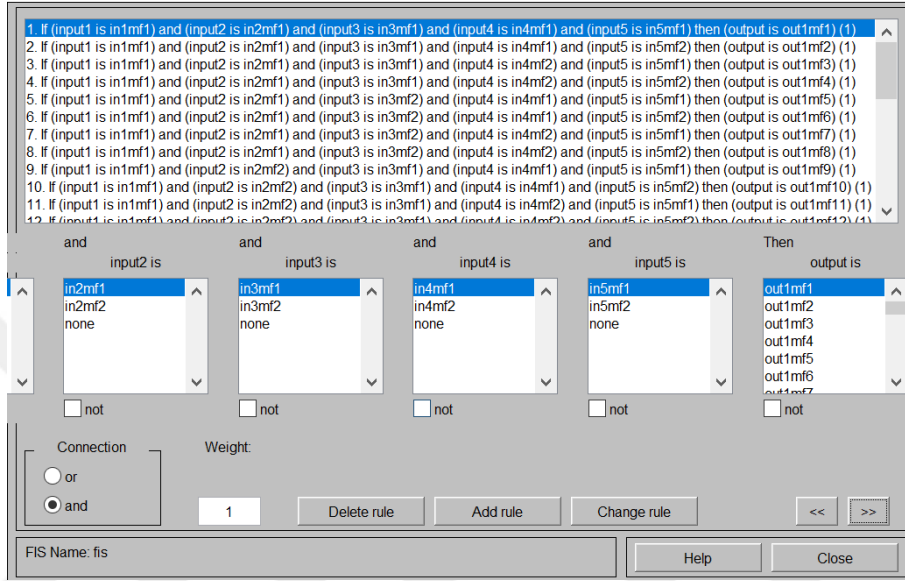


Şekil 5.2 : 5339-2021-11-24-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği

Sistem modellemek ve karşılaştırmak için referans olarak seçilen çevrim 24 Kasım 2021 tarihli Şekil 5.2’da gösterilmiş olan 5339-2021-11-24-OK-L numaralı çevrimdir. Bu çevrim yukarıda bahsedilen kriterlere göre seçilmiştir.. Bu çevrim özellikle

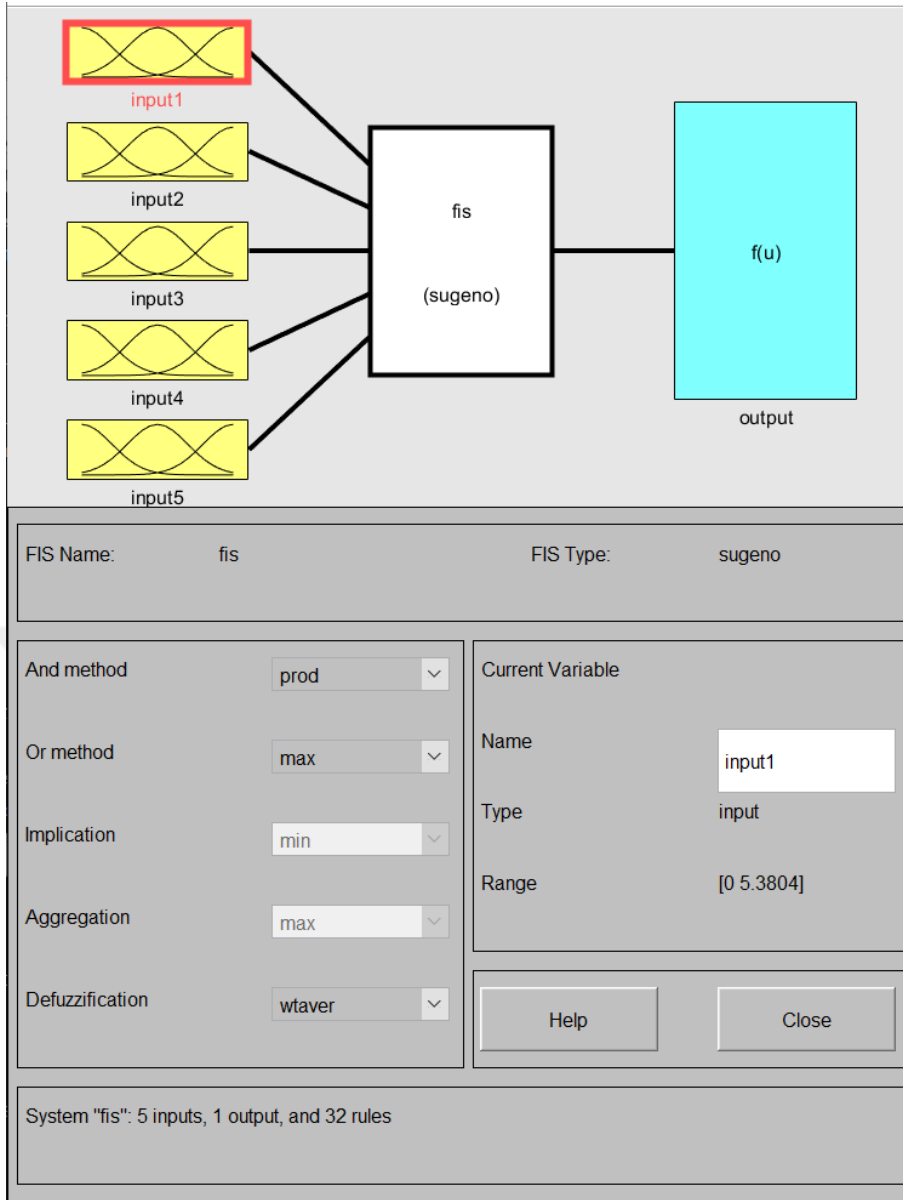
fabrikanın ürettiği dişli kutularından uygun olanların belirlenmesi için test yapılanlar arasından belirlenmiştir. Hem kullanılan malzemelerin çok fazla aşınmamış olduğu hem de hat sonu testinde OK olan bir çevrim olduğundan bu çevrim tercih edilmiştir. Bu çevrimin kuvvet-yol grafiği şekil 5.2’teki gibidir.

Bu çevrime ait Mahalanobis uzaklığı fonksiyonu MATLAB’ın ANFIS aracına bir önceki bölümde belirlenmiş parametreler ile yüklenmiştir.



Şekil 5.3 : Bulanık Kural Kümesi

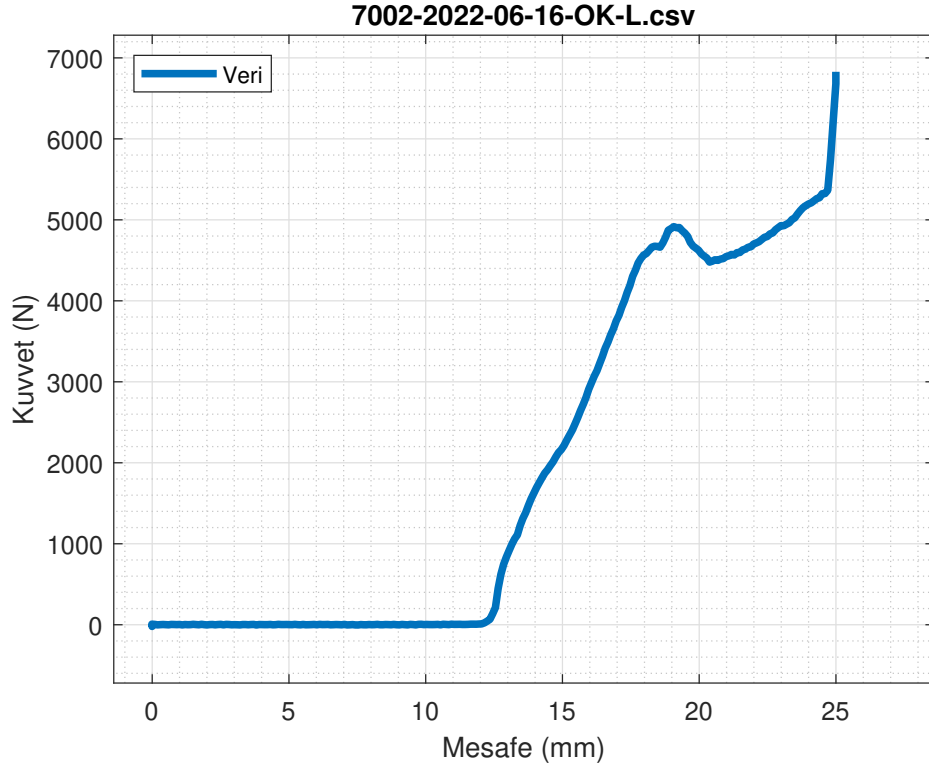
MATLAB’da gerçekleştirilen bulanık modele ait tasarım görseli Şekil 5.4’de verilmektedir. Burada tanımlanmış olan 5 adet giriş görülebilmektedir. Ayrıca Şekil 5.3’de yine MATLAB’da tanımlanan bulanık mantık kural kümesi görseli mevcuttur.



Şekil 5.4 : Bulanık Mantık Yapısı

Bu modellemenin ardından, eğitim çevriminin Mahalanobis uzaklığı fonksiyonu ile hesaplandığında, RMSE değeri, 0,2336 mm olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan ANFIS modeli OK olduğu testler ile bilinen bir çevrimin Mahalanobis uzaklığı fonksiyonu ile yeniden değerlendirilmiştir. Şekil 5.5 ile gösterilen grafikte bu çevrimin davranışı gösterilmiştir.

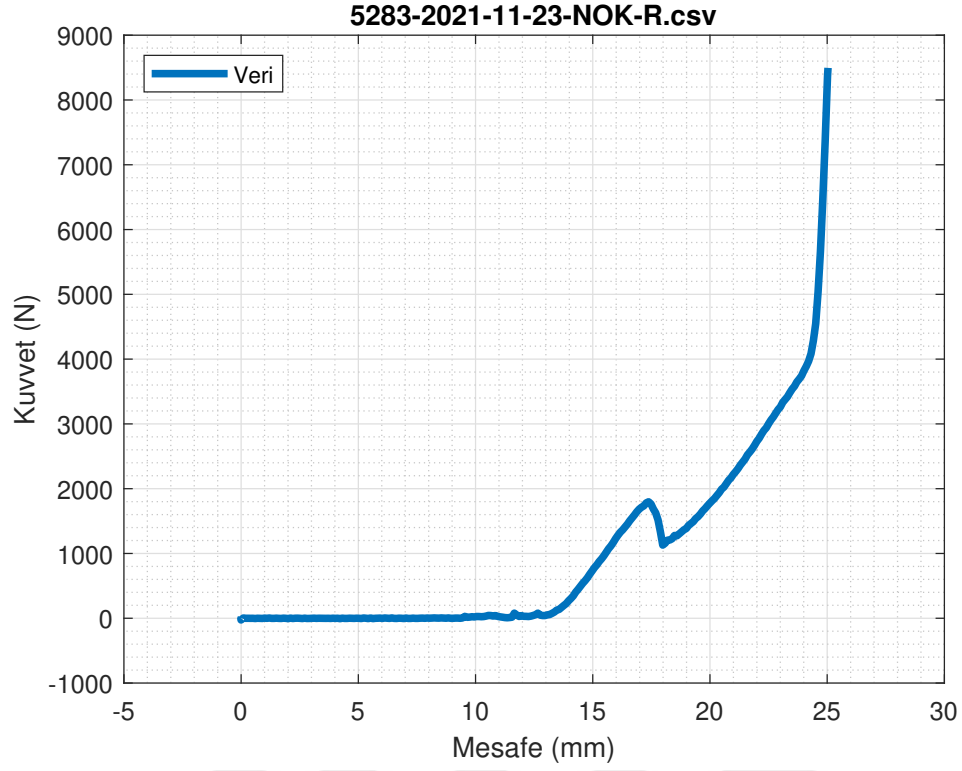


Şekil 5.5 : 7002-2022-06-16-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği

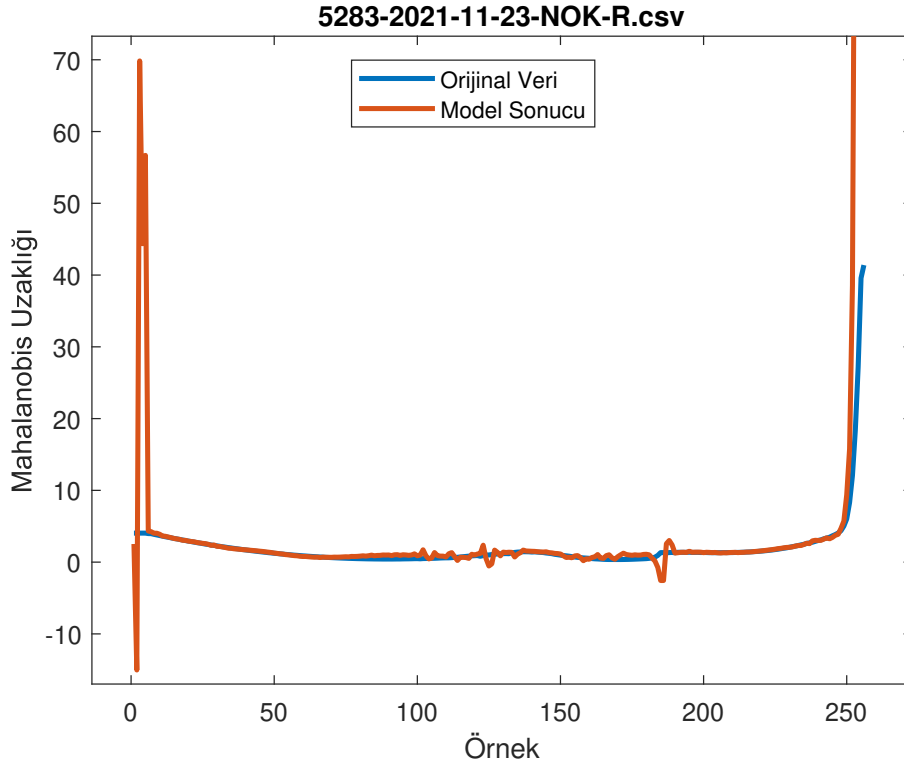
Bu çevrim ile hesaplama gerçekleştirildiğinde, Mahalanobis uzaklığı için RMSE değeri, 1.3047 mm olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.6 ile gösterilen grafikte 5283-2021-11-23-NOK-R isimli çevrimin davranışı gösterilmiştir. Bu çevrime ait Mahalanobis uzaklığı değeri ile model yeniden çalıştırılmıştır. Bu hesaplamanın sonucunda, RMSE değeri, 28.7453 mm olarak hesaplanmıştır. Görülmektedir ki NOK olduğu bilinen bir çevrimde hata çok daha yüksek çıkmıştır.

