



**OVALAMA İLE VİDA İMALATINDA HATALARIN KUVVETE
ETKİSİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

Burçhan Cuma ARITÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Burçhan Cuma ARITÜRK

24/10/2024

OVALAMA İLE VIDA İMALATINDA HATALARIN KUVVETE ETKİSİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Burçhan Cuma ARITÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Bu tez kapsamında, ovalama ile diş açma işleminde kalıplarda meydana gelen kusurların tribolojik etkenlere bağlı nedenlerini araştırmak ve gerinim sensörü ile elde edilecek verilerle makine öğrenmesi yöntemiyle kusurların işlem sırasında tespit edilmesine yönelik yaklaşım geliştirmek amaçlanmıştır. Ovalama işlemini analiz etmek amacıyla akış gerilimi denklemleri üzerinde sıkıştırma testleri Simufact yazılımı ile yapılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları ile sayısal benzetim yöntemi sonuçları arasında bir karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinde zamanla değişen verileri analiz ederek tahminlerin kesinliğini artırmak için LSTM makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Araştırmada, özellikle kalıp deformasyonları ve bunların kalıp üzerinde olası hatalara neden olan etkileri üzerinde durulmuştur. Kalıp deformasyonundan kaynaklanan bu anomaliler, gerçek ortam testleri ve sayısal benzetim yöntemi analizleri yoluyla karşılaştırılmıştır. Gerçek ortamda oluşturulmuş test düzeneği verileri microstrain değeri olarak zamana göre elde edilmiştir. Sayısal benzetim yöntemi analiz sonuçları ile deneysel veri toplama düzeneğiyle elde edilen veriler karşılaştırılmasında benzer karakteristik değişimler gözlenmiştir. LSTM tabanlı anomali tespiti ile anormal durumda modelin ürettiği kayıp değerleri genellikle 100 civarındadır. Eğitim ve doğrulama için ayrılmış veri setleri üzerinde yapılan testler, modelin kararlı bir şekilde öğrenme gösterdiğini ve doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu : 91904
Anahtar Kelimeler : Ovalama, Soğuk Şekillendirme, Gerinim Ölçer Sensör, Derin Öğrenme, Akıllı Üretim
Sayfa Adedi : 70
Danışman : Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF
ERRORS ON STRENGTH IN SCREW MANUFACTURING USING ROLLING

(M. Sc. Thesis)

Burçhan Cuma ARITÜRK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

Within the scope of this thesis, it is aimed to investigate the causes of the defects occurring in the molds in the thread rolling process due to tribological factors and to develop an approach to detect the defects during the process by machine learning method with the data to be obtained with the strain sensor. In order to analyze the rolling process, compression tests on flow stress equations were performed with Simufact software. A comparison was made between the results of the experimental study and the results of the numerical simulation method. The LSTM machine learning algorithm was used to improve the accuracy of predictions by analyzing time-varying data in the production process. In the research, particular emphasis was placed on mold deformations and their effects on the mold causing possible defects. These anomalies caused by mold deformation are compared through real-world testing and numerical simulation method analysis. The data of the test setup in real environment were obtained as microstrain values with respect to time. When comparing the results of the numerical simulation method analysis with the data obtained with the experimental data collection setup, similar characteristic changes were observed. With LSTM-based anomaly detection, the loss values produced by the model in abnormal conditions are generally around 100. Tests performed on data sets separated for training and validation show that the model shows stable learning and high accuracy.

Science Code : 91904

Key Words : Thread Rolling, Cold Forming, Strain Gauge Sensor, Deep Learning,
Smart Manufacturing

Page Number : 70

Supervisor : Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

TEŞEKKÜR

Tezimi tamamlarken danışmanım Prof. Dr. Rahmi ÜNAL'a yaptığı değerli rehberlik ve bilgi paylaşımı için minnettarım. Ayrıca, tez sürecimde bana rehberlik eden bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. İlhan AYDIN'a, Prof. Dr. Erhan AKIN'a diğer akademisyenlerime, öğretim üyelerime ve meslektaşlarıma teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. OVALAMA İLE DİŞ AÇMA.....	5
2.1. Ovalama	5
2.2. Ovalama İşleminde Malzeme Davranışı	8
2.3. Ovalama İşleminde Şekillendirme Kuvvetleri	12
2.3.1. Ovalama işleminde sürtünme ve yağlamanın etkisi.....	14
2.4. Hata Tespiti ve Analiz Yaklaşımları	19
2.4.1. Ovalama işleminde hatalı üretim sebepleri	20
2.4.2. Vida üretiminde hatalı ürünlerin tespit yöntemleri	22
2.5. Makine Öğrenmesi	27
2.5.1. Makine öğrenmesi yöntemleri.....	28
3. MALZEME VE YÖNTEM	33
3.1. Simufact ile Ovalama İşleminin Modellenmesi ve Analizi	33
3.2. Gerinim ölçer (Strain gauge) ile Kuvvet Sinyallerinin Toplanması	36
3.3. Veri Toplama Sistemi Donanım Özellikleri (IoT)	39

	Sayfa
3.4. Veri Toplama Mimarisi	42
3.5. Veri Toplama Cihazı	44
3.6. Veri Toplama Sistemi Uygulama Özellikleri	45
3.7. LSTM Tabanlı Kodlayıcı-Kod Çözücü Yaklaşımı ile Ovalama Makinesi Anomali Tespiti	46
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	49
4.1. Sayısal Benzetim ile Gerinim Değişimi	49
4.2. LSTM ile Veri Setinin Öğretilmesi ve Anomali Tespiti	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
5.1. Sonuçlar	63
5.2. Öneriler	64
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Veriye dayalı analiz yöntemleri	29
Çizelge 3.1. K340 çeliği fiziksel özellikleri.....	34
Çizelge 3.2. Simufact Forming 2023.2 Programı ile Sayısal Benzetim Yöntemi Analiz Parametreleri	35
Çizelge 3.3. Gerinim ölçer (Strain gauge) sensör test parametreleri	38
Çizelge 3.4. Araştırmada kullanılan test donanımına ait teknik bilgiler.....	40

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ovalama işlemi ile iki düz kalıp ile diş açmanın şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. Ovalama-soğuk şekillendirme (a) ve talaşlı imalat-kesme (b) ile oluşturulan dişlerin mikro yapısı ve dokusu.....	7
Şekil 2.3. Ovalama ile oluşturulan vida dişinin metalografik görüntüsü (a), bakalite gömülmüş vida numunesi (b), şekillendirilen diş kesiti (c)	7
Şekil 2.4. Ovalama-soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat-kesme ile oluşturulan dişlerin vickers mikrosertliği karşılaştırması	8
Şekil 2.5. Çekme, basma ve kayma gerilimleri, F uygulanan kuvvettir	9
Şekil 2.6. Mühendislik ve gerçek gerilim-gerinim eğrisi	10
Şekil 2.7. Elastik modülü (E): elastik malzemeler için (a), lineer olmayan malzemeler için (b)	11
Şekil 2.8. Ovalama ile diş açma işleminde deformasyon ve akış	12
Şekil 2.9. y ve z yönünde kuvvet-temas boyu değişimi.....	14
Şekil 2.10. Sürtünme faktörünün tork aracılığıyla kalibrasyonu	16
Şekil 2.11. Farklı sürtünme faktörleri altında radyal kuvvet	17
Şekil 2.12. Sürtünme katsayısı ile kayar uzunluğun değişimi	17
Şekil 2.13. Yer değiştirme vektör toplamı haritaları (a), çeşitli yağlama koşulları için gerinimlerin (b) ve gerilmelerin (c) eşdeğerleri.....	19
Şekil 2.14. Ovalama işleminde eksenel kuvvetler	21
Şekil 2.15. Eddy current (girdap akımları) ile iç yapı kusurlarının tespiti	23
Şekil 2.16. Kuvvet ölçüm sensörü ve kalıplara kurulumu	25
Şekil 2.17. Deneysel ve sayısal benzetim yöntemi ile ölçülen kuvvet değişimi.....	26
Şekil 2.18. Piezoelektrik sensör deneyi için sinyal modelleri	27
Şekil 2.19. Makine Öğrenmesi Döngüsü	28
Şekil 2.20. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) Sinir Ağı	30

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Sayısal benzetim yöntemi modeli	35
Şekil 3.2. Gerinim ölçerin karakteristik tasarımı	36
Şekil 3.3. Gerinim ölçer ile ölçüm sisteminin şeması.....	37
Şekil 3.4. Gerinim ölçer (strain gauge)'in veri toplama cihazına bağlantı şeması	44
Şekil 3.5. LSTM otomatik kodlayıcı ile zaman serisi modelleme.....	47
Şekil 3.6. Ovalama makinesi anomali tespiti için önerilen yaklaşım	48
Şekil 4.1. Simufact sayısal benzetim yöntemi ile giriş-orta ve çıkış bölgesinden gerinim ölçümü şeması.....	50
Şekil 4.2. Farklı mesh değerlerinde 3 bölgede oluşan gerinim değişimi	51
Şekil 4.3. Farklı mesh değerlerinde 3 noktada oluşan en yüksek gerinimler	51
Şekil 4.4. Simufact sayısal benzetim: kalıp giriş kısmındaki gerinme görüntüsü	52
Şekil 4.5. Simufact sayısal benzetim: kalıp orta kısmındaki gerinme görüntüsü	52
Şekil 4.6. Simufact sayısal benzetim: kalıp son kısmındaki gerinme görüntüsü.....	53
Şekil 4.7. Sağlam kalıp için Simufact kuvvet değişimi kuvvet-zaman.....	54
Şekil 4.8. Deforme kalıp için Simufact kuvvet değişimi kuvvet-zaman	54
Şekil 4.9. Gerinim ölçer sensör ile ovalama işlemi esnasında kalıpta oluşan okunan gerinim değişimi.....	55
Şekil 4.10. Normal durum için kullanılan zaman serisi.....	56
Şekil 4.11. Orijinal bir giriş örneği ile hareketli ortalama ile örneklenmiş veri	56
Şekil 4.12. Modelin eğitim ve doğrulama kaybı.....	57
Şekil 4.13. Eğitim ve doğrulama için kayıp değerlerinin histogramı	58
Şekil 4.14. Deforme arızası için bir zaman serisi örneği	58
Şekil 4.15. Deforme arızası için modelin ürettiği kayıp değerlerinin histogramı.....	59
Şekil 4.16. Sağlam ve anomali durum için gerçek sinyaller ve modelin ürettiği sinyaller.....	60
Şekil 4.17. Normal ve deforme durumu örnekleri için kayıp değerleri	61

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.18. Sayısal benzetim yöntemi ve sensör ile elde edilen gerinim değişimi 62



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Deforme ve sağlam kalıp.....	21
Resim 2.2. Görüntü işleme ile hatalı ürünlerin tespiti.....	22
Resim 2.3. Eddy current (girdap akımları) ile iç yapı kusurlarının tespiti.....	23
Resim 3.1. Deforme ve sağlam kalıp optik projektör ile görünümü	34
Resim 3.2. Deneyde kullanılan kalıp üzerine yerleştirilmiş gerinim ölçerler	38
Resim 3.3. Veri işleme terminali ile gerinim ölçer (gerinim ölçer)'in kalıp üzerinde yerleşimi	41
Resim 3.4. Beckhoff marka endüstriyel PC ve entegre edilebilir sinyal giriş-çıkış modülleri	41
Resim 3.5. TwinCAT fonksiyon blok diyagram, SCL (structured control language) ..	43
Resim 3.6. SQL (veri depolama alanı)	43
Resim 3.7. MonoDAQ marka veri toplama cihazı	44
Resim 3.8. DeweoftX veri toplama yazılımı ayar ekranı	45
Resim 3.9. DewesoftX ölçüm ekranı	46

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

C°	Santigrat derece
kN	Kilonewton
HRC	Rockwell sertliği
m²	Metrekare
m³	Metreküp
ms	Milisaniye
mm	Milimetre
µE	Mikrostrain

Kısaltmalar

Açıklamalar

AGV	Automated Guided Vehicle
ANN	Yapay Sinir Ağları
CART	Classification and Regression Tree
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNN	Convolutional Neural Network
HMI	Human Machine Interface
IoT	Internet Of Things
LSTM	Long Short-Term Memory
LOF	Local Outlier Factor
ML	Machine Learning
PM	Predictive Maintenance
PLC	Programmable Logic Controller
RNN	Recurrent neural network
SVM	Support Vector Machine
SCL	Structured control language

1. GİRİŞ

Cıvatalı bağlantı elemanları, inşaat, otomotiv, makine imalatı gibi birçok sektörde, parçaların birbirine güvenli ve sökülebilir şekilde bağlanması gereken her türlü uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. En büyük sökülebilir bağlantı elemanı kullanım alanlarından birisi otomotiv endüstrisi olup, ortalama bir binek otomobilin montajında tipik olarak 2800'den fazla dişli bağlantı elemanı kullanılmaktadır [1]. Bağlantı elemanı dişlerinin üretimi, talaşlı imalattan ziyade çoğunlukla ovalama olarak adlandırılan soğuk şekillendirme yöntemi ile endüstriyel olarak gerçekleştirilmektedir [2]. Dişli bağlantılarda ağırlıklı olarak cıvata ve saplama gibi erkek dişler kullanılmakta ve bunların %90'nından fazlası ovalama yöntemi ile üretilmektedir [1]. Ovalama yöntemi talaşsız üretime dayalı bir soğuk şekillendirme yöntemidir. Diş açma için düz kalıpların kullanılması, dişli parçaların seri üretimi için uygun maliyetli ve verimli bir çözüm sağlar [3, 4]. Ekonomik avantajlara ek olarak, soğuk şekillendirme ile üretilmiş dişler, talaşlı imalat ile işlenmiş dişlere göre çeşitli üstünlüklere sahiptir. Bu üstünlükler arasında soğuk şekillendirme uygulanması nedeniyle gerinim sertleşmesi yoluyla sertlikte ve dayanımda artış, basma gerilmeleri nedeniyle yorulma mukavemetinde artış yer almaktadır [2].

Ovalama işlemini etkileyen çok sayıda tribolojik etkenler bulunmaktadır. Sürtünme, yağlama, kuvvetler ve kalıp tasarımı gibi etkenler bir bütün olarak; işlemin verimliliğini, nihai dişlerin kalitesini ve kalıpların ömrünü etkilemektedir. Bu etkenlerin etkileşimlerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, ovalama işleminde üstün diş kalitesi ve üretim verimliliği elde etmek için çok önemlidir. Mevcut araştırmalar karmaşık tribolojik mekanizmaları tam olarak anlamak ve ovalama işlemlerinde sürtünme ve aşınmayı tahmin ve kontrol etmek için daha doğru yaklaşımlar geliştirmeye ihtiyaç olduğunu göstermektedir [4]. Literatürde ovalama işleminin çok yönlü tribolojik yönlerini anlamak için çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda metal şekillendirme benzetim çalışmaları alanında kullanılan Coldform, Simufact Forming, Ansys Workbench ve Siemens NX gibi sayısal benzetim yöntemi programları ile analizler yapılmış, elde edilen sonuçların gerçek üretim sonuçları ile doğrulanmasına odaklanılmıştır [2-5].

Dijitalleşmenin hızla ilerlediği günümüzde makine öğrenmesi endüstride önemli yaklaşımlardan biri haline gelmiştir. Makine öğrenmesi, verileri analiz ederek karar veren

yapay zekâ sistemleri geliştirmeye yarayan bir yöntemdir. Özellikle sanayide, kalite kontrol, üretim optimizasyonu ve hata tahmini gibi alanlarda önemli avantajlar sağlar. Üretim süreçlerini daha verimli hale getirerek ve ürün kalitesini artırarak maliyetleri düşürmeye yardımcı olmaktadır. Derin öğrenme, makine öğrenmesinin karmaşık veri kalıplarını öğrenmeye odaklanan bir alt dalıdır. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM), derin öğrenme alanında sıkça kullanılan özel bir Yinelemeli Sinir Ağı (RNN) türüdür. Özellikle zaman serisi verileri üzerinde çalışırken, uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme konusunda oldukça başarılıdır. Bu sayede üretim süreçlerindeki zamanla değişen doğrusal olmayan verileri analiz ederek daha doğru tahminler yapabilmektedir [6].

Gelişen teknolojiyle birlikte üretim süreçlerini analiz etmek için dijital sensörlerin kullanımının yaygınlaşmasıyla da Kramer ve Groche [7] ovalama işleminde besleme ve radyal yönde şekillendirme kuvvetlerinin ölçülmesi ve izlenmesine yönelik ovalama kalıbına piezo sensör kurulumu yapmıştır. Shen ve Ai [8] ise üretimdeki uygunsuzluğu tespit etmeye yönelik ovalama kalıplarından piezo sensör ile elde ettikleri verileri istatistiksel metotlarla anlık olarak işlenmesine yönelik çalışma yapmışlardır. LSTM ağları, diğer derin öğrenme modellerine kıyasla üstün öğrenme kabiliyeti ve genelleme göstererek sağ metal şekillendirme için takım yollarını tahmin etmede umut vaat etmiştir [9]. Hata tespitinde kullanılan bir derin öğrenmenin bir alt dalı olan Evrişimsel Sinir Ağı sınıflandırıcısı ile endüstriyel soğuk dövme işleminde hata koşullarını tespit etmede %99,02 ve belirli hataları sınıflandırmada %92,66 doğruluk elde edilmiştir [10]. Soğuk dövmede arıza tahmini için LSTM ağlarının Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA) tabanlı uygulamaları da geliştirilmiş ve yüksek hesaplama hızıyla test verilerinde %100 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir [11]. Bu çalışmaları, derin öğrenme yöntemlerinin, özellikle de LSTM ağlarının, takım yolu planlaması, hata tespiti ve arıza tahmini dahil olmak üzere soğuk dövme işlemlerinin çeşitli yönlerini iyileştirme potansiyelini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, yaygın endüstriyel uygulama için bu yöntemlerin daha fazla doğrulanması ve iyileştirilmesi gerekmektedir.

Diş açma işlemleri sırasında çok çeşitli üretim kusurları meydana gelmektedir. Kusurlu ürünlerin sektöre olan ilave maliyeti kaybedilen zaman ve malzeme açısından reddedilen ürünlerin miktarıyla orantılıdır. Yapılan tribolojik testlerde, ortaya çıkan hatalara büyük oranda kalıp aşınmasının sebep olduğu ortaya konmuştur [2]. Soğuk şekillendirme ve diş çekme kalıbı kusurları ve bunların sınıflandırılması, nihai ürün kalitesi ve hizmet ömrü için

esastır. Üretilen parçalarının kalitesini doğru bir şekilde belirlemek için şekillendirme esnasında üretimi anlık izlemek kritik öneme sahiptir [8]. Bu durum ovalama işleminde kalıp bozulmalarına dayalı olarak hatalı üretimin, üretim işlemi sırasında anında tespit edilmesi ve önlenmesine yönelik bilimsel ve deneysel çalışmaların yapılması gerekliliğini doğurmaktadır.

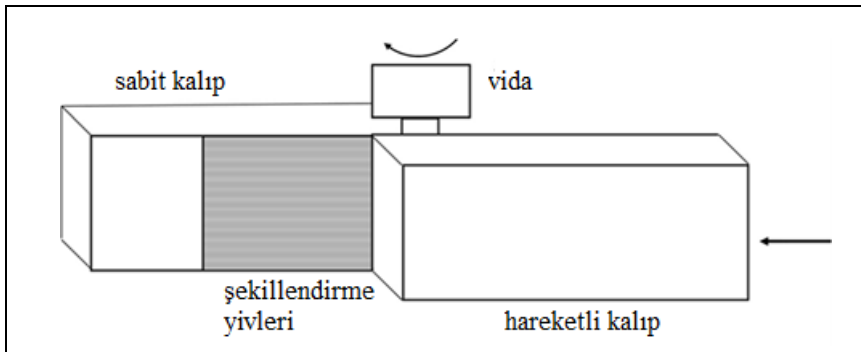
Bu tezin amacı kalıplarda meydana gelen kusurları, kusurların tribolojik etkenlere bağlı nedenlerini araştırmak ve gerinim sensörü ile elde edilecek verilerle kusur faktörlerine ilişkin neden-sonuç ilişkisini ortaya koymaktır. Bu çalışma, yaygın olarak kullanılan bir malzeme örneği üzerinde gerçekleştirilen ovalama işleminin deneysel kuvvet ve frekans analizlerini içermekte ve bu analizlerin sayısal benzetim yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Ovalama işlemini analiz etmek amacıyla akış gerilimi denklemleri üzerinde sıkıştırma testleri Simufact yazılımı ile yapılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları ile sayısal benzetim yöntemi sonuçları arasında bir karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinde zamanla değişen verileri analiz ederek tahminlerin kesinliğini artırmak için LSTM makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Araştırmada, özellikle kalıp deformasyonları ve bunların kalıp üzerinde olası hatalara neden olan etkileri üzerinde durulmuştur. Kalıp deformasyonundan kaynaklanan bu anomaliler, gerçek ortam testleri ve sayısal benzetim yöntemi analizleri yoluyla karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler, kalıp kullanımında meydana gelebilecek olası hataları ve güçlükleri önceden tahmin etmeye yönelik değerli bilgiler sağlamaktadır. Bu çalışmanın sonucu olarak, makine üreticilerinin malzeme özellikleri, diş açma matrisi geometrisi, iki diş açma matrisi arasındaki sürtünme katsayısı ve ovalama işlemi gibi diş açma işlemi parametrelerini anlamalarına yardımcı olacağı ortaya konmuştur. Bu tez aynı zamanda çevresel etkilerin en aza indirilmesine, atıkların azaltılmasına, daha çevre dostu üretim yapılmasına, soğuk dövme ve diş şekillendirme kalıplarının ömrünü uzatarak doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayacaktır.