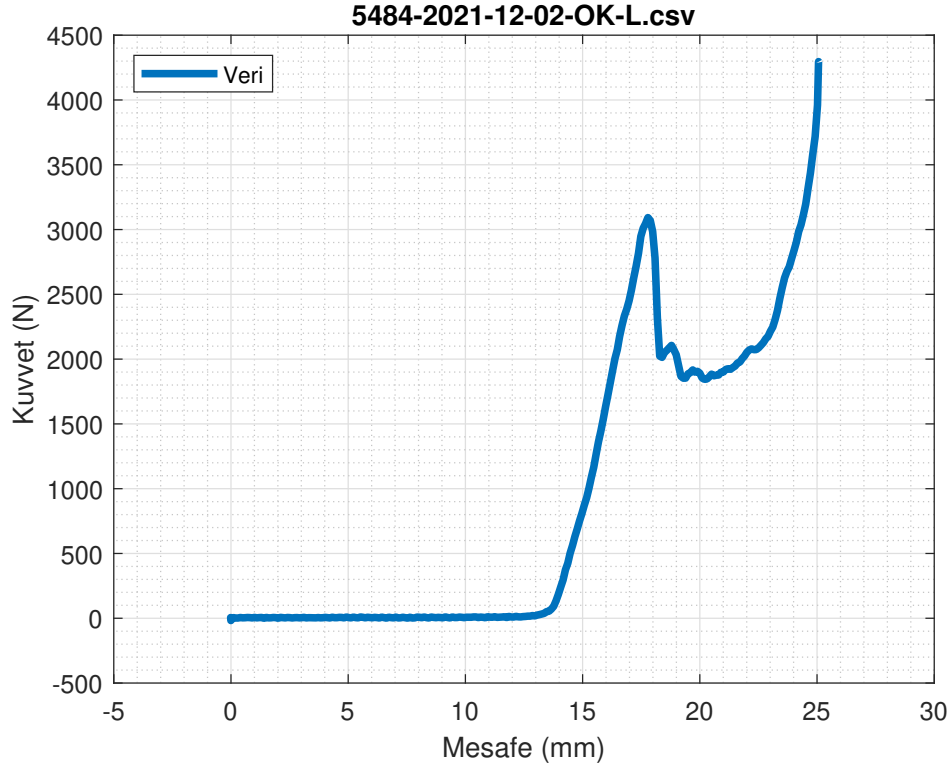
Ek olarak, Şekil 5.7 grafiği incelendiğinde, ilgili 5283 numaralı çevrimin, Mahalanobis uzaklığı ifadesinin referans modele ait Şekil 4.2 ile gösterilen ifadede bariz bir şekilde farklı olduğu da gözlemlenebilmektedir.



Şekil 5.6 : 5283-2021-11-23-NOK-R çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği



Şekil 5.7 : ANFIS modelinin NOK bir çevrim ile çalıştırılması ile elde edilen sonuç



Şekil 5.8 : 5484-2021-12-02-OK-L çevrimi için kuvvet (N)-yol (mm) grafiği

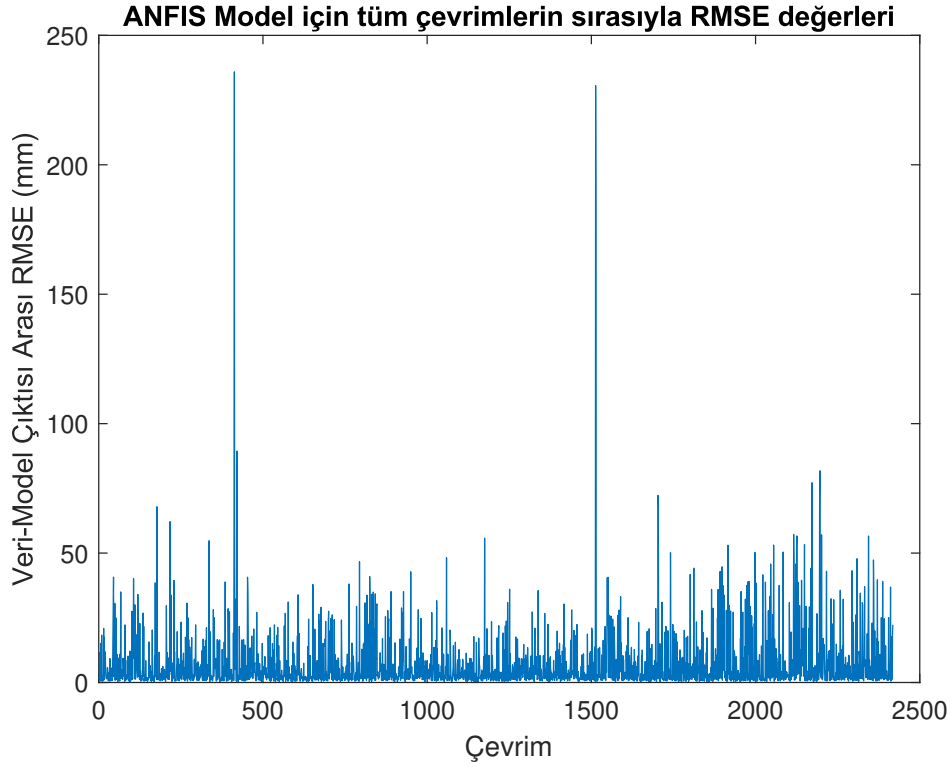
Şekil 5.8 ile gösterilen grafikte ise mevcut sensör sistemi tarafından OK olarak etiketlenen bir çevrim incelenmiştir. Bu çevrimde sistemin olması gereken kuvvetin oldukça altında seyrettiği görülebilmektedir. Bu çevrimin Mahalanobis uzaklığı ifadesi, model ile çalıştırıldığında RMSE değeri, 19.6286 mm olarak hesaplanmıştır. Bu çevrim matematiksel model ile karşılaştırıldığında OK olarak etiketlenmişti.

Bu model ile hatalı çevrimleri etiketlemek için elimizde verileri olan tüm çevrimler ile karşılaştırmak da gereklidir.

5.2.3 Modelin tüm veriler ile karşılaştırılması

Bu bölümde, bir önceki bölümde oluşturulan modelden elde edilen çıktılar, veri tabanında tutulmakta olan diğer verilerle de karşılaştırılmıştır.

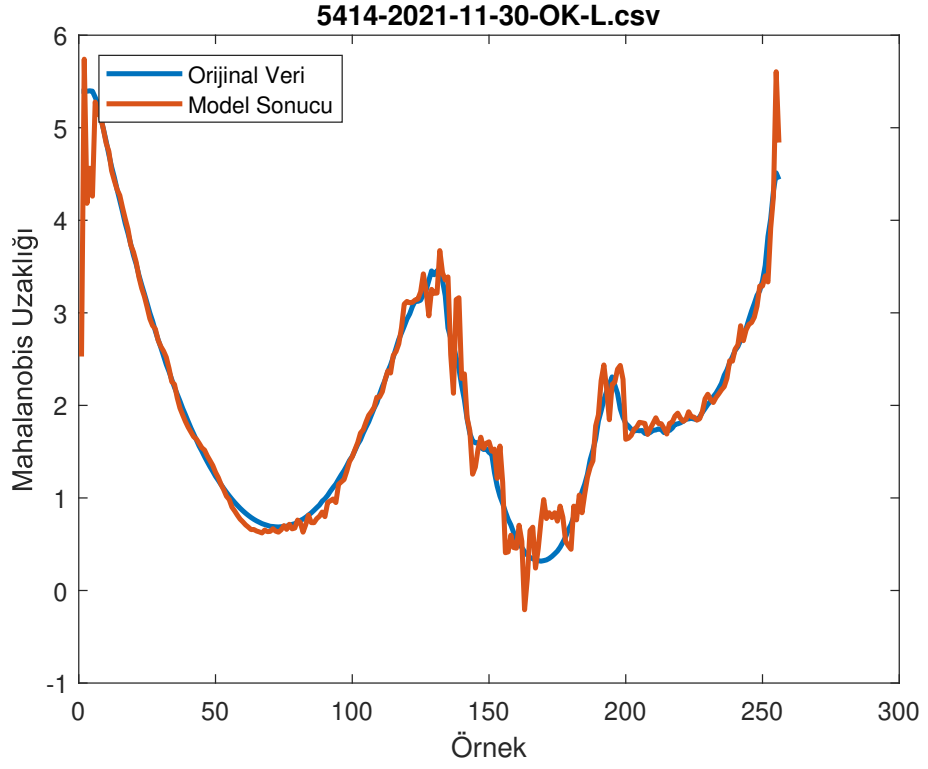
Tüm çevrimlere referans çevrime göre hesaplanan model uygulanmıştır. Tüm çevrimlere ait RMSE değerleri Şekil 5.9'deki olmuştur. Matematiksel model sonucu elde edilen Şekil 3.2 sonucuna göre çok daha düşük hatalar elde edildiği söylenebilir.



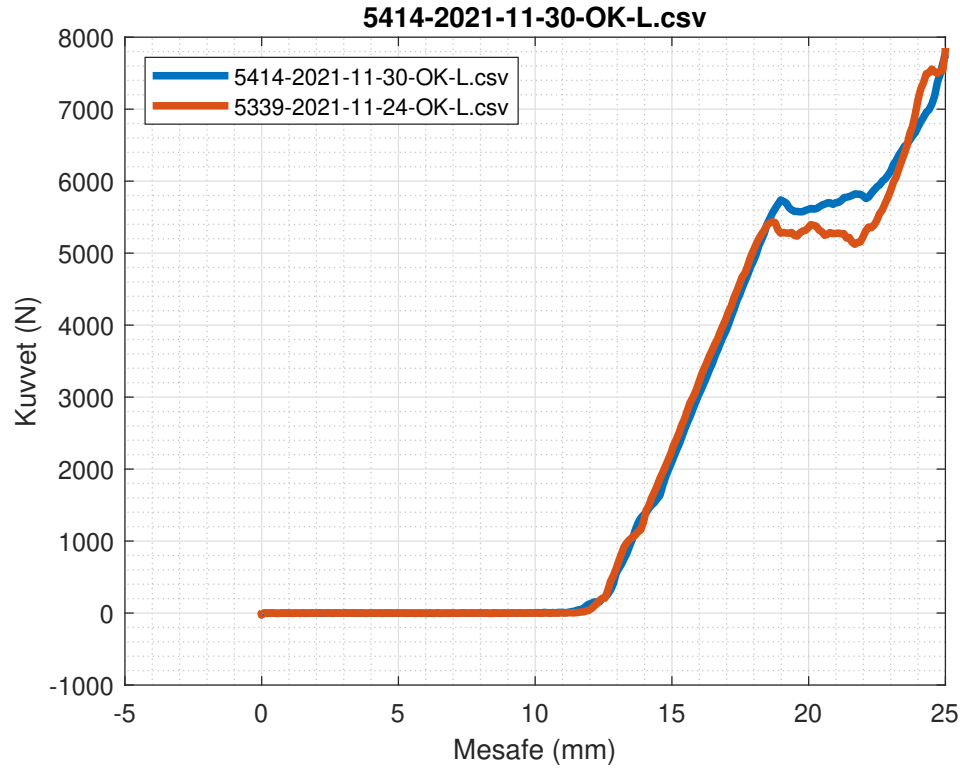
Şekil 5.9 : ANFIS modelinin tüm çevrimler ile çalıştırılması sonucu elde edilen RMSE değerleri

Tüm çevrimler arasından eğitim çevrimi dışında, RMSE değeri en düşük olan çevrim seçilmiştir. Şekil 5.10 ile gösterilen bu grafik incelendiğinde, bu çevrimin Mahalanobis uzaklığı ifadesinin modele verilmesi ile elde edilen RMSE değeri 0,2832 mm olmuştur.

RMSE değeri en düşük olan bu çevrim incelendiğinde ise, referans çevrime çok yakın bir kuvvet-yol grafiğine sahip olduğu söylenebilir. Bu benzerlik Şekil 5.11 grafiği ile görülebilir.

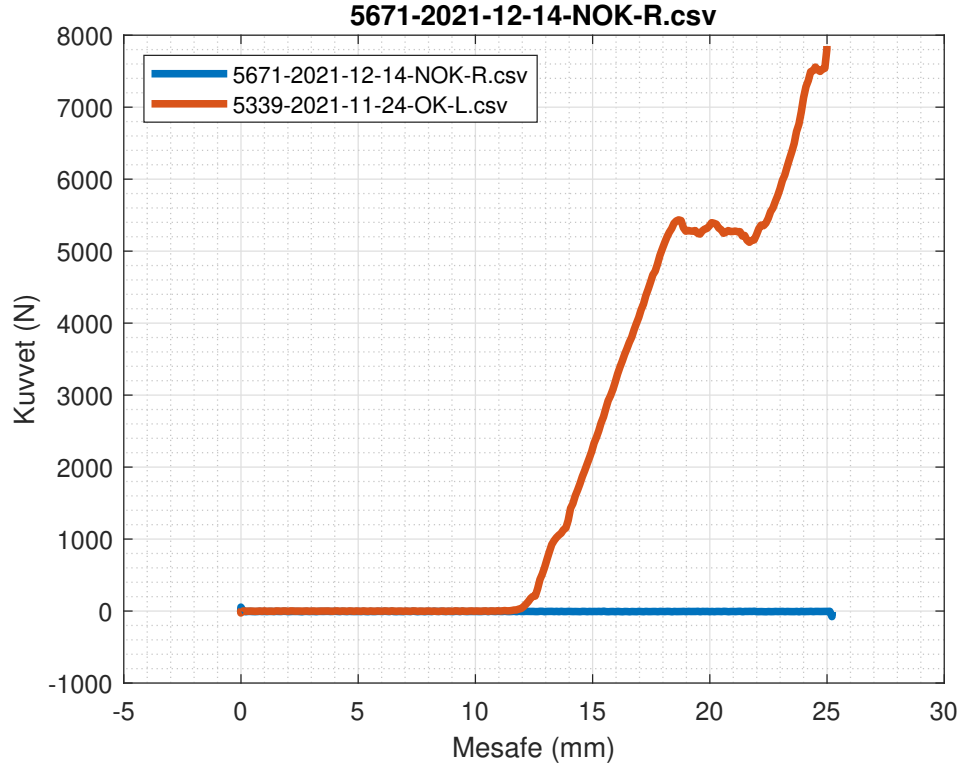


Şekil 5.10 : ANFIS modeli ile en düşük RMSE değeri olan çevrim için Mahalanobis uzaklığı ifadesi



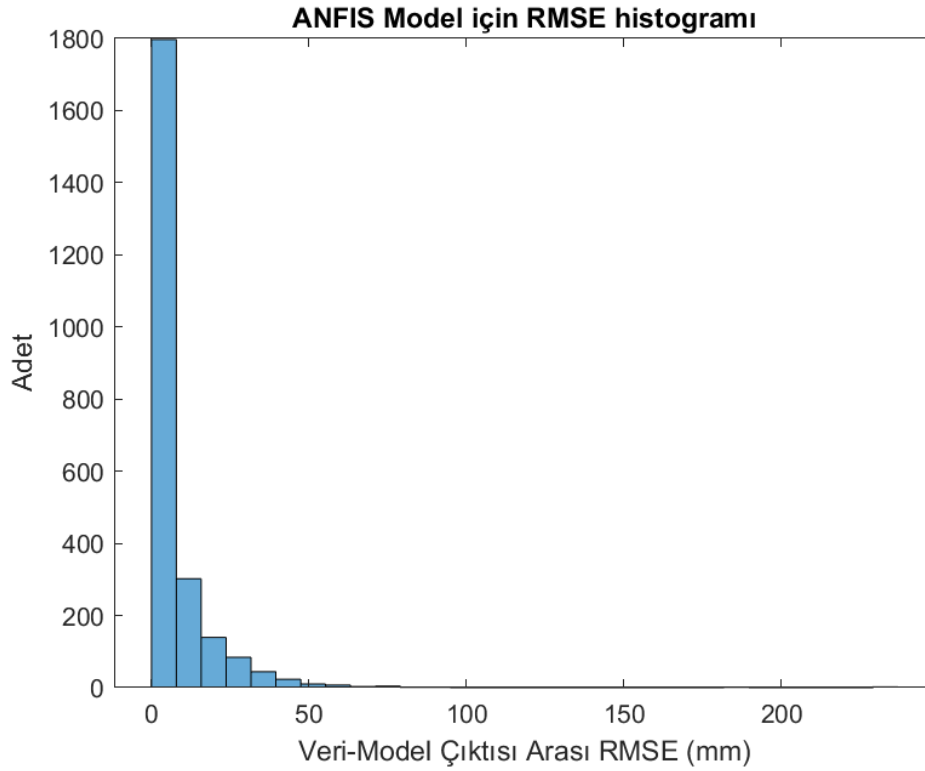
Şekil 5.11 : ANFIS modeli ile düşük RMSE değeri olan çevrim

RMSE değeri en yüksek olan çevrim de incelenmiştir. Bu çevrim RMSE değeri 235.9005 mm olarak hesaplanan, 5671-2021-12-14-NOK-R çevrimidir. Şekil 5.12 ile grafiği verilen çevrim için doğrudan boş bir çevrim olduğu söylenebilir. Pres sistemi hiçbir kuvvet uygulamadan son noktaya kadar gitmiştir. Özellikle RMSE değeri 40 mm değerinden yüksek çıkan çevrimler hızlıca incelendiğinde, her birinin bariz bir şekilde NOK olan, herhangi bir kuvvete uzun süre maruz kalmadığı tespit edilen çevrimler olduğu görülmüştür.



Şekil 5.12 : ANFIS modeli ile en yüksek RMSE değeri olan çevrim

Tüm RMSE değerlerini bir histogram olarak da görmekte fayda vardır. Şekil 5.20 ile paylaşılan grafik üzerinden histogram incelenebilir. Grafiğe hızlı bir bakış atıldığında hata değerlerinin, matematiksel modele göre sıfıra çok daha yakın olduğu görülmektedir. 1797 adet çevrim için, 0, 7.9 mm arası RMSE değeri hesaplanmıştır.



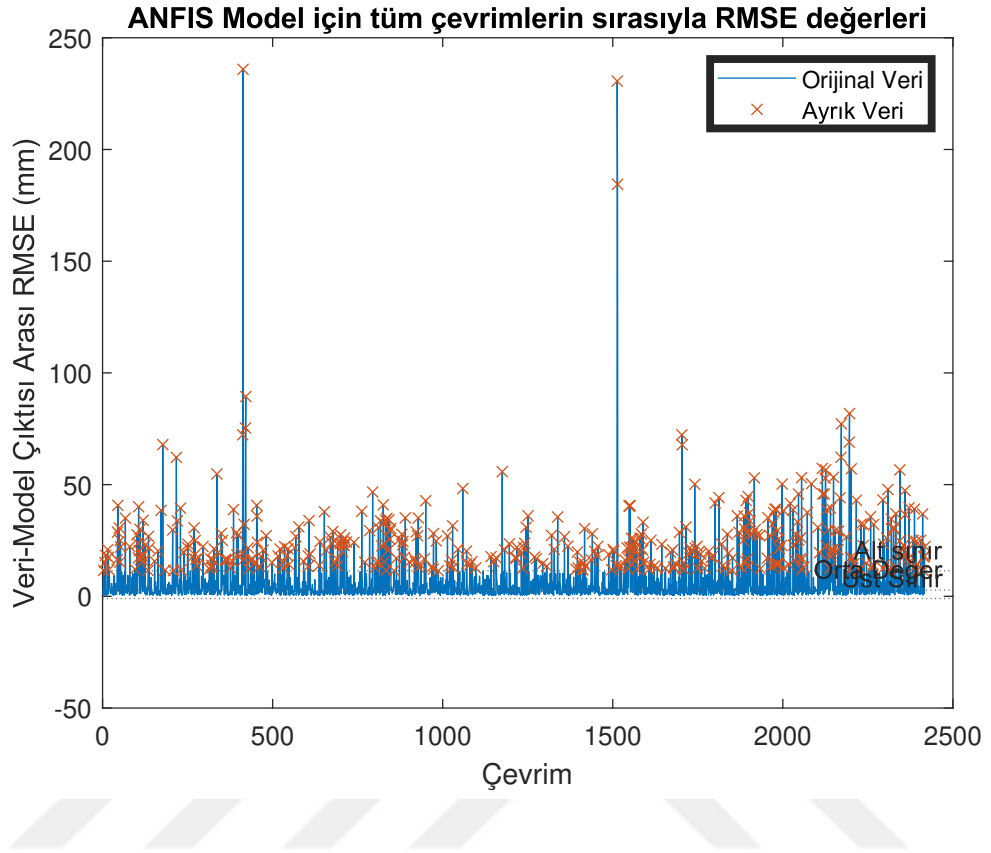
Şekil 5.13 : ANFIS modelinin çevrimlere uygulanması ile oluşan RMSE histogramı

Tüm bunların ardından, hangi hata seviyesindeki çevrimlerin hatalı hangilerinin uygun üretim olduğuna karar vermemiz gerekmektedir. Bu nedenle, RMSE değerinin belirli bir değeri için eşik belirlemek gereklidir. Burada çok farklı yöntemler kullanılabilir. Ampirik bir şekilde, ne kadarlık bir hata seviyesinin kabul edilebilir olduğu konusunda bir değerlendirme yapılabilir. Bu çalışmada medyan mutlak sapma(MAD-Median Absolute Deviation) ile eşik değeri belirlenecektir.

MATLAB'ta yapılan çalışmada, 11.4413 mm RMSE değerinden daha büyük hatalar için o çevrim NOK kabul edilmiştir. Şekil 5.14'de görüldüğü şekilde, 431 adet çevrim, NOK olarak belirlenmiştir. Bu çevrimler, grafikte turuncu x ile etiketlenmiştir. Burada bulunan 431 adet hatalı çevrim, kural bazlı yapının hesaplamış olduğu 171 sayısının oldukça üzerindedir. Bu noktada belirtmek gerekir ki, hata hesaplaması gerçekleştirilirken, ortadaki değerden sapmaya göre aralık belirlenmiştir.

Çizelge 5.1 ile hangi etiketlemelerin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Kural bazlı sistemin NOK olarak etiketlemiş olduğu 171 adet çevrimin 114 adedi NOK olarak kalmaya

devam etmiştir. 57 tanesi ise OK olarak etiketlenmiştir. OK olarak etiketlenmiş çevrimlerin ise 317 adedi NOK olarak değiştirilmiştir.



Şekil 5.14 : ANFIS modeli çalıştırılarak NOK kabul edilen çevrimler

Buna ek olarak, uzman etiketlemesi ile karşılaştırmak da yerinde olacaktır. Bu etiketleme ile yapılan karşılaştırma, Çizelge 5.2 ile paylaşılmıştır. Görülmektedir ki, uzman etiketlemesi ile karşılaştırıldığında çok sayıda NOK görülen parça ANFIS sonrası değişime uğramıştır.

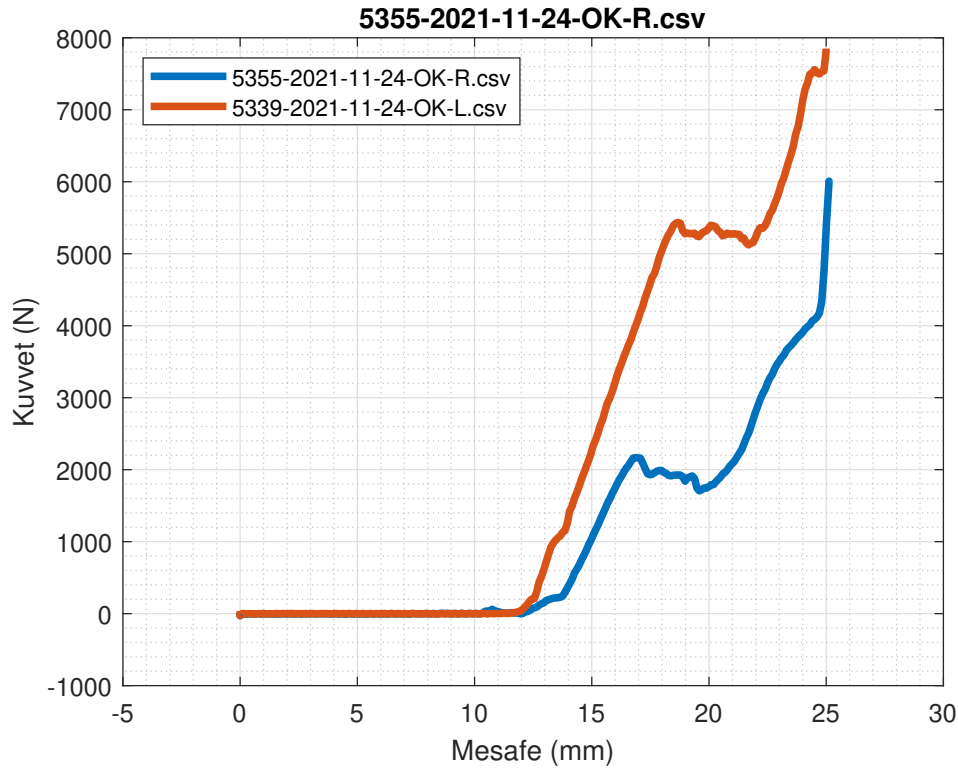
Çizelge 5.1 : ANFIS ile kural bazlı etiketleme karşılaştırılması

Kural Bazlı Durum	ANFIS ile Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	1930
OK	NOK	317
NOK	OK	57
NOK	NOK	114

Kural bazlı yapı tarafından OK olarak etiketlenmiş ancak ANFIS sonrası NOK olarak değiştirilen çevrimlerden bir tanesini inceleyebiliriz.

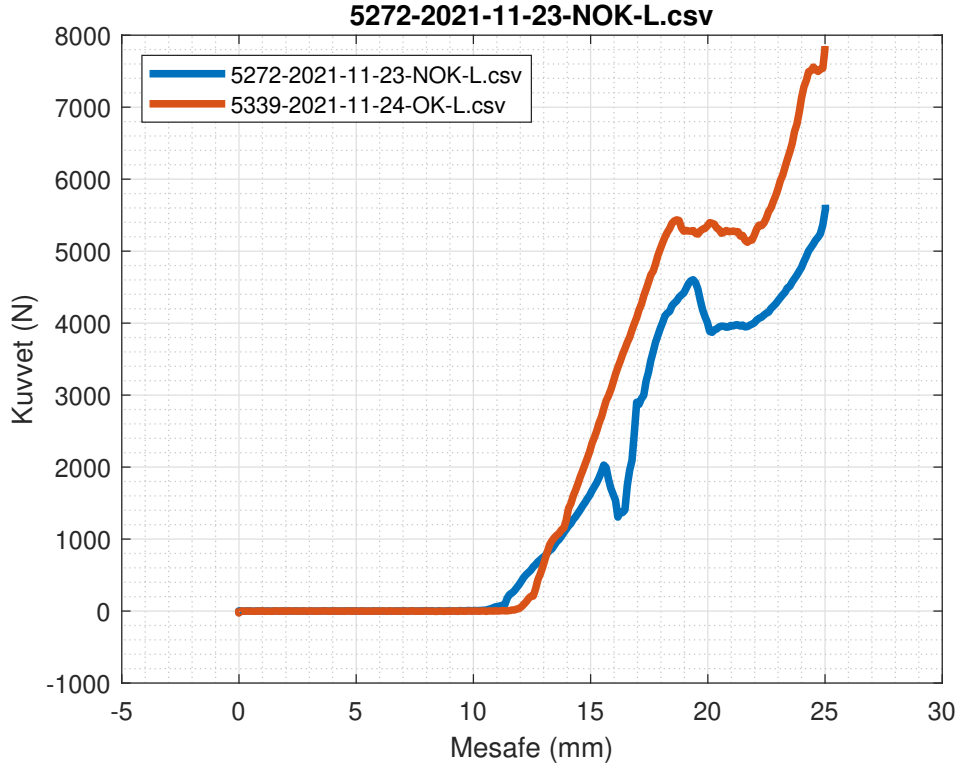
Çizelge 5.2 : ANFIS ile operatör etiketlemesi karşılaştırılması

Operatör Etiketlemesi	ANFIS ile Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	1464
OK	NOK	129
NOK	OK	495
NOK	NOK	296



Şekil 5.15 : ANFIS modeli çalıştırılarak NOK kabul edilen örnek çevrim

Şekil 5.15 grafiği ile gösterilen 5355-2021-11-24-OK-R çevrimi ANFIS modeli ile çalıştırıldığında, 16.4445 mm RMSE değeri vermiştir. Grafik incelendiğinde, OK olarak etiketlenmiş olmasına rağmen, doğrusal davranışı olması gerekenden çok daha düşük tamamladığı görülmektedir.



Şekil 5.16 : ANFIS modeli çalıştırılarak OK kabul edilen örnek çevrim

Şekil 5.16 grafiği ile gösterilen çevrim ise mevcut sistem tarafından NOK olarak etiketlenmiş ancak, ANFIS sonrası sonucu OK olarak değiştirilmiş bir çevrimdir. ANFIS modeli ile çalıştırıldığında RMSE değeri 2.2363 mm olarak hesaplanmıştır.

5.3 Yapay Sinir Ağları Modeli

Bu çalışmada diğer iki yönteme ek olarak aynı sistemin yapay sinir ağları ile modellenmesi incelenmiştir.

5.3.1 Uygun parametrelerin seçimi

Sistemin yapay sinir ağları ile modellemesini gerçekleştirilirken Bölüm 5.2.1’te olduğu şekilde giriş ve çıkış elemanları belirlenmiştir.

Model çıktısı, Mahalanobis uzaklığı ifadesinin belirli bir andaki değeri olacaktır. Yapay sinir ağları modelinin gerçekleştirilmesinde, tıpkı ANFIS modelinde olduğu gibi, girişler, çıkış verisinin gecikmesinden besleniyor olacaktır. Bu gecikme de Şekil 5.1 ile gösterildiği gibi 5 birim önceki gecikme olacaktır.

Gizli katmanda 12 kural belirlenmiştir. Bu sayıya karar verilirken, farklı sayılardaki kural adetleri için de denemeler gerçekleştirilmiştir. 5'ten 20'ye kadar tüm kural adetleri ile deneme yapılmıştır. Yapay sinir ağları modeli için, kural sayısının az olduğu durumlarda, tüm çevrimlerde ortalama bir sonuç elde edilmekte ve parçaların uygunluğu için karşılaştırma yapmak mümkün olmamaktadır. Kural sayısı arttığında ise, diğer çevrimler, öğretim çevriminden çok uzakta sonuç vermektedirler. En iyi sonuç 12 adet kural ile alındığı için seçilmiştir.

Tüm bu kriterler belirlendikten sonra, yazılım araçlarıyla sistemin modellemesi gerçekleştirilebilir.