2. OVALAMA İLE DİŞ AÇMA

Cıvata ve somun üretiminde soğuk şekillendirme, sıcak şekillendirme ve talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Soğuk şekillendirmenin üretim prensibi, başlangıçta makineye giren hammadde hacmi ile nihai ürünün aynı olmasıdır. Soğuk şekillendirme, malzemelerin oda sıcaklığında bir kalıp içinde kuvvet uygulanarak şekillendirilmesi yöntemidir. Soğuk şekillendirme yöntemleri genellikle diğer imalat yöntemlerinden daha üstün olduğu için tercih edilir. Bu yöntemin temel avantajları; bazı alanlarda talaşlı imalattan daha az atık, düşük enerji tüketimi ve malzeme liflerinin sürekliliği kesintiye uğramadığı için parçaların daha sağlam olmasıdır. Parçalar, dar toleranslarla yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi ile ek işlem yapmaya gerek kalmadan hızlı bir şekilde üretilir[1–3].

2.1. Ovalama

Ovalama işlemi soğuk şekillendirme yöntemidir. Bu yöntemde ovalama çapında işlenmiş cıvata ve vida gövdeleri, diş adımına göre üretilmiş ve sertleştirilmiş kalıpların arasından geçirilerek şekillendirilir. Düz kalıpla ovalamada biri sabit diğeri hareketli olmak üzere iki kalıp kullanılır. Sabit kalıp ve hareketli kalıp Şekil 2.1’de görüldüğü gibi birbirinin karşısına yerleştirilmiştir [3]. Ovalanacak parça, kuvvet yardımıyla kalıpların arasına sürülerek, kalıpların özel formu arasında plastik olarak akarak istenen diş şeklini alır.



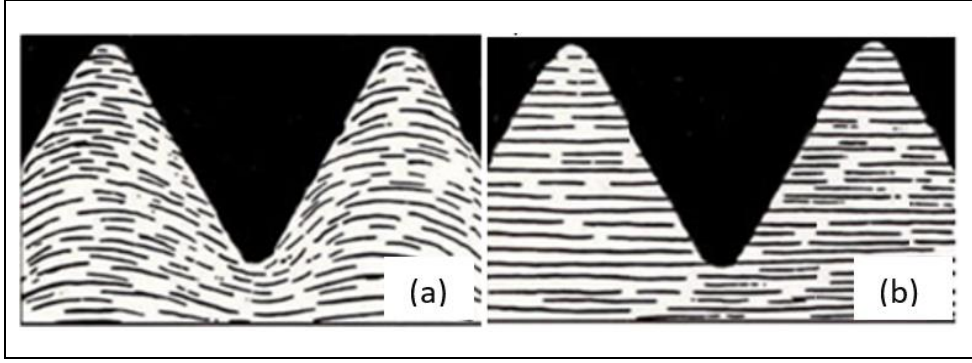
Şekil 2.1. Ovalama işlemi ile iki düz kalıp ile diş açmanın şematik gösterimi [3]

Ovalama ile diş açma işlemi, dişlerin kesilerek değil, malzemenin kalıcı şekil değişimi ile oluşturulması sayesinde daha güçlü ve daha düzgün dişler elde edilmesini sağlar. Bu nedenle, kalıp malzemesinin seçimi, bu işlem için oldukça önemlidir. Ovalama ile diş

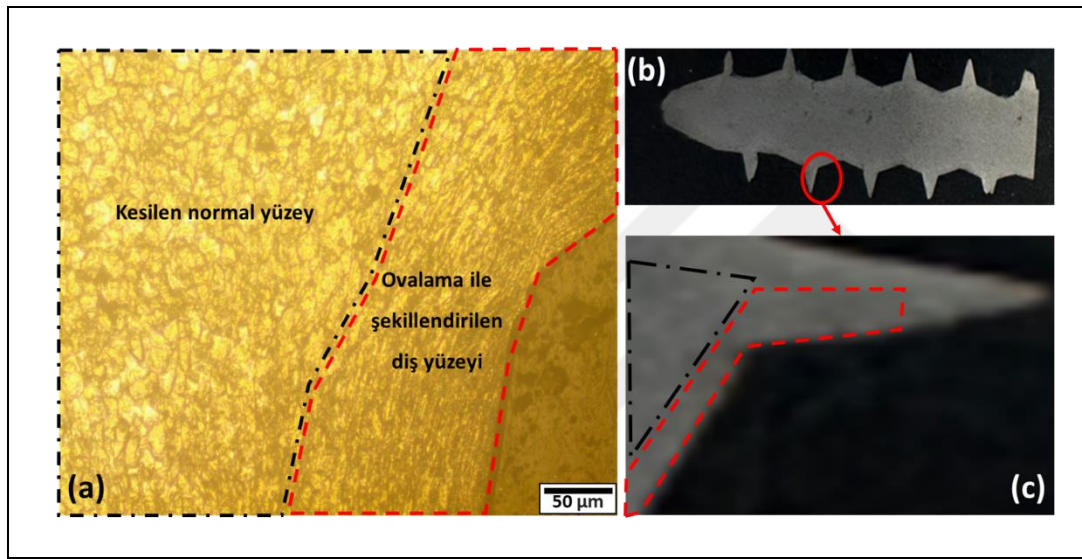
açma işleminde kullanılan kalıplar, yüksek dayanıklılık ve aşınma direnci gerektiren özel alaşımlardan üretilir. Kalıpların uzun ömürlü olması ve hassas diş profilleri oluşturabilmesi için yüksek sertlik, dayanıklılık, ısı iletkenlik, aşınma direnci ve geometrik hassasiyet gibi özelliklere sahip olmaları gerekir. Kullanılacak kalıpların malzemesi; işlenecek parçanın türü, diş profilinin karmaşıklığı ve üretim hacmi gibi faktörlere göre değişir. Genellikle yüksek hız çeliği (AISI M7, AISI M42), soğuk iş takım çeliği (AISI D2, AISI O2, AISI A2) ve darbeye dayanıklı takım çelikleri (AISI S2) kullanılmaktadır [12].

Ovalama yöntemiyle üretilen dişli parçalar, kesme ile üretilenlere kıyasla üstün performans gösterir ve bu avantaj, şekillendirilmiş dişli parçaların mikro yapısı ile yakından ilgilidir. Soğuk şekillendirme ile genellikle düşük karbonlu çelikler şekillendirilir. Ovalama, oda sıcaklığında yapılan bir soğuk şekillendirme işlemidir; sertlikleri Brinell olarak 200 ve çekme mukavemetleri 800 MPa'nın üzerinde olmaması ve %10-40 uzamaya sahip olması koşuluyla hem demir hem de demir dışı metallerde diş çekmek mümkündür. Uygulama alanları arasında çelik, paslanmaz çelik, serbest kesme çeliği, alüminyum ve alaşımları, bakır oranı %62'den fazla olan pirinç gibi malzemeler bulunmaktadır [13].

Ovalama yönteminde dişler diş kesmede olduğu gibi malzemenin çıkarılmasından ziyade işlenmemiş malzemenin yerinin değiştirilmesi veya yeniden düzenlenmesi ile üretilir. Kalıp, dişin kökünü oluşturmak için nüfuz eder ve yer değiştiren metal tepelyi oluşturmak için akar. Oluşan dişin kök kısmında keskin köşeler veya yanlarda gerilim yükselmelerine neden olacak takım izleri yoktur. Malzeme yüzeyinde akış çizgileri, malzemenin plastik deformasyon sırasında taneciklerinin hareketleri sonucu oluşur. Malzeme bir kuvvete maruz kaldığında, tanecikler birbirine göre yer değiştirir ve bu hareketler yüzeyde izler bırakır. Bu izler, akış çizgileri olarak gözlenir. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de malzeme içyapısının diş profili boyunca kesilmeden uzaması-tane akış yönlenmesi görülmektedir.



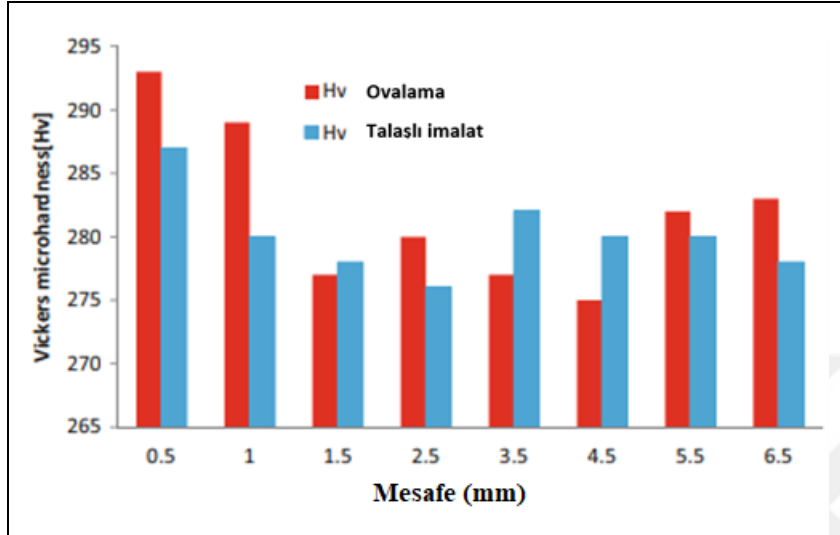
Şekil 2.2. Ovalama-soğuk şekillendirme (a) ve talaşlı imalat-kesme (b) ile oluşturulan dişlerin mikro yapısı ve dokusu [13]



Şekil 2.3. Ovalama ile oluşturulan vida dişinin metalografik görüntüsü (a), bakalite gömülmüş vida numunesi (b), şekillendirilen diş kesiti (c)

Literatür çalışmalarında çelik grubu malzemelerden imal edilen cıvata elemanlarına çekme testleri uygulanmış ve soğuk şekillendirme yöntemi talaşlı imalata kıyasla mekanik dayanım açısından değerlendirilmiştir. Sağlam ve diğerleri [13], düşük karbonlu AISI 1020 çeliğinden talaşlı imalat ve ovalama ile M12x1.75 ve M80x1.5 boyutlarında dişler üretmiş ve çekme testleri uygulamıştır. Ovalama kılavuzları kullanılarak üretilen dişler çekme mukavemetinde %30'luk bir artış gösterirken, ovalama kalıpları kullanılarak üretilen dişler çekme mukavemetinde %20'lik bir artış göstermiştir. Aktas ve Kisioglu [14], farklı malzemelerden hem talaşlı imalat hem de ovalama ile üretilen cıvatalara çekme testleri uygulamıştır. Ovalama ile üretilen cıvataların çekme mukavemetinde %8,53 ila %27,29 arasında bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. İbrahmi ve diğerleri [15] talaşlı imalat ve ovalama ile üretilen C45 düşük karbonlu çelik M12x1.75 numunelerin üretim sürecinin diş

üzerindeki etkisini incelemek için, dişin tepe noktasından dişli numunenin merkezine kadar farklı konumlarda bir mikrosertlik testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4'deki test sonuçlarına göre, soğuk şekillendirme ile elde edilen numunelerin sertliğinde artış olmuştur.



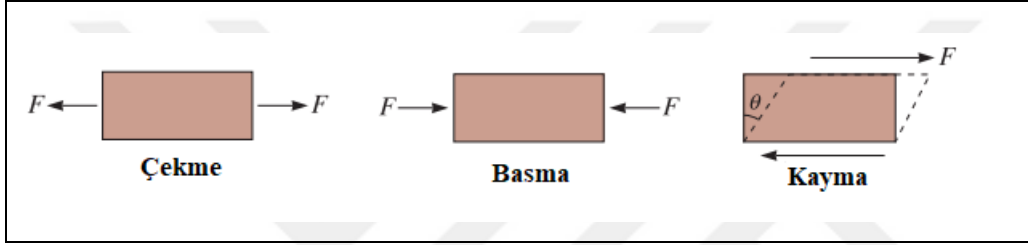
Şekil 2.4. Ovalama-soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat-kesme ile oluşturulan dişlerin vickers mikro sertliği karşılaştırması [15]

Ovalama işlemi ile üretilen dişlerin çekme, kesme ve yorulma dayanımı daha yüksektir. Statik çekme testleri, parçaların nihai mukavemetinde yaklaşık yüzde 30'luk artışlar sağlamıştır. Buna ek olarak, yüzey sertliği ve mükemmel bitmiş yüzey sayesinde aşınma özellikleri ve anti-galling (galling, kayan yüzeyler arasındaki yapışmadan kaynaklanan bir aşınma biçimidir) özellikleri büyük ölçüde iyileştirilmiştir. Ek avantajlar arasında gelişmiş kesme mukavemeti ve kesilmiş veya taşlanmış dişlerin sağladığının on katına kadar artan yorulma ömrü yer almaktadır. Seri üretim ve talaş olmamasından dolayı daha az malzeme maliyeti gibi avantajları da bulunmaktadır [1]. Ovalama işleminin avantajları şu şekilde sıralanabilir; dişlerin daha hassas ve düzgün bir şekilde açılmasını sağlar, daha pürüzsüz ve daha mükemmel bir yüzey elde edilmesine yardımcı olur, talaşlı imalat kullanılmadığı için şekillendirme kaynaklanan malzeme kaybı düşüktür, daha az kesme kuvveti gerektirir ve takımın ömrünü uzatır, ovalama sırasında malzeme daha az ısınır.

2.2. Ovalama İşleminde Malzeme Davranışı

Ovalama ile diş açma işlemi malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Gerinim sertleşmesi, aşınma direncini artırırken, yorulma direnci ve kesme mukavemeti

gibi diğer özellikler de işlem parametreleri ve malzemenin yapısına bağlı olarak değişir. Bu nedenle, optimum bir işleme süreci için bu parametrelerin iyi anlaşılması ve kontrol edilmesi gerekir. Bu doğrultuda öncelikle malzemenin temel mekanik davranışlarının anlaşılması gerekmektedir. Malzemelerin üzerine dik bir şekilde uygulanan kuvvet, çekme ve basma gerilmesine neden olur. Malzemenin aksel doğrultusunda dışa doğru uygulanan kuvvet çekme gerilimini, malzemenin aksel doğrultusunda içe doğru uygulanan kuvvet basma gerilimini oluşturur. Birçok yük taşıma uygulaması çekme veya basma gerilmelerini içerir. Kayma gerilimi ise uygulanan kuvvet ilgili alana paralel bir yönde hareket ettiğinde ortaya çıkar (Şekil 2.5) [16].



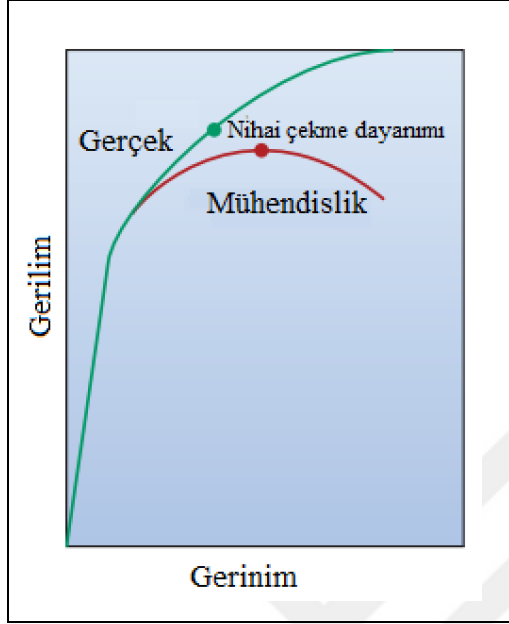
Şekil 2.5. Çekme, basma ve kayma gerilmeleri, F uygulanan kuvvettir [16]

Malzemelerin kuvvetlere karşı nasıl tepki verdiğini anlamak, birçok mühendislik probleminin çözümünde büyük önem taşır. Malzemelerin mekanik davranış türleri aşağıdaki gibidir.

Malzeme, uygulanan kuvvetle orantılı olarak şekil değiştirir ve kuvvet kaldırıldığında orijinal haline döner. Hooke Kanunu bu davranışı açıklar ve elastik davranış olarak anılır. Plastik davranış ise malzemenin belirli bir gerilme değerini aştıktan sonra kalıcı olarak şekil değiştirmesidir. Hem elastik hem de viskoz (akışkan) özelliklerin bir arada olduğu davranış türü viskoelastik davranış olarak isimlendirilir. Zamanla şekil değişimi gösterir ve kuvvet kaldırıldığında tam olarak orijinal haline dönmeyebilir.

Bir malzeme üzerine çekme kuvveti uygulandığında, malzeme üzerinde hem gerilme hem de gerinim oluşur. Gerilme, malzemenin birim alana düşen kuvvet olarak tanımlanırken, gerinim ise malzemenin boyundaki uzama miktarının ilk boyuna oranı olarak ifade edilir. Bu iki değer arasındaki ilişki, malzemenin mekanik özelliklerini anlamak için oldukça önemlidir. Şekil 2.6'da sünek bir malzemenin çekme gerilme-gerinim eğrisini gösterilmektedir. Çekme testi ile elde edilen veriler kullanılarak çizilen çekme gerilme-

gerinim eğrisi malzemenin uygulanan kuvvete nasıl tepki verdiğini gösterir. Bu eğri üzerindeki farklı bölgeler, malzemenin farklı davranışlarını temsil eder.



Şekil 2.6. Mühendislik ve Gerçek gerilme-gerinim eğrisi [16]

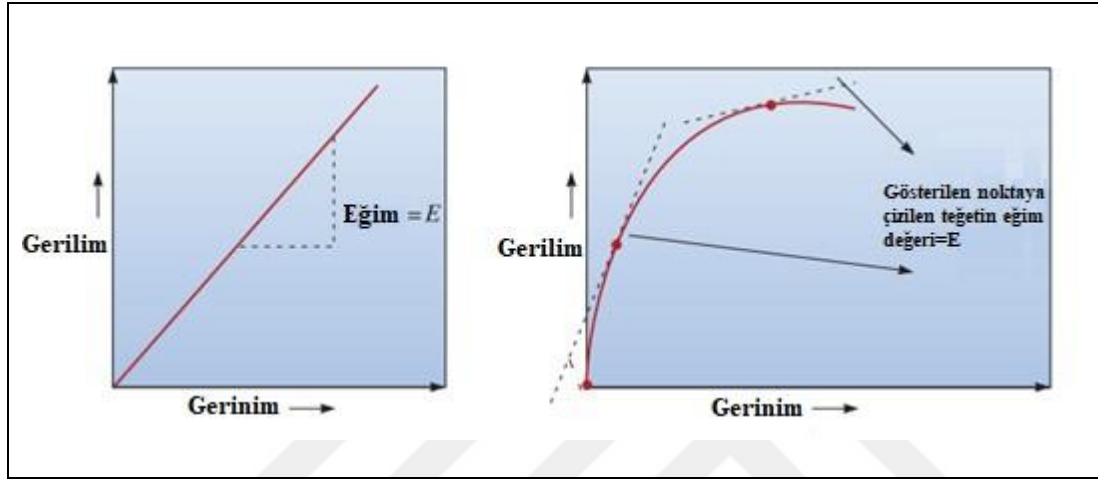
Mühendislik gerilmesi, bir malzemeye uygulanan yükün, malzemenin ilk kesit alanına bölünmesiyle elde edilen bir değerdir. Malzemelerin genel bir davranışını analiz etmek için kullanılır. Gerçek gerilme ise, bir malzemeye uygulanan yükün (F), malzemenin o anki (deformasyon sırasında sürekli değişen) kesit alanına (A) bölünmesiyle elde edilen bir değerdir. Malzemenin şekil değişimi sırasında kesit alanı daraldıkça gerçek gerilme değeri artar. Gerçek gerilme Eşitlik 2.1'deki gibi malzemenin birim alana düşen yükü olarak gösterilir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Gerçek gerinim (ϵ), malzemenin boyundaki oransal değişimdir. Malzemenin orijinal boyuna göre ne kadar uzadığını veya kısaldığını gösterir. Gerçek gerinim logaritmiktir ve mühendislik gerinimi doğrusaldır. Mevcut uzunluk bölümünün (L') orijinal uzunluk (L) üzerinden doğal logaritma değerine eşittir. Eş. 2.2'deki gibi gösterilir.