5.3.2 Sistem modelleme

Yapay sinir ağları ile modelleme gerçekleştirmek için MATLAB yazılımının yapay sinir ağları aracından faydalanılmıştır. Bu araç sayesinde, modelleme parametreleri belirlenerek kolaylıkla model kurulabilir. İçerisindeki algoritmaların başarılı bir şekilde optimize edilmiş olması sebebiyle de çok uzun sürebilecek modelleme süreçleri çok daha kısa sürelerde gerçekleştirilebilir.

ANFIS modellemesi gerçekleştirilirken eğitim çevrimini seçmemize sebep olan etmenlerle aynı etmenlerden dolayı yapay sinir ağları ile sistem modellemek ve karşılaştırmak için 24 Kasım 2021 tarihli 5339 numaralı çevrim seçilmiştir. Hem kullanılan malzemelerin çok fazla aşınmamış olduğu hem de hat sonu testinde OK olan bir çevrim olduğundan bu çevrim tercih edilmiştir.

Model hesaplandıktan farklı bir çevrim ile karşılaştırmak gereklidir. Bu nedenle seçilen çevrim 7002-2022-06-16-OK-L numaralı çevrim olmuştur. Eğitim çevriminden yaklaşık 6 ay sonra gerçekleşen bu çevrim de testlerde OK olarak etiketlenmiş bir çevrimdir.

Çevrimin kuvvet-yol grafiği şekil 5.5'teki gibidir.

Bu çevrimin hesaplanan Mahalanobis uzaklığı ifadesi MATLAB'ın yapay sinir ağları aracına belirlenen parametreler ile yüklenmiştir.

Oluşturulan ANN modeli sonucu, öğretim verisi olan 5339 çevrimi ile hesaplandığında, bu veri için RMSE değeri 0,0497 mm olmuştur. Karşılaştırmak için seçilen

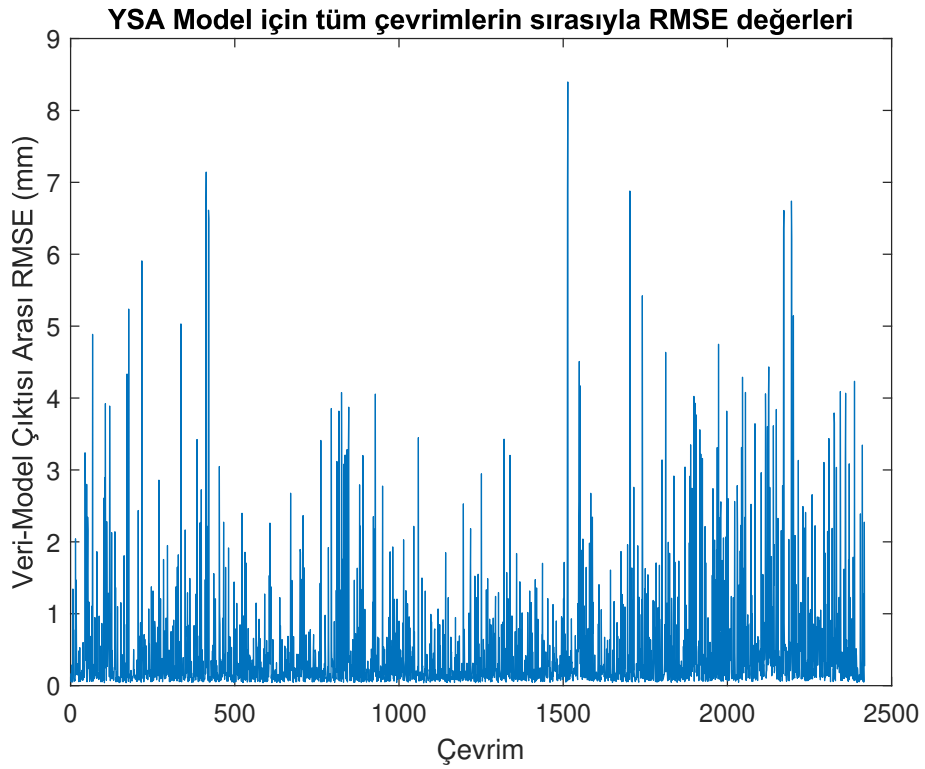
7002-2022-06-16-OK-L çevrimi ile model çalıştırılığında ise RMSE değeri, 0,0981 mm olmuştur. Beklenildiği gibi eğitim çevriminden daha yüksektir. Ancak farklı koşullardaki çevrimler ile de değerlendirmek faydalı olacaktır.

Bu model ile hatalı çevrimleri etiketleyebilmek için elimizde verileri olan tüm çevrimler ile karşılaştırmak da gereklidir.

5.3.3 Modelin tüm veriler ile karşılaştırılması

Bu bölümde, bir önceki bölümde oluşturulan yapay sinir ağları modelinden elde edilen çıktılar, veri tabanında tutulmakta olan diğer verilerle de karşılaştırılmıştır.

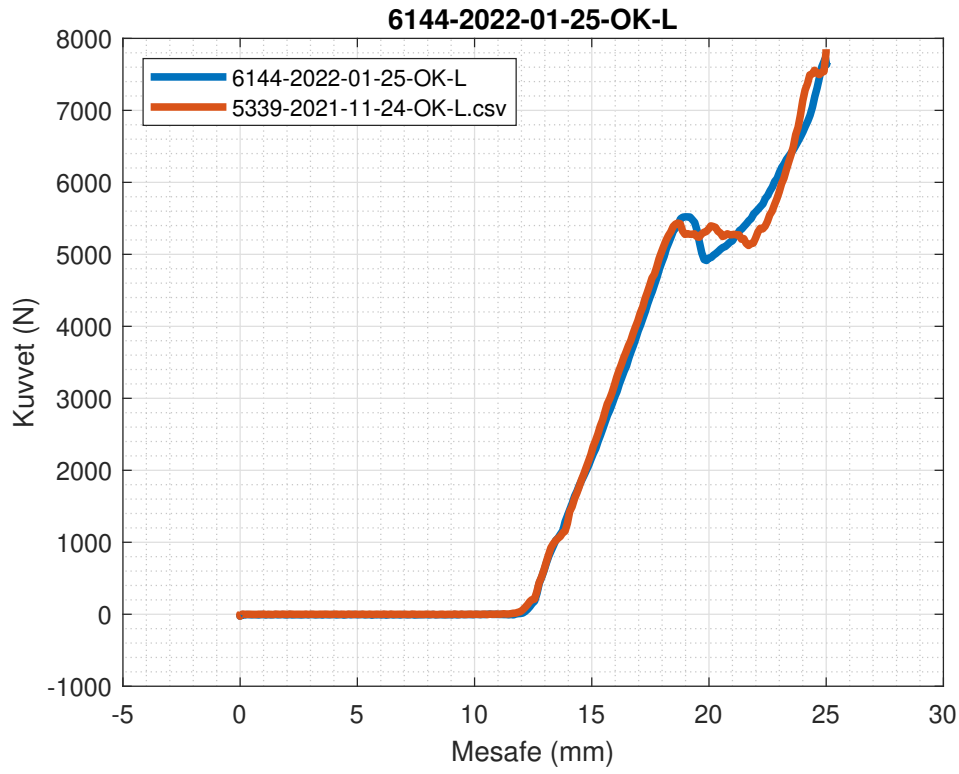
Tüm çevrimlerin Mahalanobis uzaklığı ifadelerine referans çevrimin Mahalanobis uzaklığı ifadesi kullanılarak hesaplanan model uygulanmıştır. Tüm çevrimlere ait RMSE değerleri Şekil 5.17'deki olmuştur.



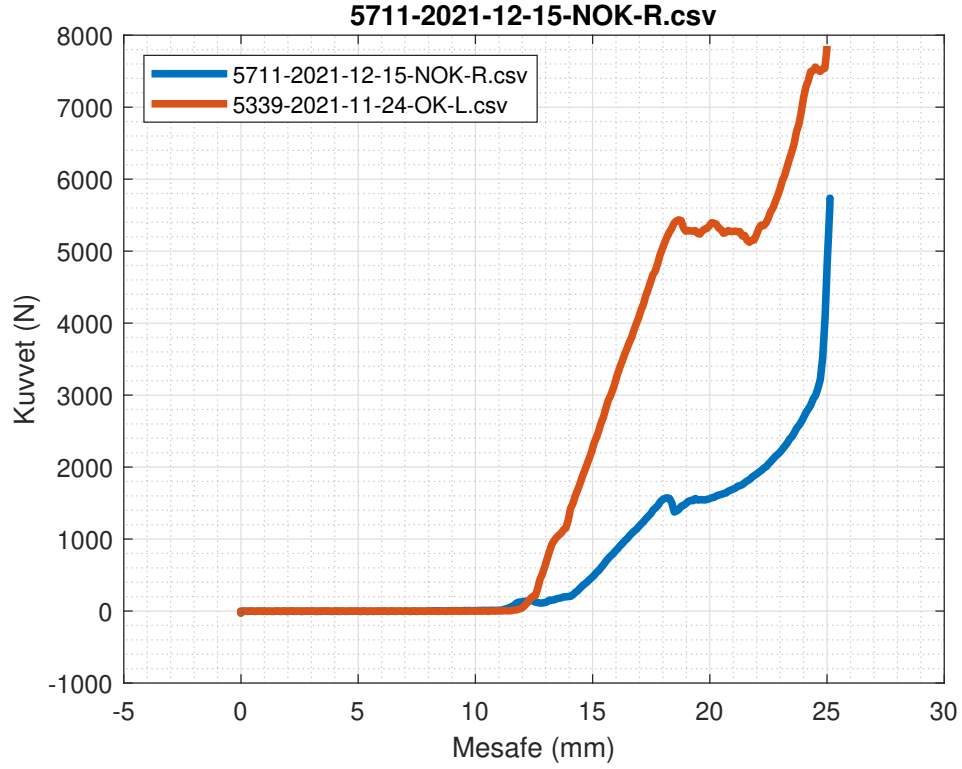
Şekil 5.17 : YSA modeli ile çalıştırılan tüm çevrimlerin RMSE degerleri

En yüksek ve en düşük RMSE değerine sahip çevrimleri de incelemek faydalı olacaktır.

En düşük RMSE değerine sahip çevrim 5.18’de de gösterilmiş olan 6144 numaralı çevrimdir ve RMSE değeri 0,4734 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.18 : YSA modeli ile en düşük RMSE değeri olan çevrim

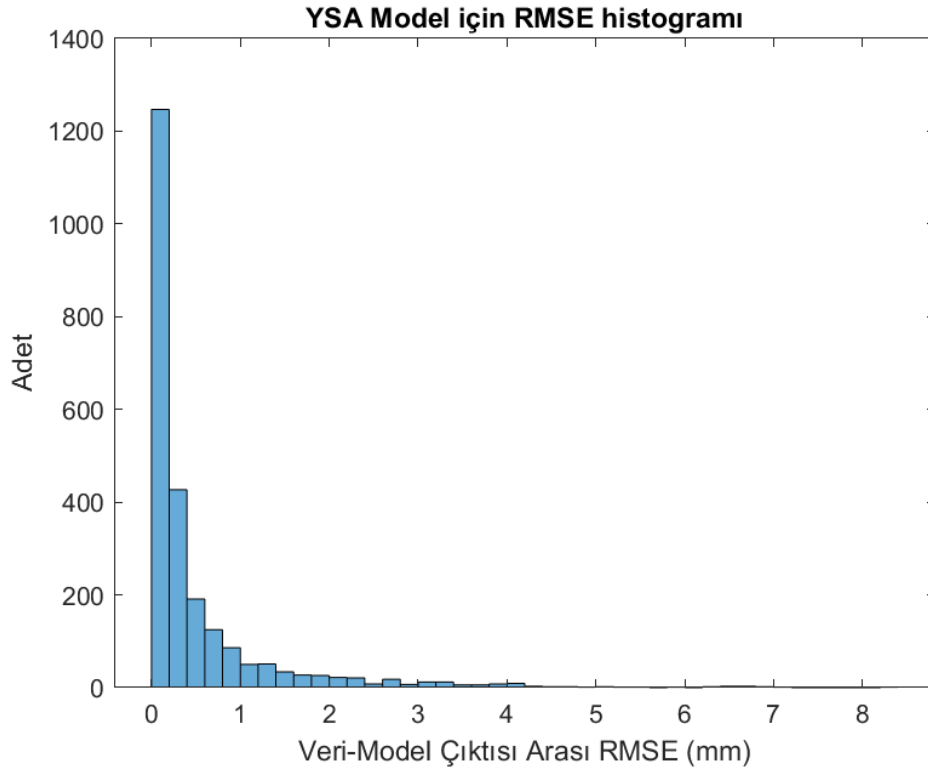


Şekil 5.19 : YSA modeli ile en yüksek RMSE değeri olan çevrim

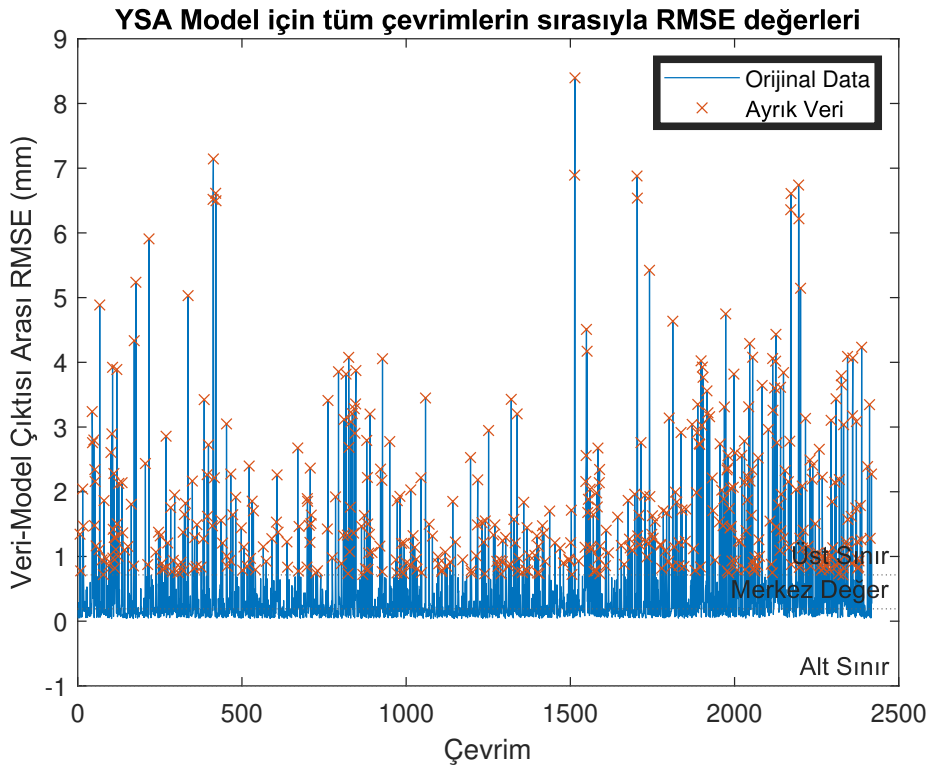
Buna ek olan RMSE değeri en yüksek olan çevrimlerden bir tanesi de incelenmiştir. Şekil 5.19 ile grafiği verilen çevrim için RMSE değeri, 3.17937 mm olarak hesaplanmıştır.

Tüm RMSE değerlerini bir histogram olarak da görmekte fayda vardır. Şekil 5.20 ile paylaşılan grafik üzerinden histogram incelenebilir. Grafiğe hızlı bir bakış atıldığında hata değerlerinin, diğer iki yöntemle göre sıfıra daha yakın olduğu görülmektedir. Ancak burada unutulmamalıdır ki, uygun olan parçaların referans sisteme yakın sonuç elde etmesi beklenerek kural sayısı belirlenmiştir.

Tüm bunların ardından, hangi hata seviyesindeki çevrimlerin hatalı hangilerinin uygun üretim olduğuna karar vermemiz gerekmektedir. Bu nedenle, RMSE değerinin belirli bir değeri için eşik belirlemek gereklidir. Burada çok farklı yöntemler kullanılabilir. Ampirik bir şekilde, ne kadarlık bir hata seviyesinin kabul edilebilir olduğu konusunda bir değerlendirme de yapılabilir. Bu çalışmada medyan mutlak sapma (MAD-Median Absolute Deviation) ile eşik değeri belirlenecektir.



Şekil 5.20 : YSA modeli ile çalıştırılan tüm çevrimlerin RMSE degerleri histogramı



Şekil 5.21 : YSA modelinin tüm çevrimler ile çalıştırılması sonucu elde edilen RMSE degerleri histogramı

MATLAB'ta yapılan hesaplama göre, 0,5809 mm RMSE değerinden daha büyük hata olduğu takdirde o çevrim NOK kabul edilmiştir. Şekil 5.21'de görüldüğü şekilde, 474 adet çevrim, NOK olarak belirlenmiştir. Bu çevrimler, grafikte turuncu x ile etiketlenmiştir. Burada bulunan 473 adet hatalı çevrim, kural bazlı yapının hesaplamış olduğu 171 sayısının oldukça üzerindedir.

Çizelge 5.3 : YSA ile kural bazlı etiketleme karşılaştırılması

Kural Bazlı Durum	YSA ile Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	1905
OK	NOK	342
NOK	OK	40
NOK	NOK	131

Çizelge 5.3 ile hangi etiketlemelerin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Kural bazlı sistemin NOK olarak etiketlemiş olduğu 171 adet çevrimin 131 adedi NOK olarak kalmaya devam etmiştir. 40 tanesi ise OK olarak etiketlenmiştir. OK olarak etiketlenmiş çevrimlerin ise 342 adedi NOK olarak değiştirilmiştir.

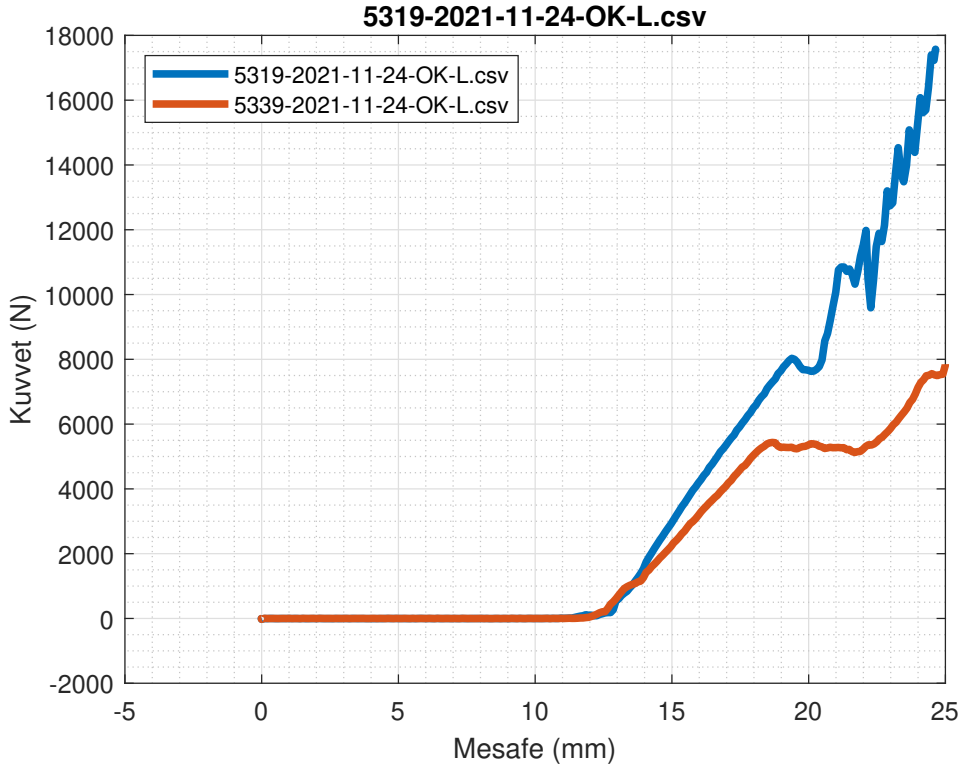
Buna ek olarak, uzman etiketlemesi ile karşılaştırmak da yerinde olacaktır. Bu etiketleme ile yapılan karşılaştırma, Çizelge 5.4 ile paylaşılmıştır. Görülmektedir ki, uzman etiketlemesi ile karşılaştırıldığında çok sayıda NOK görülen parça YSA sonrası değişime uğramıştır.

Çizelge 5.4 : YSA ile operatör etiketlemesi karşılaştırılması

Operatör Etiketlemesi	YSA ile Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	1535
OK	NOK	81
NOK	OK	410
NOK	NOK	392

OK olarak etiketlenmişken, YSA modeli sonrasında NOK olarak değiştirilen çevrimlerden bir tanesini inceleyebiliriz. Şekil 5.22 grafiğinde gösterilen bu çevrimin RMSE değeri 0,6112 mm olarak hesaplanmıştır. Çevrimin belirli bir noktadan sonra plastik bölgeye geçmesi beklendiği için her ilerleme sonrası bir düşüş beklenerek tahmin gerçekleştirilmiştir. Ancak daha önceki bölümlerde bahsedilen belirsizlikten

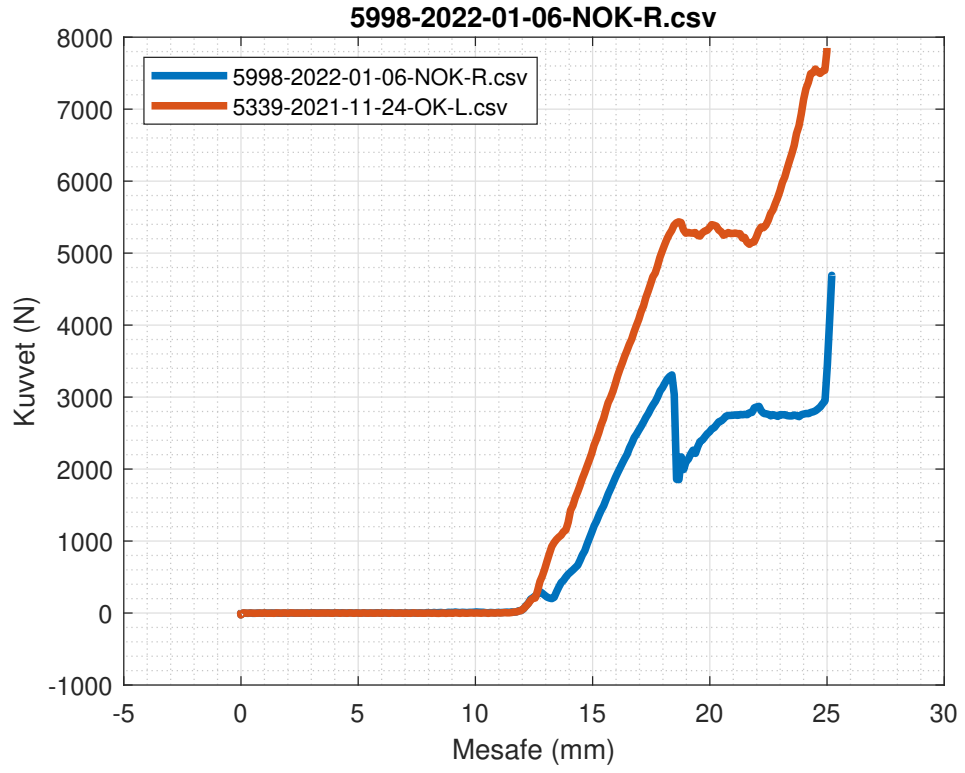
kaynaklandığını düşünebileceğimiz sürekli olarak artan bir kuvvet ve kuvvette olmaması gereken bir dalgalanma gözlemlenmiştir.



Şekil 5.22 : YSA modelinin çalıştırılması ile NOK olarak değiştirilen çevrim

Bir de NOK iken OK olarak değiştirilmiş bir çevrimi inceleyelim. RMSE değeri 0,38221 mm olarak hesaplanan ve grafiği Şekil 5.23’de verilmiş olan çevrim bu şekilde değiştirilmiş bir çevrimdir. Bu çevrimde plastik bölgeye geçişte, kuvvet düşüşü gerçekleşmiş olsa da düşük bir kuvvette olduğu için sistem tarafından NOK olarak etiketlenmiştir. Ancak son noktada istenen kuvvete ulaşabilmiş olması sebebi ile operatör tarafından OK bir parça olarak etiketlenmiş bir çevrimdir.

Tüm bu sonuçlar Bölüm 7’de karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.



Şekil 5.23 : YSA modelinin çalıştırılması ile OK olarak değiştirilen çevrim



6. K-MEANS İLE ÇEVİRİMLERİN SINIFLANDIRILMASI

Bu bölümde diğer yöntemlere ek olarak tüm çevrimler K-Means yöntemi ile sınıflandırılarak, sonuçlar incelenecektir. Öncelikle standartlaştırılan, ardından da Mahalanobis uzaklıkları hesaplanmış çevrimler için kümeleme yapılmıştır. Bu yöntemin tercih edilmesinin sebebi, çevrimlerin zamandan bağımsız, sadece verilerin uyumu ve örüntüsüne bağlı olarak ayrıştırılmak istenmesidir.

Sınıflandırma algoritmaları, denetimli (supervised) ve denetimsiz (unsupervised) öğrenme olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Bunlardan denetimli olanlarda, modele/algoritmaya verilen girdilere etiketleme gerçekleştiği için algoritma dışarıdan daha yönlendirilebilir hale gelmektedir. Öte yandan, denetimsiz algoritmalarda, etiketlenme süreci olmamaktadır. Bu da algoritmanın verilerin çeşitli istatistiklerine bakarak ve dışarıdan daha az müdahale ile kümelemesine katkı sağlamaktadır [40]. K-Means, denetimsiz sınıflandırma algoritmaları arasına girdiği ve ANN ile Anfis gibi zamana bağlı bir geri besleme istemediği için ek bir algoritma olarak bu çalışmada kullanılacaktır.

K-Means kurgulanırken Lloyd algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmanın temel prensibi, tüm uzaydaki üyelerin, uzay içerisinde rastgele seçilen grup merkezlerine en yakın kümelerle dahil edilmesine ve kümelerin ağırlık noktaları değişmeyene kadar iterasyon yapılmasına dayanmaktadır [41] [40]. Bu süreçte atama ve güncelleme aşamaları tekrarlanarak bahsedilen koşullara veya verilen iterasyon limit değerine ulaşıncaya kadar işlemlerini tekrarlar. Denklem 6.1'de yer alan hesaplamalar ile küme sayısının eleman sayısından daha az olduğu koşullar için bahsedilen atamalar ve güncellemeler olurken, birçok uygulamada ise girdi değerleri ile küme ortalamalarına ait farkların normlarının karelerinin yarısı alınarak yeni atamalar gerçekleştirilebilmektedir [42].

$$D(C) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{n} \sum_c \sum_{x \in c} \frac{1}{2} \|v_x - v_c\|^2, \quad v_c \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{n(c)} \sum_{x \in c} v_x \quad (6.1)$$

Yukarıda Formül 6.1 ile verilen ifadede iterasyon limitine ulaşmamış bir algortmada, $D(C)$ değerinin önceden tanımlanan tolerans değerine eşit veya daha düşük bir değere ulaştırılması hedeflenmektedir. Bu denklemi ifade etmek gerekirse; X kümesi her biri bir v_x vektörü tarafından ifade edilen n adet, $x_1, x_2, \dots, x_n$ elemanlarının bir sonlu kümesidir. C ise $c_1, c_2, \dots, c_K$ elemanlarından oluşan, X içerisinde K adet alt kümeyi ifade etmektedir. $n(c)$ ise bir c kümesine dahil edilen elemanların adedini ifade etmektedir. v_c ise her bir c alt kümesinin merkez vektörünün ifadesidir.

Formül 6.1 ile öncelikle v_c ifadesi, bir kümedeki elemanların toplamının eleman sayısına bölünmesi ile hesaplanır. Ardından, her bir c alt kümesi için kümelerdeki elemanların v_c merkez vektörüne uzaklıkları hesaplanır ve tüm eleman adedine bölünür. Algoritmanın hedefi, $D(C)$ ifadesinin beklenen tolerans değerinden küçük olmasıdır.

Çevrimler arasında sadece OK ve NOK sonuçlar bulunmamaktadır. Burada işlem tamamlanamamış ve ayrıştırılması gereken bir kümenin de olması beklenmektedir. Bu sebeple, en uygun küme sayısının ne olması gerektiğine, literatürde de sıklıkla kullanılan dört farklı uygulama ile karar verilecektir. Bu yöntemler en az iki en fazla sekiz küme olması şartıyla hesaplanacak ve sonuçların modu alınarak en çok önerilen küme sayısı k-means modeline verilecektir. Böylece OK, NOK ve özellikle sistemin tamamlamamış NOK örneklerin doğal bir şekilde ayrıştırılması hedeflenmektedir. Küme sayılarına karar verilmesi adına; Davies-Boulding indeksi, Gap Statistic, Silüet ve Dirsek Grafiklerine ait sonuçlar ele alınmıştır.

Davies-Boulding indeksi 1979 yılında tasarlanan, kümeleme algoritmalarında kullanılan ve kümelerin benzerliklerini niteleyen bir metriktir. Bu metrik, tek başına bir kümeleme algoritması olarak kullanılmamaktadır. Ancak, k-means gibi algoritmalarda yardımcı bir rol üstlenmektedir [43]. Bu yöntemde, en düşük indeks değerine karşılık gelen küme sayısının, diğer değerlere göre en uygun olduğuna ulaşılmaktadır.