$$\varepsilon = \int_L^{L'} d \frac{L'}{L} = \ln \left(\frac{L'}{L} \right) \quad (2.2)$$

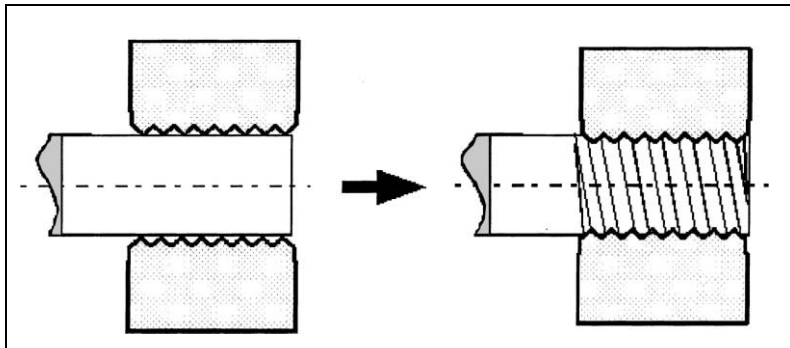
Elastik sınırın altında Hooke yasası geçerli kabul edilir, ortalama gerilim ortalama gerinimle orantılıdır. Elastik modülü (E) Eş. 2.3'deki gibi gösterilir. Lineer malzemede sabit, lineer olmayan malzemede teğetin eğimine eşittir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Elastik modülü (E): elastik malzemeler için (a), lineer olmayan malzemeler için (b) [16]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Malzeme üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında, malzemenin kalıcı olarak şekil değiştirmesi plastik deformasyon durumudur (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Ovalama ile diş açma işleminde deformasyon ve akış [4]

Bir malzemenin plastik deformasyona uğratılması için gerekli olan minimum gerilme değeri akma gerilmesi olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, malzemenin akmaya başladığı andaki gerilme seviyesidir. Ovalama işlemi sırasında, kalıp malzemeye sürekli bir kuvvet uygular. Bu kuvvet, malzemenin akma gerilmesini aştığında malzeme deforme olur ve istenen şekil elde edilir. Malzemenin akma gerilmesi, işleme kuvvetini ve dolayısıyla enerji tüketimini belirleyen önemli bir faktördür. Bir malzeme, plastik deformasyona uğradığında iç yapısında dislokasyonlar oluşur. Bu dislokasyonlar, malzemenin daha fazla deforme olmasını zorlaştırarak malzemenin sertleşmesine neden olur. Ovalama işlemi sırasında, malzeme sürekli olarak plastik deformasyona uğradığından, gerinim sertleşmesi gözlenir. Gerinim sertleşmesi, iş parçasının aşınma direncini artırır ve daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmesini sağlar. Ancak aşırı gerinim sertleşmesi, malzemenin kırılgan hale gelmesine neden olabilir.

Bir malzeme, tekrarlı yüklemelere maruz kaldığında, belirli bir gerilim seviyesinin altında bile çatlak oluşarak kırılması olayına yorulma denir. Yorulma direnci, bir malzemenin yorulmaya karşı gösterdiği dirençtir. Ovalama işlemi sırasında, dış yüzeyinde gerilme konsantrasyonları oluşur ve bu durum yorulma ömrünü kısaltabilir. Ancak uygun işlem parametreleri ve soğutma gibi yöntemlerle yorulma direnci artırılabilir. Bir malzemenin başka bir yüzeyle sürtünme sonucu aşınmaya karşı gösterdiği dirençtir. Ovalama işlemi sırasında, kesici takım ve iş parçası arasında sürekli sürtünme meydana gelir. Gerinim sertleşmesi sayesinde aşınma direnci artar, ancak kesici takımın aşınması da göz ardı edilemez.

2.3. Ovalama İşleminde Şekillendirme Kuvvetleri

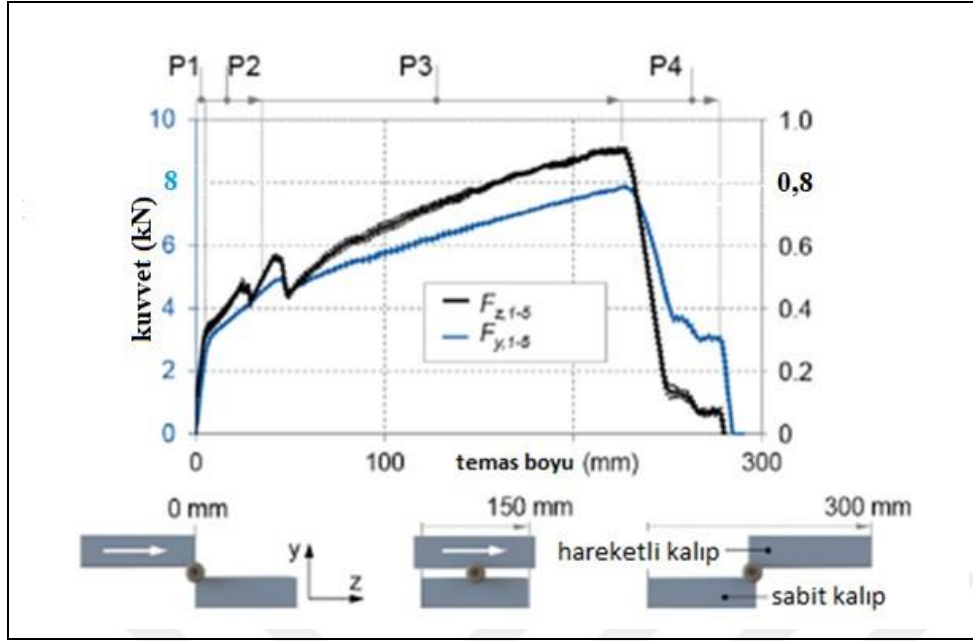
Ovalama ile dış açma işleminde çeşitli kuvvetler etkili olur. Bu kuvvetlerin doğru dengelenmesi, kaliteli bir dış şekli elde etmek için oldukça önemlidir. Kuvvetlerin dengelenmesi için şekillendirici kalıbın geometrisi, dış açma koşulları (ovalama hızı), soğutma ve yağlama, makine ayarları gibi faktörler optimize edilmelidir. Ovalama işlemlerinin tasarımı günümüzde sistematik bir yaklaşımdan ziyade uzman bilgisi ile gerçekleştirilmektedir [2]. Ancak bu yaklaşım, iş parçasında farklı türde kusurlara neden olan hatalı süreçlere yol açmaktadır. Sürtünme, yağlama ve kuvvetlerin karşılıklı etkileşimini kapsayan ovalamanın tribolojik yönleri bu üretim sürecinin başarısını, verimliliğini ve nihai ürün kalitesini belirlemede çok önemlidir. Yapılan araştırmalar, bu

karmaşık etkileşimler hakkında değerli bilgiler sunmakta ancak ovalama sonuçlarını optimize etmek için kapsamlı bir anlayışa duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Vida kusurlarının oluşumunu önlemek ve diş çekme işleminin genel kalitesini artırmak için şekillendirme kuvvetlerinin doğru bir şekilde anlaşılması ve ölçülmesi önemlidir. Kramer ve Groche [2], araştırmalarında kuvvet ölçümlerinin doğruluğunu sağlamak için diş açma işlemi sırasında kök yarıçapını kalibre etmenin (oluşturulmak istenen vida çapına göre kalıp aralığının ayarlanmasının) önemini de vurgulamaktadır. Sayısal olarak hesaplanan kuvvet eğilimlerini dolaylı kuvvet ölçümleriyle karşılaştırarak, kalibrasyon kuvveti ile işlem sırasında uygulanan gerçek kuvvet arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilceği ortaya konmuştur. Bu kalibrasyon işlemi, baştan sona diş açma işleminin kalitesini ve doğruluğunu sağlamak için çok önemlidir [2].

Ovalama işlemine dahil olan kuvvetler, özellikle de kalıplar tarafından uygulanan sıkıştırma kuvvetleri, malzeme akışını ve nihai diş profilini şekillendirmede etkilidir. Bu kuvvetlerin büyüklüğü ve dağılımı, diş formu, boş çap (diş açılmadan önceki çap) ve malzeme özellikleri gibi faktörlerden etkilenir [4]. Domblesky ve Feng [4] tarafından yapılan çalışma, ACME dişleri gibi küt köklere sahip diş formlarının malzeme akışını kısıtladığını ve daha açık kök profillerine sahip dişlere kıyasla daha yüksek gerilmeye yol açtığını ortaya koymuştur. Ayrıca, malzemenin akış gerilimi ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı, deformasyona karşı direncinde ve diş profilini doldurma kabiliyetinde rol oynar. Yüksek sertlik oranlarına sahip malzemeler daha fazla kalıp kuvveti gerektirir ve diş yüksekliğinin azalmasına neden olabilir. Zhang ve arkadaşları [21] tarafından yapılan araştırma, sürtünmenin gerilme dağılımını ve malzeme akış davranışını nasıl etkilediğini ve sonuçta şekillendirme kuvvetini, torku ve şekillendirilen parçaların kalitesini nasıl etkilediğini göstererek bunu desteklemektedir.

Mevcut durumda, ovalama ile soğuk şekillendirme işleminin anlaşılabilmesi, diş şekillendirme işlemleri için sistematik bir tasarımın bulunmamasına yol açmıştır. Bu sorunu çözmek amacıyla, doğrudan kuvvet akışında hem besleme hem de radyal yönlerdeki şekillendirme kuvvetlerini ölçmek önem arz etmektedir. Şekil 2.9'da beş adet numunenin ovalama işlemi esnasında ortalama kuvvet eğilimleri gösterilmektedir



Şekil 2.9. y ve z yönünde kuvvet -temas boyu değişimi [7]

Bu grafikte, ilk aşama olan P1'de, işlenmemiş parça ile kalıplar arasında temas kurulur ve bu hem y hem de z yönünde kuvvette keskin bir doğrusal artış gözlemlenir. Bu aynı zamanda işlenmemiş parça rotasyonunun başlangıcını işaret eder. İkinci aşama olan P2'de, kuvvet çok daha düşük bir büyüklükte olsa da hala istikrarlı bir şekilde artar. Ardından, halihazırda bir kalıp tarafından şekillendirilmiş olan işlenmemiş parçanın konturu ikinci kalıp ile temas eder. Bu temas, kuvvette kararsız bir in-crease ve azalmaya yol açar. P3 bölgesi (kalibrasyon bölgesi), kuvvet maksimumuna ulaşılan kadar sabit bir kuvvet artışı aşamasıdır. P4 bölgesinde kuvvetin azalması, şekillendirme işleminin ana kısmının tamamlanmış olmasındandır. Bu bölge içinde, y ve z'deki her iki kuvvet de büyük ölçüde azalır. Bu durum özellikle %89 oranında azalan F_z kuvveti için geçerliken, F_y sadece %63 oranında azalır. Düşüşteki bu fark, kalibrasyon bölgesi içinde iş parçasının kalan elastik deformasyonuna bağlanmaktadır. Bu elastik deformasyon, kalibrasyon bölgesi içinde yüksek bir radyal kuvvet uygulayarak besleme kuvvetine kıyasla daha az şiddetli bir göreceli düşüşe yol açar[7].

2.3.1. Ovalama işleminde sürtünme ve yağlamanın etkisi

İş parçasının öteleme hareketi ancak iş parçası ve kalıplar arasında yeterli sürtünme varsa mümkündür [2]. Sürtünme, iş parçasının dönüşünü ve malzeme akışını sağlamak için

gerekli olsa da artan enerji tüketimi, daha yüksek deformasyon gerilmeleri ve yüzey kusurları gibi zararlı etkilere de yol açabilir [4, 12, 17-21]. Yağlama türü ve etkinliğinden önemli ölçüde etkilenen sürtünme faktörü, elde edilebilir diş yüksekliğini ve diş içindeki gerinimi doğrudan etkiler [4]. Farklı yağlayıcılar farklı sürtünme mekanizmaları ve işlem parametrelerine karşı farklı hassasiyetler sergilediğinden, yağlayıcı seçimi ve iş parçası malzemesi ile uyumluluğu çok önemlidir [22]. Sürtünme katsayısı yalnızca doğal bir malzeme özelliği değil, yağlayıcı ve iş parçası arasındaki karmaşık etkileşim tarafından şekillendirilen dinamik bir sistem tepkisidir [22]. Zhang ve arkadaşları [21] tarafından yapılan çalışma, sürtünmenin önemini vurgulayarak sürtünme faktörü kalibrasyonu için önemli bir parametre olan yuvarlanma torku üzerindeki önemli etkisini ortaya koymaktadır. Bulguları, daha yüksek bir sürtünme faktörünün yüksek deformasyon gerilimi ve düşük malzeme akış hızı ile sonuçlandığını ve sonuçta nihai parçanın yüzey kalitesini ve pürüzlülüğünü etkilediğini göstermektedir.

Atıfta bulunulan tüm çalışmalarda ovalama işleminde sürtünme hesabında ya Amontons-Coulomb'a sürtünme modeli ya da kayma sürtünme modeli uygulanmaktadır [2]. Amontons-Coulomb modeline göre sürtünme gerilmeleri Eş. 2.5'deki gibi ifade edilebilir:

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_n \quad (2.5)$$

Burada τ_R sürtünme gerilimini, μ boyutsuz sabit sürtünme katsayısını ve σ_n temas gerilimini temsil eder. Sürtünme gerilmeleri bu nedenle artan temas gerilmeleri ile doğrusal olarak artar. Kayma faktörü modeline göre, sürtünme gerilmeleri Eş. 2.6'daki gibi ifade edilebilir:

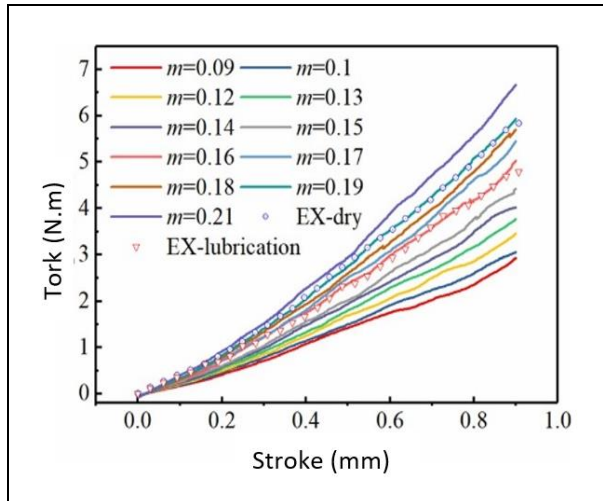
$$\tau_R = m \cdot k \quad (2.6)$$

Burada k iş parçasının kayma akış gerilmesi ve m boyutsuz sabit bir sürtünme faktörüdür. Temas gerilmeleri bu formülasyona göre sürtünme gerilmelerini etkilemez.

Etkili yağlama, sürtünmeyi yönetmek için birincil strateji olarak ortaya çıkmakta, daha düzgün malzeme akışı, daha az enerji gereksinimi ve gelişmiş diş kalitesi sağlamaktadır [22]. Xie ve arkadaşlarının [23] ovalama ile tribolojik benzerlikler gösteren planet makaralı vidalar üzerine yaptığı araştırma, yağlama ve yüzey pürüzlülüğünün kritik rolünü

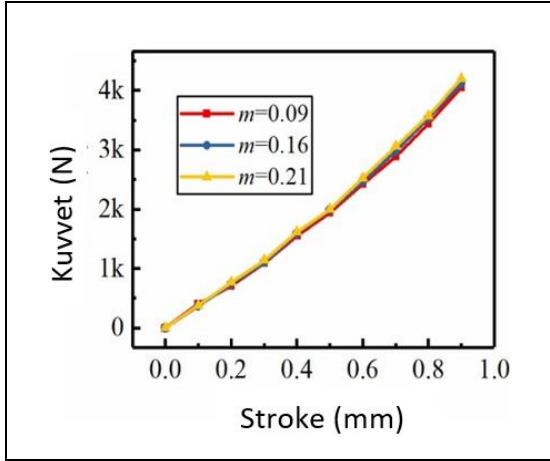
daha da vurgulamaktadır. Çalışmaları, artan dönme hızının film kalınlığını artırarak ve sürtünme katsayısını ve temas alanı oranını azaltarak yağlamayı artırdığını göstermektedir. Tersine, daha yüksek yükler film kalınlığının azalmasına ve sürtünmenin artmasına yol açarak potansiyel olarak aşınmaya neden olur ve vidanın çalışma ömrünü azaltır. Bu bulgular, ovalamada sürtünme ve aşınmanın azaltılmasında uygun yağlama ve yüzey kaplamasının önemini vurgulamaktadır. Zhang ve arkadaşları [24], sürtünmenin malzeme akış davranışı ve gerilme dağılımı özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneyler çeşitli yağlama koşulları altında gerçekleştirilmiş ve sürtünme faktörünü kalibre etmek için sonlu eleman sayısal benzetim yöntemi kullanılmıştır. Yuvarlanma torku sürtünme faktöründen önemli ölçüde etkilenmiş ve hassas parametre olarak kabul edilmiştir. Sürtünme faktörü m , test ve sayısal benzetim yöntemi arasındaki tork karşılaştırılarak yağlama koşulu altında 0,16 olarak belirlenmiştir. Daha büyük bir sürtünme faktörü deformasyon gerilimini artırmış ve malzeme akış hızını azaltmıştır.

Değişken sürtünme faktörleri altında şekillendirme kuvveti Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Sürtünme faktörü 0,09; 0,16 ve 0,21 olduğunda, radyal kuvvet biraz farklıdır ve torkun hassas parametre olarak seçilebileceğini doğrulamaktadır.



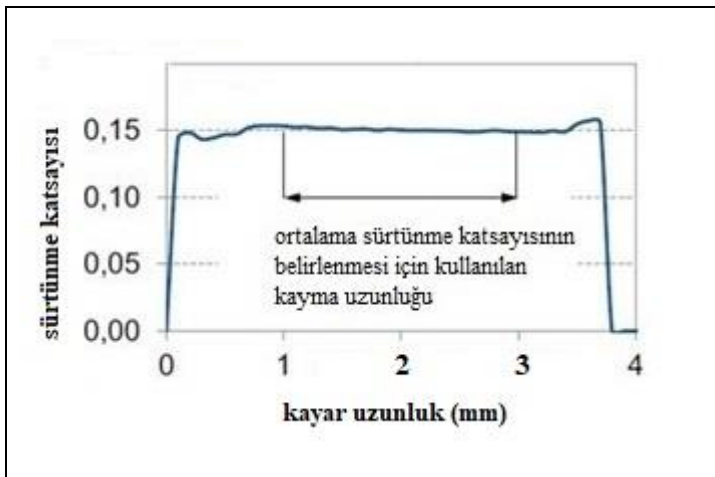
Şekil 2.10. Sürtünme faktörünün tork aracılığıyla kalibrasyonu [24]

Değişken sürtünme faktörleri altında şekillendirme torku Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Diş iş parçasına girdikçe şekillendirme torku kademeli olarak artmakta ve doğrusal olmayan bir artış eğilimi göstermektedir. Strok 0,87 mm olduğunda, $m = 0,21$ sürtünme faktörü altındaki tork, $m = 0,09$ sürtünme faktörü altındakinin 2,28 katıdır [24].