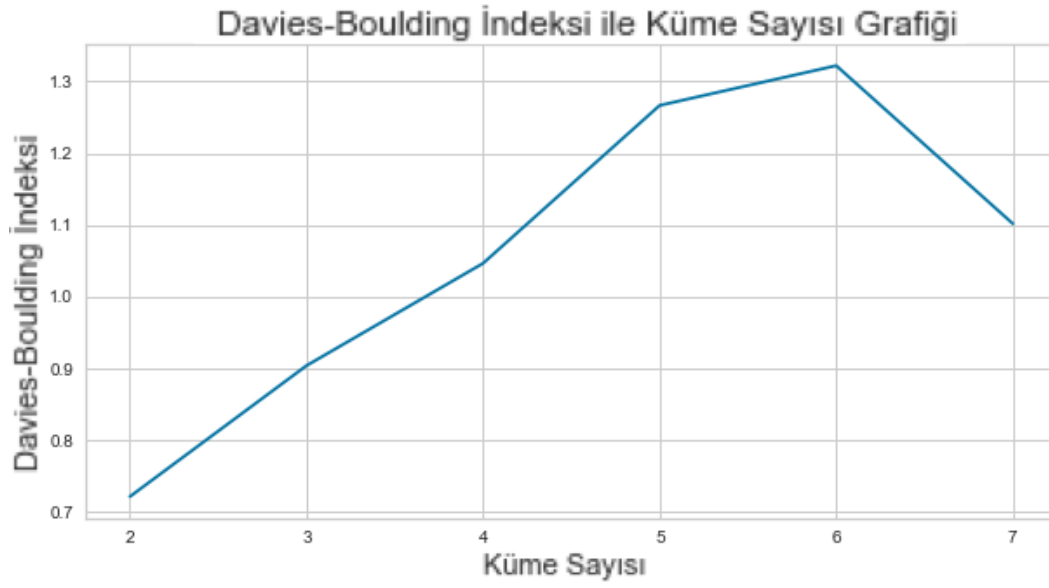
Literatürde ilk olarak Tibshirani ve arkadaşları tarafından 2001 yılında tanımlanan, gap istatistiği yöntemi, basitçe bir uzaydaki tüm elemanların kaç kümeye ayrılabilceğini tanımlayan bir yöntemdir [38].

İlk olarak 1987 yılında Peter Rousseeuw tarafından değerlendirilmiş olan Silüet yöntemi ile verilerin kaç kümeye ayrılması gerektiği incelenebilir. Bu yöntemde, bir uzaydaki elemanların diğer elemanlara ne kadar benzediğine dayalı bir kümeleme yapılmaktadır [44].

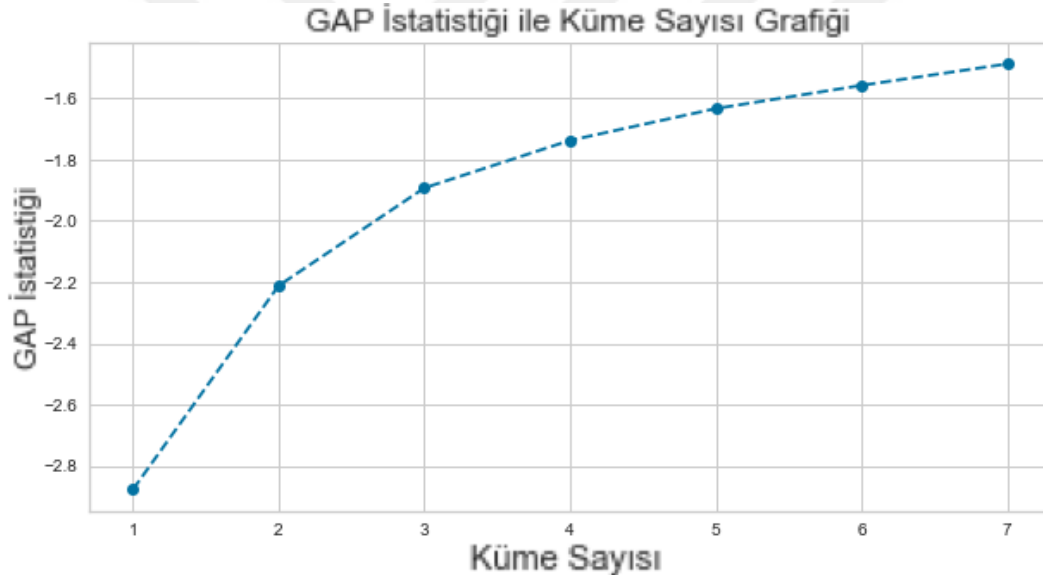
İlk olarak, 1953 yılında Thorndike ve ekibi tarafından kullanılan dirsek yöntemi ise verilerin kaç kümeye ayrılabilceğini gösteren bir diğer yöntemdir. Bu yöntemde, birçok farklı sayıda merkez ile k-means yöntemi uygulanır. Alınan sonuçlardan, tüm kümelerdeki elemanların merkezlerine uzaklıklarının kareleri toplanır. Belirli bir küme sayısına kadar bu uzaklıklar anlamlı şekilde azalırken, belirli bir küme sayısından sonra bu azalış kayda değer seviyelerin altına geçer. Bu da tüm bu uzaklıkların grafiğinde bir dirsek oluşturur. Dirseğin oluşmuş olduğu küme sayısı ideal küme sayısı olarak kabul edilmektedir [45].

Tüm bu yöntemlere ait elde edilen çıktılar, Davies Boulding indeksi, gap istatistiği, silüet yöntemi ve dirsek yöntemi olarak Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 ile gösterilmiştir. Burada yapılan hesaplamalar sonucunda, Dirsek grafiği yöntemi hariç tüm yöntemler, 3 küme olması gerektiğine; dirsek grafiği ise 4 kümenin ideal olacağına işaret etmektedir. Bahsedilen yöntemlerin modu küme sayısını belirleyeceği için, küme sayısı 3 olarak seçilmiştir.

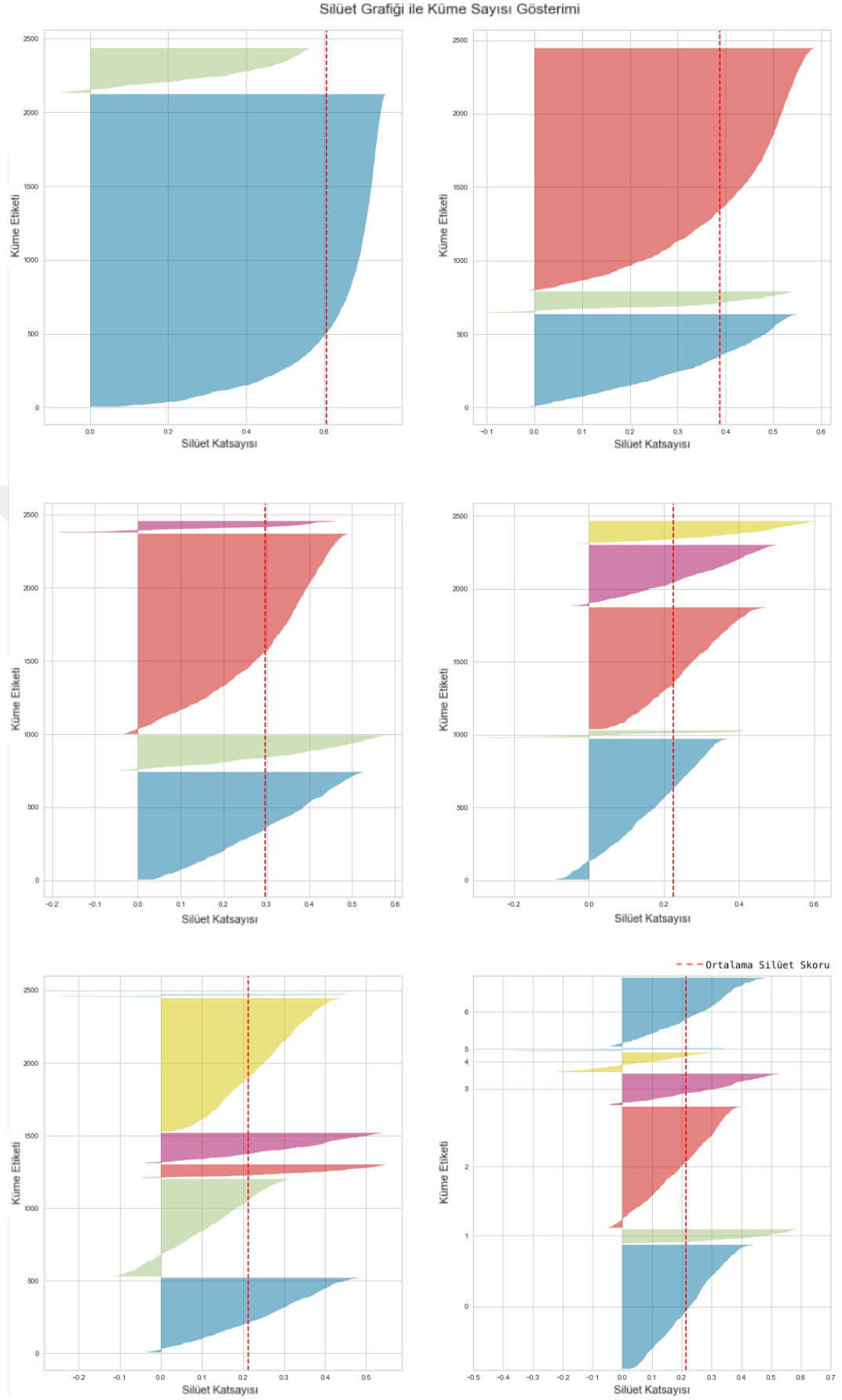
Algoritmada, küme merkezlerinin başlangıç noktası rasgele olarak seçilmiştir. Tüm elemanların küme merkezlerine uzaklıklarının hesaplanıp ideal kümelerin belirlenmesi için, en fazla yapılacak iterasyon değeri 300 adet olarak belirlenmiştir. Hataların tolerans değeri ise 0,0001 olarak seçilmiştir ki hata seviyesi bu değerin altına indirildiğinde hesaplama bitirilecektir [46].



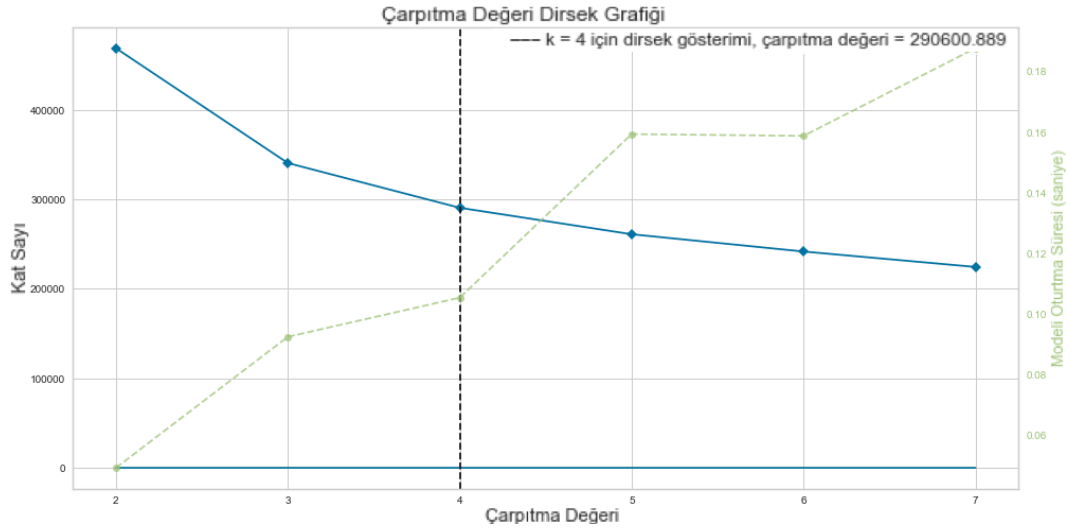
Şekil 6.1 : Davies-Boulding indeksi ile küme sayıları grafiği



Şekil 6.2 : YGap istatistiği ile elde edilen küme sayıları grafiği

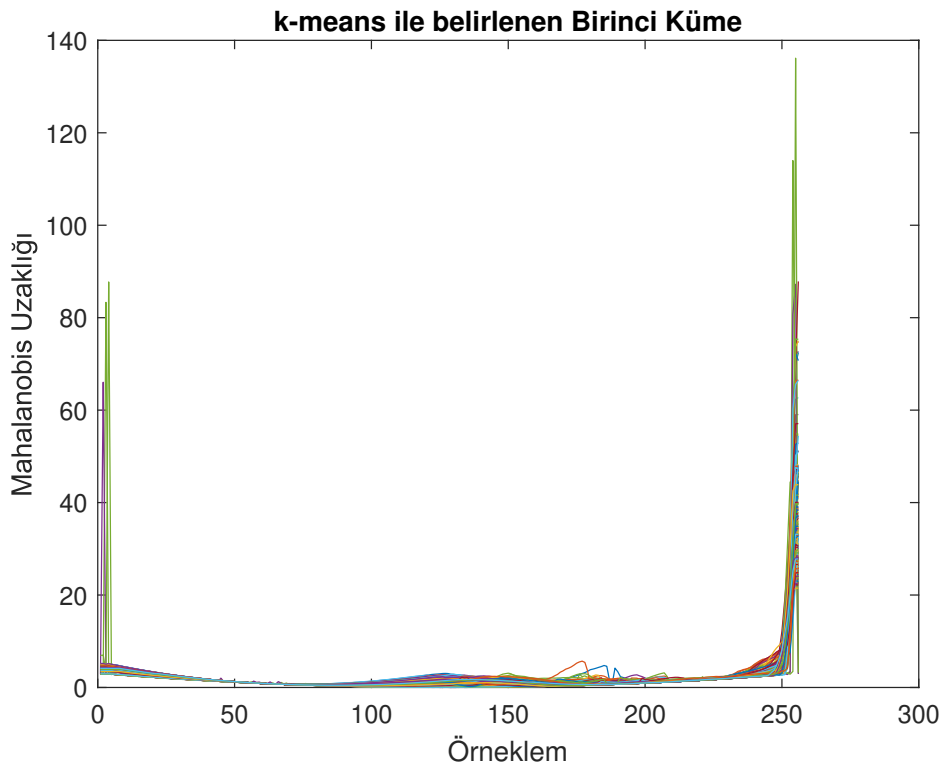


Şekil 6.3 : Silüet yöntemi ile elde edilen küme sayıları gösterimi



Şekil 6.4 : Dirsek yöntemi ile belirlenen küme sayıları

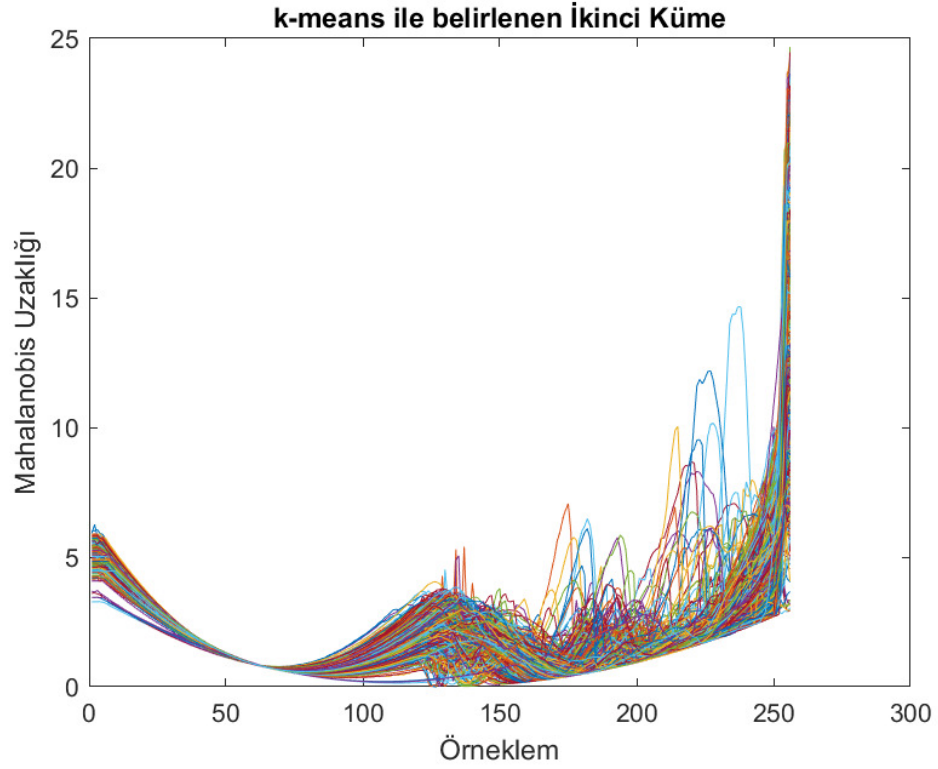
Öncelikle Şekil 6.5 incelendiğinde, buradaki tüm çevrimler için, Mahalanobis uzaklığı ifadesinin sıfır çevresinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5 : K-Means algoritması ile elde edilen 1. küme çıktıları