Şekil 2.11. Farklı sürtünme faktörleri altında radyal kuvvet [24]

P. Groche ve diğerleri [2], sayısal bir model kullanarak, düz kalıplarla dairesel olukların ovalama işleminin incelemiştir. Çalışma, temas bölgesi içindeki bağıl kayma hızı ve normal temas gerilimi gibi faktörlere odaklanmıştır. Araştırmada kullanılan sayısal model iki adet sert kalıp ve silindirik bir elastik-plastik iş parçasından oluşmuştur. Sürtünme katsayısı da dahil olmak üzere sürtünmenin etkisini araştırmak için çeşitli parametreler değiştirilmiştir. Bu çalışma ile ovalama işleminin davranışı ve metal şekillendirme operasyonlarında sürtünmeyi etkileyen faktörler hakkında fikir ortaya konmuştur. Sürtünme katsayısının trend değişiminin kalıp üzerindeki meydana gelen kuvvet değişiminin etkileri gözlenmiştir (Şekil 2.12).

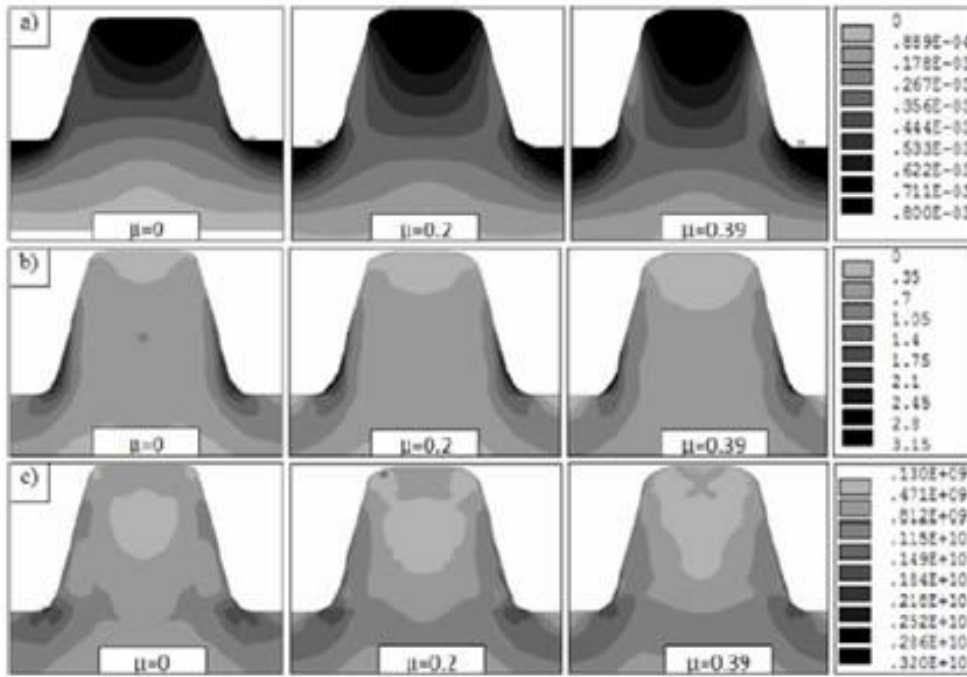


Şekil 2.12. Sürtünme katsayısı ile kayar uzunluğun değişimi [2]

Domblesky ve diğerleri [4] büyük çaplı iş parçalarının dıştan diş açılmasında diş profiline odaklanmış ve diş profili, sürtünme katsayısı, akış gerilimi ve iş parçası çapı gibi çeşitli

faktörlerin diş açma üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, iş parçası çapının diş açma üzerinde çok az etkisi olduğunu gösterirken, akış gerilimi, sürtünme katsayısı ve diş profili gibi faktörlerin diş kökü ve diş tepesindeki etkili gerilmenin yanı sıra elde edilebilir diş yüksekliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Kukielka [24] tarafından yapılan çalışma, diş açma işleminde sayısal analiz yaparak yüzey tabakasının fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmeyi, aşınma direncini artırmayı ve vidanın boyutsal doğruluğunu ve verimliliğini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Uygun takım, teknik gereksinimler ve yüzey tabakası özelliklerini karşılayan işleme koşullarının seçilmesinin yanı sıra takım ömrünü ve işleme verimliliğini uzatmanın önemini vurgulamıştır. Bununla birlikte, işleme koşullarının seçimine ilişkin kılavuz ilkeler kapsamlı bir şekilde tanımlanmamıştır ve bu alanda daha fazla araştırma ve geliştirme yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak Kukielka çubuklarda trapez diş açmanın bilimsel araştırma ve geliştirmesine odaklanmakta, teknolojiye ilerlemeleri ve diş açma özelliklerini iyileştirmedeki avantajlarını göstermekte, teknik gereksinimleri karşılamak ve yüzey katmanı özelliklerini iyileştirmek için takım yapısı ve işleme koşullarının optimizasyonuna odaklanmakta ve diş açmada doğruluk ve verimliliğin önemini vurgulamaktadır. Diş açmada hassasiyet ve verimliliğin önemini vurgulamıştır. Bu anlamda, yağlama koşullarının etkisini, yağlama faktörlerindeki değişiklikleri ve gerilim analizini incelemiştir. Yer değiştirme vektör toplamı haritaları (Şekil 2.13 (a)), belirli yağlama koşulları altında bir yapı veya sistemdeki tüm noktaların yer değiştirme vektörlerini görselleştirir. Bu haritalar, farklı noktalardaki değişimleri ve yapı içindeki deformasyonları anlamak için kullanılır. Gerinimlerin eşdeğerleri (Şekil 2.13 (b)), yapıya uygulanan yağlama koşulları altında meydana gelen iç gerilmelerin yoğunluğunu ve dağılımını gösterir. Gerinimler, malzeme içindeki deformasyonların bir ölçüsüdür ve yapısal dayanıklılığı değerlendirmede önemli bir parametredir. Gerilmelerin eşdeğerleri (Şekil 2.13 (c)) ise malzeme üzerindeki gerilim dağılımını gösterir.



Şekil 2.13. Yer değiştirme vektör toplamı haritaları (a), çeşitli yağlama koşulları için gerinimlerin (b) ve gerilmelerin (c) eşdeğerleri [24]

Volz ve Groche [25], ovalama sırasında kayma koşullarını deneysel olarak araştırmış ve aşırı kaymanın strok hızı ve yağlamadan büyük ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur. Araştırmalarında, kayma nedeniyle proses arızalarını tahmin etmek ve önlemek için sonlu elemanlar sayısal benzetim yöntemi gelişmiş sürtünme modellerine duyulan ihtiyacın altı çizilmiştir. Daha yüksek strok hızlarının aşırı kayma riskini artırarak yetersiz şekillendirilmiş parçalara yol açtığını ve polimer yağlayıcılara sahip yağlama sistemlerinin kuru sistemlere kıyasla çok daha düşük strok hızlarında başarısız olma eğiliminde olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmaları ayrıca optik ölçüm sistemlerinin şekillendirme işlemleri sırasında kayma koşullarını yakalamada ve analiz etmede ne kadar etkili olduğunu göstermiştir.

2.4. Hata Tespiti ve Analiz Yaklaşımları

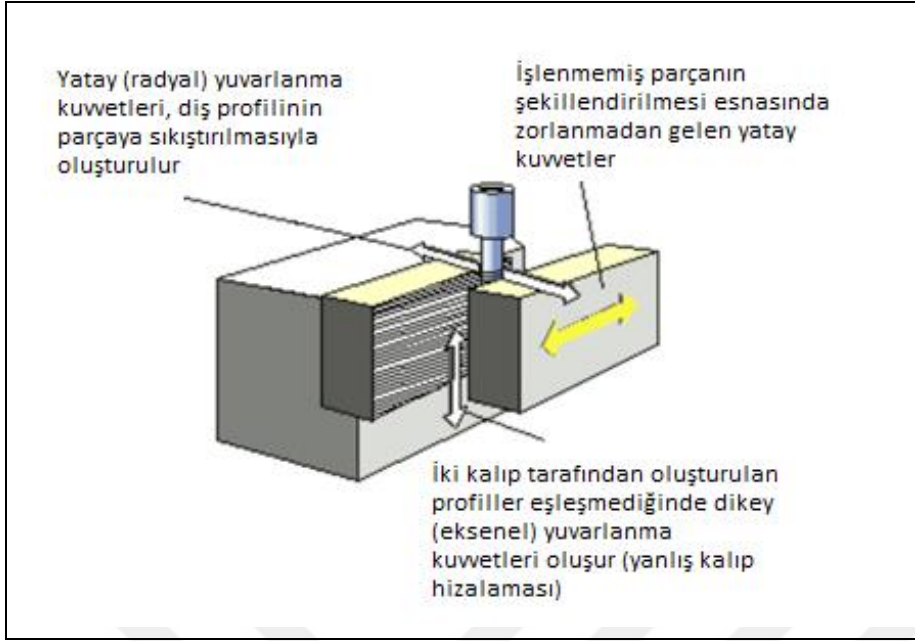
Soğuk dövme işlemlerinin analizi ve incelenmesi, doğrusal olmayan özellikler nedeniyle sayısal benzetim yöntemlerine dayanmaktadır. Sürecin iki boyuta dönüştürülmesiyle, kalıpların kinematiği yalnızca radyal iş parçası yönünde simüle edilir ve yalnızca sürtünmeye dayanan ve doğası gereği önemli olan iş parçası dönüşü dikkate alınamaz. Bu nedenle son çalışmalarda, soğuk şekillendirme işlemlerinin üç boyutlu sayısal

modellemesine odaklanılmıştır [2]. Geliştirilen sayısal benzetim yöntemi modelleri ile tribolojik yüklerin yanı sıra sürtünmenin etkisi de incelenmiştir. Elde edilen sayısal bulgular, endüstriyel şekillendirme makineleri kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sayısal olarak elde edilen sonuçların nümerik ve fiziksel temas modelleme parametreleri açısından oldukça hassas olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni temas bölgesi içinde değişken sürtünme koşullarıdır (bağlı kayma hızı, temas normal gerilimi).