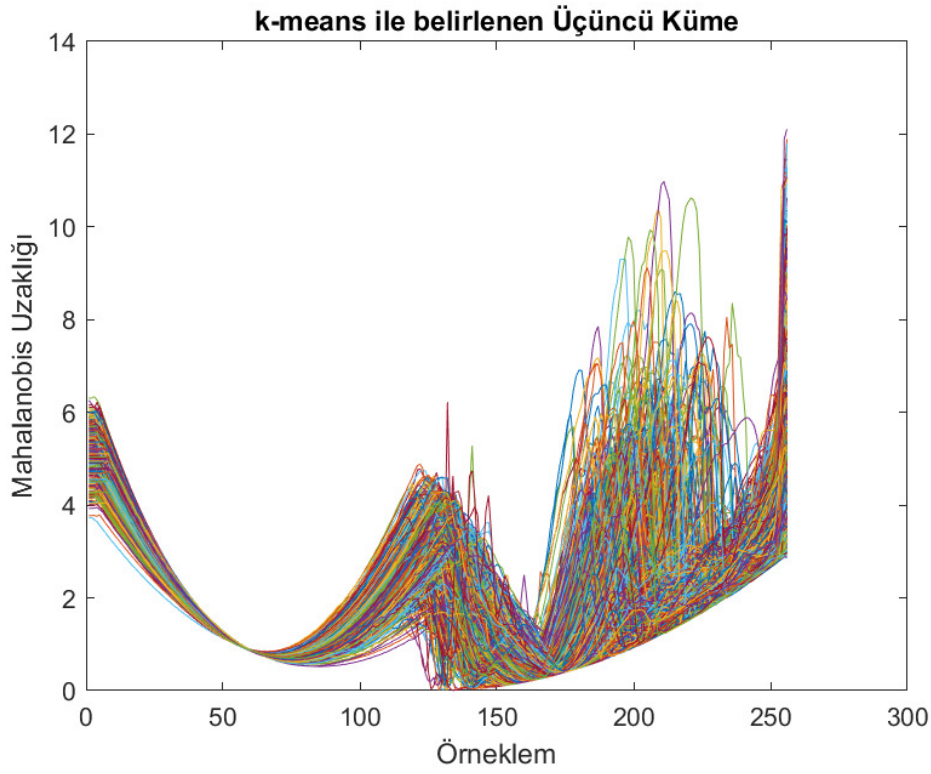
Şekil 6.6 incelendiğinde ise, buradaki tüm çevrimler için, Mahalanobis uzaklığı ifadesinin görece yüksek değerlere çıktığı ve benzer bir yapıyı takip ettikleri

görülmektedir. Bu grafikteki çevrimlere ait kuvvet yol grafikleri incelendiğinde ise, büyük oranda, NOK olduğu düşünülen çevrimlere ait grafikler olduğu görülmektedir.



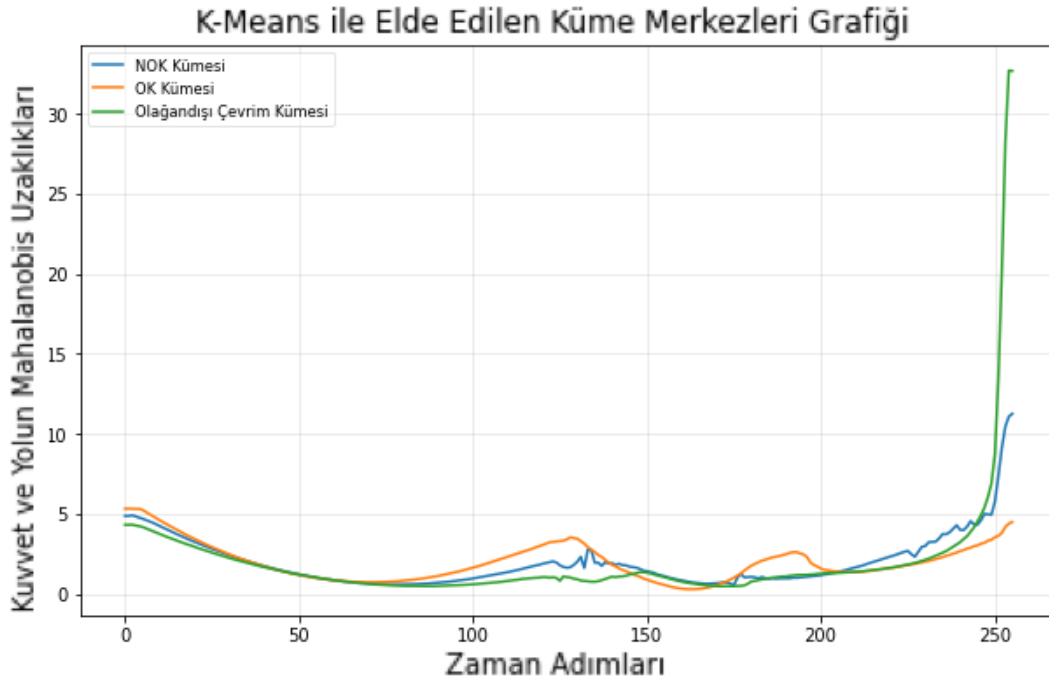
Şekil 6.6 : K-Means algoritması ile elde edilen 2. küme çıktıları

Son olarak ise Şekil 6.7 incelendiğinde ise, en çok elemanın bu kümede olduğu söylenebilir. Diğerlerine göre grafiklerin izledikleri bant diğerlerine göre geniş olsa da benzer bir akışı izledikleri söylenebilir. Bu kümedeki elemanlar arasında bir önceki bölümlerde yapılan çalışmalarda da OK olarak etiketlenen çevrimlerin büyük bir kısmı vardır. Bu çevrimler genel olarak incelendiğinde, bu grubun OK çevrimlere ait olduğu söylenebilir.



Şekil 6.7 : K-Means algoritması ile elde edilen 3. küme çıktıları

Tüm bu kümelerin merkezleri Şekil 6.8 ile gösterildiği gibi olmuştur.



Şekil 6.8 : K-Means algoritması ile elde edilen kümelerin merkezleri

Şekil 6.8 ile gösterilen ve sarı renk ile ifade edilen küme, içerisinde Şekil 2.9'de gösterilmiş referans çevrimi ve Şekil 5.18 ile gösterilmiş referans çevrime çok yakın bir desene sahip olan çevrimlerin olduğu kümedir. Bu kümedeki elemanların çoğunluğunun, diğer tüm yöntemlerle de elde edilen OK etiketlemesini ifade eden çevrimler olduğu için bu küme sonucu OK olan çevrimler olarak etiketlenmişlerdir. Bu kümede 1391 adet eleman vardır. Bunların 1236 adedi, operatör tarafından OK olarak etiketlenen çevrimlerde oluşmakta iken, 155 adedi NOK olarak etiketlenenlerden OK olarak değiştirilenler olmuştur.

Şekil 6.8 ile gösterilen ve mavi renk ile ifade edilen bir diğer küme ise, Şekil 5.15 ile gösterilen 5355-2021-11-24-OK-R çevrimi veya Şekil 5.22 ile gösterilen 5319-2021-11-24-OK-L çevrimi gibi NOK olan çevrimlerin olduğu kümedir. Bu kümedeki elemanlar incelendiğinde, NOK özellikte olan çevrimlerin büyük kısmının bu kümede olduğu gözlemlenmiştir. Bu küme NOK olarak sınıflandırılmıştır. Bu kümede 818 adet çevrim vardır. Bu çevrimlerin 374 adedi operatör tarafından OK olarak etiketlenen çevrimlerdir. Geriye kalan 444 adedi ise NOK olarak etiketlenen çevrimlerdir.

Bu sonuçlar incelendiğinde, küme merkezleri arasında ciddi bir fark olduğu görülebilmektedir. Kümeler incelendiğinde, Şekil 6.8 ile gösterilen grafikte, yeşil ile ifade edilen küme, son elemanlarına kadar ortalamada diğer kümeden daha düşük değerlerdedir. Ancak, daha sonrasında ani bir yükselme görülmektedir. Bu çevrimlerden bir örnek, Şekil 5.6 ile gösterilmiş olan 5283-2021-11-23-NOK-R çevrimidir. Ayrıca, Şekil 5.12 ile gösterilen grafikte olduğu gibi, kuvvet ölçümü yapılmamış çevrimlerin de bu kümeye dahil olduğu gözlemlenmiştir. Bu küme her ne kadar NOK çevrimlerin de dışında kalan, olağandışı çevrimleri işaret eden küme olsa da, bu küme de NOK olarak sınıflandırılmıştır. Bu kümede ise 209 adet çevrim vardır. Bu çevrimlerin sadece 6 adedi operatör etiketlemeleri ile OK olan çevrimlerdir. 203 adedi ise, operatörün NOK olarak tanımladığı çevrimler olmuştur.

Tüm değişimleri bir de tablo olarak özetlemek için Çizelge 6.1 ile gösterilen çizelgede tüm değişimler verilmiştir.

Çizelge 6.1 : k-means ile kural bazlı etiketleme karşılaştırılması

Kural Bazlı Durum	kmeans ile Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	1375
OK	NOK	872
NOK	OK	16
NOK	NOK	155

Çizelge 5.3 ile hangi etiketlemelerin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Kural bazlı sistemin NOK olarak etiketlemiş olduğu 171 adet çevrimin 155 adedi NOK olarak kalmaya devam etmiştir. 16 tanesi ise OK olarak etiketlenmiştir. OK olarak etiketlenmiş çevrimlerin ise 872 adedi NOK olarak değiştirilmiştir.

Buna ek olarak, uzman etiketlemesi ile karşılaştırmak da yerinde olacaktır. Bu etiketleme ile yapılan karşılaştırma, Çizelge 6.2 ile paylaşılmıştır. Görülmektedir ki, uzman etiketlemesi ile karşılaştırıldığında çok sayıda OK görülen parça kmeans sonrası değişime uğramıştır.

Çizelge 6.2 : k-means ile operatör etiketlemesi karşılaştırılması

Operatör Etiketlemesi	kmeans ile Belirlenen Durum	Adet
OK	OK	1236
OK	NOK	380
NOK	OK	155
NOK	NOK	647

Tüm bu sonuçlar Bölüm 7’de karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

7. SONUÇLAR

Elde edilen sonuçlar incelenirken, ilk olarak, matematiksel modelleme ile bir çalışma yapıldığında, her zaman istenen hassasiyette bir sonuç elde edilemeyeceğini belirtmek önemlidir. Bu durumun birçok farklı nedeni bulunmaktadır.

Teoride, üretilen matematiksel modele ait parametrelerin, neredeyse mutlak doğrulukta belirlenmesi beklenmektedir. Ancak pratikte, bu tür bir üretim sistemlerinde belirsizliklerin bulunması kaçınılmazdır. Bu çalışmada, tasarım belirsizlikleri, parça geometrisinin matematiksel model ile tam olarak uyuşmaması, montaj ve yağlama işlemlerinin tahmin edilemez etkileri ise bu belirsizlikleri doğuracağı gibi sonuçların da beklenenden daha uyumsuz olmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, bu çalışmada oluşturulan matematiksel modelde, plastik deformasyonun gerçekleştiği bölge dikkate alınmamıştır. Plastik deformasyon bölgesindeki davranışı belirsizlikler daha karmaşık bir hale getirmekte, bu sebep ile de plastik deformasyon bölgesi için hesaplamaların yapılması, bu üretim süreci için bir sonraki aşamada incelenebilecek bir konu olabilir.

Bu çalışmada kullanılan parçalarda, çevre veya parça sıcaklığının etkisi olmasa da, benzer bir durumda, plastik enjeksiyon sonrası bir parçanın sıcak veya soğuk montajının sonuçları ciddi şekilde etkileyebileceğini belirtmek gerekmektedir. Örneğin, bir parçanın plastik enjeksiyondan çıktıktan sonra sıcak bir şekilde monte edilmesi veya soğuk bir şekilde monte edilmesi, sonuçları dramatik bir şekilde değiştirebilir.

Yukarıda bahsedilen nedenlerle, bu bölümde karşılaştırma yapılırken, sadece ANFIS, YSA ve k-means ile yapılan etiketlemeler karşılaştırılacaktır.

Karşılaştırma yapabilmek için, Bölüm 3.1.5’de kullanılan f skoru yöntemi kullanılacaktır. f skoru hesaplaması gerçekleştirilirken, ANFIS için, Çizelge 5.2, yapay sinir

ağları için, Çizelge 5.4 ve k-means için Çizelge 6.2’de gösterilen değerler, Çizelge 3.7 ile gösterilen formüller ile hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalar sonucunda Çizelge 7.1’de gösterilen tablo oluşturulmuştur. Bu tabloda, tüm etiketlemelerin birbirine göre farklılıkları incelenmiştir.

Çizelge 7.1 : Etiketlemelerin F Skoru Karşılaştırılması

Metrik	ANFIS ile Hesaplanan	YSA ile Hesaplanan	Kmeans ile Hesaplanan
Precision/Keskinlik	0,7279	0,7969	0,7787
Accuracy/Keskinlik	0,9190	0,9499	0,7649
Recall/Geri Kazanma	0,7473	0,7892	0,8886
F-Skoru	0,8243	0,8621	0,8221

F skoru üzerinden değerlendirme gerçekleştirildiğinde, el ile yapılan etiketlemeler ile karşılaştırılan sonuçlardan yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen etiketleme en yüksek sonucu elde etmiştir.

Tüm bu bilgiler ışığında sonuçlar değerlendirilebilir.

8. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Endüstride dijital dönüşümün büyük bir ivme kazanması ile birlikte hem veriye erişim hem de onun kullanımı ve değerlendirilmesi, tüm sektörler için kolaylaşmıştır. Akademik camiada da olduğu gibi birçok alanda veri kullanımı uzun yıllardır bilinmekte ve uygulanmaktaydı. Ancak, endüstride ise veriye erişmenin, erişilse bile onlar ile hesaplama yapılmasının zorluğu sebebi ile 5 yıl öncesine kadar, kayda değer bir uygulama alanı bulunamamıştır. Ulaşılan verilerin akademideki çalışmalarla birleştirilmesi ile birlikte, üretim tesislerinde birçok iyileştirme fırsatı ortaya çıktı.

Bu çalışmada, bir süredir verileri toplanmakta olan bir üretim akışının değerlendirilmektedir. Kural tabanlı bir kalite kontrol sistemi kurulu iken, bu yapı veriye dayalı bir yapı ile güncellenmiştir. Eski sistemde operatörün karar verdiği uygunluklar üzerinden sonuçları değerlendiren bir yapı bulunmaktaydı. Güncel durumda ise referans çevrim üzerinden bir onay yapısı geliştirilerek daha güvenilir bir üretim yapısı sağlanmıştır. Bu yapının bu istasyonda geliştirilmesi ile aynı üretim tesisi içerisindeki farklı istasyonlara da bu onay yapısının entegre edilebilecek olması daha birçok farklı senaryonun da önünü açmış oldu. Ayrıca, yapılan bu çalışma, endüstride dijital dönüşüm ile birlikte veriye olan talebin artışını ve bu alanda geliştirilebilecek senaryoların potansiyelini değerlendirmektedir. Veriye dayalı karar verme ve otomatik doğrulama sistemlerinin üretim süreçlerini daha etkin, verimli ve güvenilir hale getirmesine odaklanılmıştır. Akademik teorilerin ve modellerin gerçek dünya uygulamalarına dönüştürülmesi, bu projenin en önemli yönlerinden biridir.

Tüm bu konuları detaylı bir şekilde değerlendirdiğimizde, genel bir görüş olarak, bir referans çevrim aracılığıyla yapay sinir ağları kullanılarak yapılan modellemelerde, ANFIS ile elde edilen sonuçlara göre daha güvenilir sonuçlara ulaşıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, ortalama RMSE değerinin daha düşük seviyede olması ve bu modelin, net bir şekilde hatalı olan çevrimleri daha belirgin

değerler ile göstermesi nedeniyle ortaya çıkmıştır. Bu belirleyici faktörler sebebiyle, uygulamanın devreye alınmasında yapay sinir ağları modeli ile devam edilmiştir.

Şu anki mevcut durumu dikkate aldığımızda, yapay sinir ağları modeli ile devreye alınan uygulamanın, mevcut kural bazlı yöntemi iyileştirmesi ve uygulamanın genel performansını artırması beklenmektedir. Burada ele alınan üretim akışı, dijital dönüşümün prensiplerini anlatmak amacıyla kurgulanmış bir örnektir. Bu çalışmanın bir parçası olan çevrimler arasındaki farklılıklar, gerçek bir üretim ortamında olması gerekenden çok daha fazla olabilir. Bununla birlikte, bu durum, çalışmanın genel değerini azaltmaz. Aksine, bu durumun, daha yüksek doğrulukla üretim yapan preslerde bu çalışmanın çok daha yüksek bir başarı elde edebileceği anlamına gelebileceği düşünülebilir.

Ek olarak, bu çalışmanın gerçek zamanlı olarak çalışması ve üretim tamamlanıp, söküm operasyonu zora sokulmayacak şekilde operasyonun kesilmesi amaçlanmaktadır. Ancak mevcut sensör sisteminde şu an için gerçek zamanlı bir takip yapısı bulunmamaktadır. Operasyon çok kısa zamanlarda tamamlandığı için, sensör sistemi ile PLC sistemi sadece uygunluk üzerinden haberleşmektedir. PLC sistemleri 100 ms gibi hızlarla haberleşirken, kullanılan sensör sistemi 3 ms’de bir veri üretmektedir. Bu nedenle tamamlanan operasyon sonucu doğrudan bir csv dosyası olarak sunucuya yüklenmektedir. Bu üretim istasyonunda gerçek zamanlı bir uygulama yapmak için ek bir yatırım maliyeti gereksinimi bulunmaktadır.

Bir sonraki aşamada, bu çalışmanın yine MEXT Teknoloji Merkezi içerisinde bulunan, mil-rulman presi için de geliştirilmesi hedeflenmektedir. Böylece, farklı yapılarıdaki benzer üretimlerin ne gibi sonuçlar verebileceği değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, dünya çapında devam eden araştırmalar ve yatırımlar, bu tür uygulamaların gelecekte daha da yaygınlaşacağını ve üretim süreçlerinin daha da iyileştirilebileceğini göstermektedir. Gelişen teknoloji ile kendini yenileyen ve geliştiren endüstriyel çalışmalar, ilerleyen zamanlarda daha sık karşımıza çıkacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Tansan, B., Gökbulut, A., Targotay, C. ve Eren, T.** (2016). Türkiye'nin Küresel Rekabetçiliği İçin Bir Gereklilik Olarak Sanayi 4.0, <https://bit.ly/4ayfjZc>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [2] **Xu, M., David, J. ve Kim, S.** (2018). The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges, *International Journal of Financial Research*, <https://doi.org/10.5430/ijfr.v9n2p90>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [3] **SKFGroup** (2018). *Rolling bearings*, https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802809de/pdf_preview_medium/0901d196802809de_pdf_preview_medium.pdf, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [4] **Hamrock, B.J. ve Anderson, W.J.** (1983). *Rolling-element bearings*, National Aeronautics and Space Administration.
- [5] **Selvage, C.C.** (1979). *Assembly of interference fits by impact and constant force method*.
- [6] **Yang, G.M., Coquille, J.C., Fontaine, J.F. ve Lambertin, M.** (2002). Contact pressure between two rough surfaces of a cylindrical fit, *Journal of Materials Processing Technology*, 123(3), 490–497, [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00139-5](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00139-5), erişim tarihi: 02.01.2024.
- [7] **Seifi, R. ve Abbasi, K.** (2015). Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating, *Engineering Failure Analysis*, 57, 310–322, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.006>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [8] **Teng, X.** (2015). Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating, *Engineering Failure Analysis*, 57, 310–322, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.006>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [9] **Niu, S.** (2016). Numerical simulation of interference assembly of shaft and sleeve, *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*.
- [10] **Wang, X., Lou, Z., Wang, X., Hao, X. ve Wang, Y.** (2018). Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model, *Proceedings of the Institution of Mechanical*

Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, (233(8)), 2834–2846, <https://doi.org/10.1177/0954406218799783>, erişim tarihi: 02.01.2024.

- [11] **Slocum, A.H.** (1992). *Precision Machine Design*, Prentice Hall.
- [12] **Benuzzi, D. ve Donzella, G.** (2004). Prediction of the press-fit curve in the assembly of a railway axle and wheel, *Journal of Mechanical Design*, (218(1)), 51–65, <https://doi.org/10.1243/095440904322804439>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [13] **Wang, X., Lou, Z., Wang, X. ve Xu, C.** (2017). A new analytical method for press-fit curve prediction of interference fitting parts, *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 16–24, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.022>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [14] **You, B., Lou, Z., Luo, Y., Xu, Y. ve Wang, X.** (2015). Prediction of pressing quality for press-fit assembly based on press-fit curve and maximum press-mounting force, *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 1–10, <https://doi.org/10.1155/2015/823019>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [15] **MESS** (2024). *MEXT Teknoloji Merkezi*, <https://www.mext.org.tr/>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [16] **MESS** (2020). *MEXT Teknoloji Merkezine Ait Model Fabrika Görseli*, İzin alınmıştır. Erişim tarihi: 17.07.2023.
- [17] **MESS** (2020). *MEXT Teknoloji Merkezine Ait Model Fabrikada Üretilen Dışlı Kutusu*, İzin alınmıştır. Erişim tarihi: 17.07.2023.
- [18] **MESS** (2020). *MEXT Teknoloji Merkezine Ait Model Fabrikada Üretilen Dışlı Kutusu Teknik Resmi*, İzin alınmıştır. Erişim tarihi: 17.07.2023.
- [19] **Rende, H. ve Güven, F.** (2015). Sıkı geçme bağlantılarında malzemeye bağlı yüzey pürüzlülüğü kayıp katsayısının belirlenmesi, *Mühendis ve Makina*, 56(665), 46–52, http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/a5321f98a2aa150_ek.pdf?dergi=1558, erişim tarihi: 26.12.2023.
- [20] **Kistler Group** (2022). *Press Force Sensor*, https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/000-704e.pdf.
- [21] **Şimşir, O. ve Ergenç, A.F.** (2023). Sıkı geçme operasyonu için ANFIS ve yapay sinir ağları modellemesinin matematiksel model ile karşılaştırılması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK 2023*, <https://tok2023.itu.edu.tr/docs/librariesprovider68/bildiriler/129.pdf>, erişim tarihi: 02.01.2024.

- [22] **Wikiwand** (2024). *Stress (mechanics)*, [https://www.wikiwand.com/en/Stress_\(mechanics\)#Media/File: Different-types-of-mechanical-stress_EN.svg](https://www.wikiwand.com/en/Stress_(mechanics)#Media/File:Different-types-of-mechanical-stress_EN.svg).
- [23] **Iskhakov, I. ve Frolov, I.** (2022). Experimental Verification of Theoretical Stress-Strain Model for Compressed Concrete Considering Post-Peak Stage, *Modeling of Constitutive Laws for Traditional and Innovative Building Materials*, 15(17), 6064, <https://doi.org/10.3390/ma15176064>, erişim tarihi: 10.01.2024.
- [24] **Callister, W.D. ve G., R.D.** (2018). *Materials Science and Engineering*, Wiley, [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwish%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwish%20(z-lib.org).pdf).
- [25] **Thyssenkrupp Materials (UK) LTD**, (2018). *Stainless Steel 1.4301 - 304*, [https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAMXUK/assets.files/material-data-sheets/stainless-steel/stainless-steel-1.4301-304.pdf](https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAMXUK/assets/files/material-data-sheets/stainless-steel/stainless-steel-1.4301-304.pdf).
- [26] **GPI Prototype Man**, (2014). *EOS Aluminium AlSi10Mg*, https://fathommmfg.com/wp-content/uploads/2020/11/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf.
- [27] **NASA**, (1990). *Fastner Design Manual*, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19900009424/downloads/19900009424.pdf>.
- [28] **Jiang, J.F. ve B., B.Y.** (2019). An elastic-plastic analysis of interference fit connect, *Materials Science and Engineering*, 504, 012071, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/504/1/012071>, erişim tarihi: 18.01.2024.
- [29] **Armstrong, J.S. ve Collopy, F.** (1992). Error Measures For Generalizing About Forecasting Methods: Empirical Comparisons, *International Journal of Forecasting*, 8, 69–80, [http://doi.org/10.1016/0169-2070\(92\)90008-W](http://doi.org/10.1016/0169-2070(92)90008-W), erişim tarihi: 02.01.2024.
- [30] **Özbalcı**, (2019). *Adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi ile elektrikli bir aracın batarya şarj durum tahmini*, https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/203894/yokAcikBilim_10313350.pdf, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [31] **Hayslett, H.T.** (1981). *Statistics, Made Simple Books*.
- [32] **Kim, M.G.** (1999). Multivariate outliers and decompositions of Mahalanobis distance, *Communications in Statistics - Theory and*

Methods, 29(7), 1511–1526, <https://doi.org/10.1080/036109200008832559>, erişim tarihi: 02.01.2024.

- [33] **Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. ve Ljung, M.L.** (1941). *Time Series Analysis-Fifth Edition*, Wiley.
- [34] **Ödül, M.N.** (2019). *Bulanık Mantık Yöntemi ve Uygulamaları*, Iksad.
- [35] **Sari, T., Şensoy, S.R., Nurbaki, A.E. ve Ağaç, A.** (1990). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *Bullettin of Mathematical Biology*, 52(1/2), 99–115, <https://www.cs.cmu.edu/~./epxing/Class/10715/reading/McCulloch.and.Pitts.pdf>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [36] **Bilings, S.A.** (2013). *Nonlinear System Identification: NARMAX Methods in the Time, Frequency, and Spatio-Temporal Domains*, Wiley.
- [37] **Jang, J.S.R.** (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665–685, <https://doi.org/10.1109/21.256541>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [38] **Tibshirani, R., Waither, G. ve Hastie, T.** (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 63(2), 167–423, <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00293>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [39] **Al-Hmouz, A., Shen, J. ve Yan, J.** (2011). Modeling and Simulation of an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for Mobile Learning, *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 5(5), 226–237, <https://doi.org/10.1109/TLT.2011.36>, erişim tarihi: 09.03.2024.
- [40] **Forgy, E.** (1965). Cluster Analysis of Multivariate Data: Efficiency versus Interpretability of Classifications, *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 6(3), 768–780, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [41] **Bozkaya, E., Karataş, M. ve Erişkin, L.** (2023). *Chapter 1 - Heterogeneous wireless sensor networks: Deployment strategies and coverage models*, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90527-5.00009-5>.
- [42] **Slonim, N., Aharoni, E. ve Crammer, K.** (2013). Hartigan’s K-Means Versus Lloyd’s K-Means – Is It Time for a Change?, *IJCAI ’13: Proceedings of the Twenty-Third international joint conference on Artificial Intelligence*, <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2540128.2540369>, erişim tarihi: 04.03.2024.
- [43] **Davies, D.L. ve Bouldin, D.W.** (1979). A Cluster Separation Measure, *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, 1(2), 224–227, <https://doi.org/10.1109/tpami.1979.4766909>, erişim tarihi: 02.01.2024.

- [44] **Rousseeuw, P.** (1987). Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65, [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7), erişim tarihi: 02.01.2024.
- [45] **Thorndike, R.L.** (1953). Who Belongs in the Family, *PSYCHOMETRIKA*, 18, 267–276, <https://doi.org/10.1007/BF02289263>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [46] **scikit-learn developers** (2024). *sklearn.cluster.KMeans*, <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html>, erişim tarihi: 09.03.2024.
- [47] **International Organization for Standardization** (2010). ISO 286-2:2010(E) – Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts, **Teknik Rapor**, International Organization for Standardization, <https://www.iso.org/standard/44806.html>.
- [48] **Taha, A.A. ve Hanbury, A.** (2015). Metrics for evaluating 3D medical image segmentation: analysis, selection, and tool, *BMC Med Imaging*, 15–29, <http://doi.org/10.1186/s12880-015-0068-x>, erişim tarihi: 02.01.2024.
- [49] **Ball, P., Huatuco, L.H., Howlett, R.J. ve Setchi, R.** (2019). The nondestructive disassembly method of interference fit of sleeve-base structure in the case of cooling excitation, *Sustainable Design and Manufacturing 2019: Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM 19)*, Springer Singapore, Singapore, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-13-9271-9>, erişim tarihi: 02.01.2024.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Oğuzhan Şimşir

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği
- **Y. Lisans:** -, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Programı.

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2014-2015 Beckhoff Otomasyon Türkiye
- 2015-2016 Altınay Robot Teknolojileri
- 2017-2019 Arçelik AŞ
- 2019'dan itibaren MESS Teknoloji Merkezi MEXT'te Robot Teknolojileri ve Otomasyon Uzmanı

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Şimşir O.,** Ergenç A. F., (2023). Sıkı Geçme Operasyonu için ANFIS ve Yapay Sinir Ağları Modellemesinin Matematiksel Model ile Karşılaştırılması. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK 2023*.