2.4.1. Ovalama işleminde hatalı üretim sebepleri

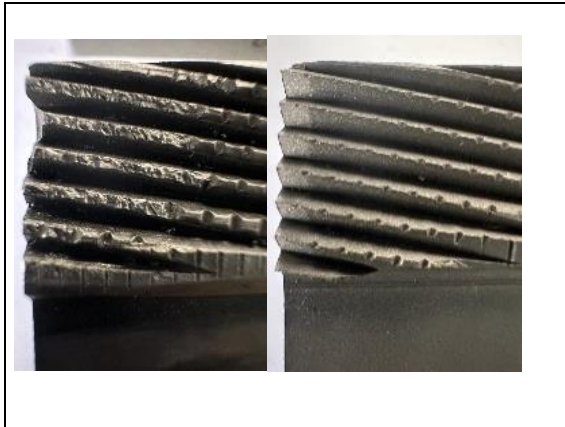
Standart ve koşulların farklı ülke ve markalarda oluşturulması, birçok ülke ve markaya tedarikçi olan üreticileri oldukça zor duruma sokmuştur. Her marka için ayrı prosedürler, uygulamalar ve denetimler maliyetleri artırmış ve tüm ürünlerde aynı kalite seviyesinin sağlanmasını zorlaştırmıştır. Ovalama işleminde hatalı üretim birçok sebepten kaynaklanabilir. Bu hataların bazı nedenleri aşağıdaki gibi verilebilir.

Ovalama yerleşik bir üretim teknolojisi olmasına rağmen, ovalama için proses tasarımı ve optimizasyonu büyük ölçüde ampirizm ve atölye deneyimine dayanmaktadır. Ovalama konusunda önemli bir endüstriyel deneyim birikimi olmasına rağmen, proses davranışını ölçen ve proses parametrelerini birbirine bağlayan ayrıntılı bilgi ve modeller titizlikle geliştirilmemiştir [4]. Operatörlerin yetersiz eğitimi veya dikkatsizliği, ovalama işlemi sırasında hatalara yol açabilir. Ovalama işlemi için kullanılan malzemenin kalitesi, son ürünün kalitesini etkiler. Düşük kaliteli malzeme, çatlaklar veya yüzey kusurları gibi sorunlara yol açabilir. Ovalama makinelerinin doğru ayarlanmaması, hatalı üretimle sonuçlanabilir. Kesme hızı, basınç ve diğer parametrelerin doğru şekilde ayarlanması önemlidir. Yanlış kalıp hizalaması, yapı veya makinede parçalar arasında doğru hizalanmama sonucu eksenel kuvvetlerin oluşmasına neden olur (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Ovalama işleminde eksenel kuvvetler [1]

Ovalama işlemi sırasında oluşan talaşın doğru şekilde yönetilmemesi, ürünün kalitesini olumsuz etkileyebilir. Ovalama işlemi sırasında yeterli soğutma sağlanmazsa, malzeme üzerinde ısınma ve deformasyon gibi sorunlar meydana gelebilir. Ovalama işlemi sırasında yeterli soğutma sağlanmazsa, malzeme üzerinde ısınma ve deformasyon gibi sorunlar meydana gelebilir (Resim 2.1).

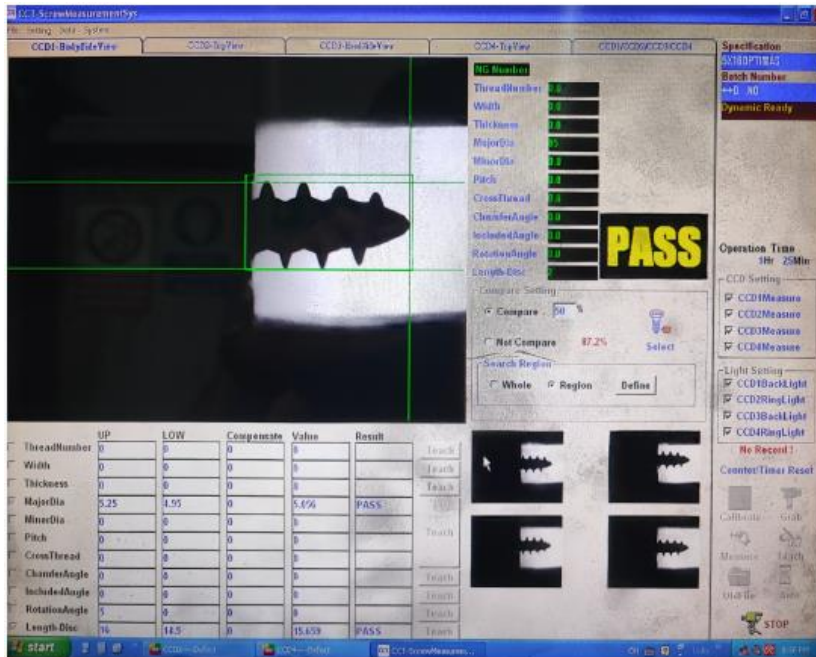


Resim 2.1. Deforme olmuş (sol) ve sağlam (sağ) kalıp yüzey görüntüsü

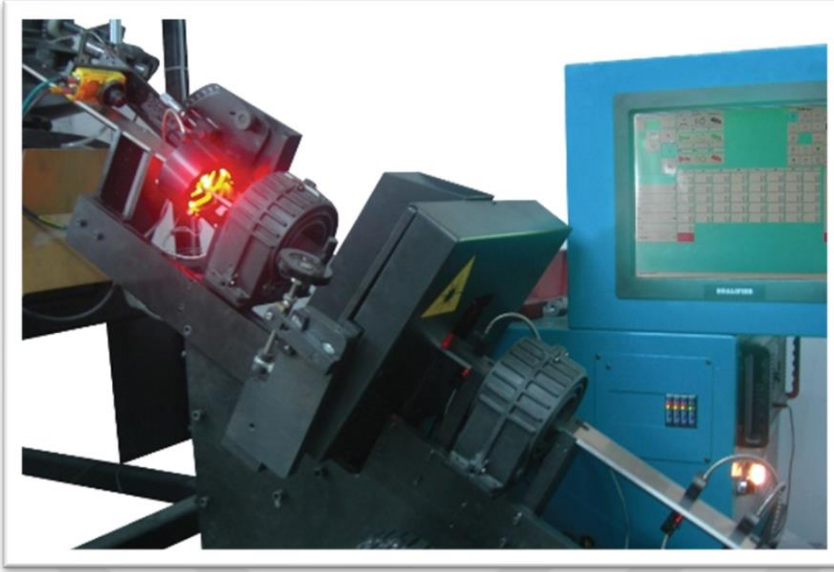
Proses hatalarının vida'da meydana getirdiği bozukluklar ise şu şekildedir: a) Vida dişlerinde bozukluk: dişlerde aşınma, açıda bozukluk, b) Kötü vida diş formu olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.4.2. Vida üretiminde hatalı ürünlerin tespit yöntemleri

Vida üretiminde hatalı ürünlerin tespit yöntemleri, kalite kontrol ve süreç iyileştirmesi için kritik öneme sahiptir. Bu yöntemler, hatalı vidaların tespitini sağlar ve üretim sürecinin kalitesini artırır. Hangi yöntemin kullanılacağı, üretim ortamına ve vidaların özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Görsel inceleme, operatörlerin vidaları gözle inceleyerek yüzey kusurları, çatlaklar veya diğer hataları tespit etmeye çalıştığı basit bir yöntemdir. Hassas ölçüm cihazları kullanarak boyut sapmaları tespit edilebilir. Bu, vida uzunluğu, diş sayısı, çap gibi özellikleri içerir. Ultrasonik testler, iç kusurları (örneğin, hava kabarcıkları) tespit etmek için kullanılır. Bu yöntem, malzemenin içine nüfuz eder ve gizli hataları ortaya çıkarır. Görüntü işleme, dijital görüntüler üzerinde bilgi çıkarma işlemidir ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kusur tespiti gibi önemli bir rol oynar. Bu teknoloji, üretim hatlarında üretilen parçaların kalitesini kontrol etmek için kullanılır. Kamera tarafından alınan görüntüler üzerinde yapılan işlemler sayesinde, kusurlu bölgeler belirlenmekte ve bu parçaların üretim sürecinden çıkarılması sağlanabilmektedir. Görüntü işleme algoritmaları, öncelikle görüntüdeki kusurlu bölgeleri tanımlamak ve sonra bu bölgeleri sınıflandırmak için kullanılır (Resim 2.2). Manyetik parçacık muayenesi, yüzey çatlaklarını veya kesikleri tespit etmek için manyetik alan kullanır (Resim 2.3).

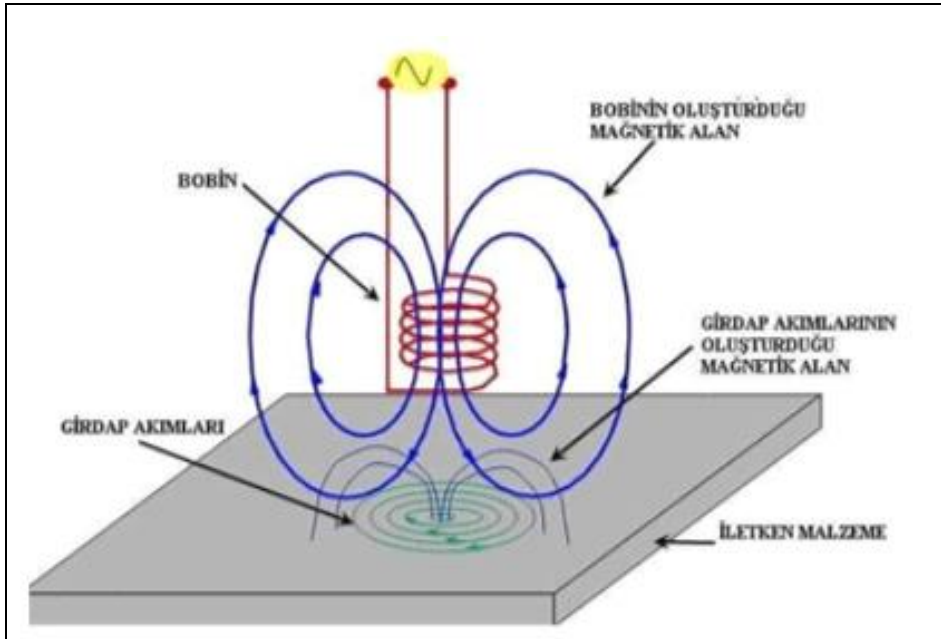


Resim 2.2. Görüntü işleme ile hatalı ürünlerin tespiti



Resim 2.3. Eddy current (girdap akımları) ile iç yapı kusurlarının tespiti

Eddy akımları, bir elektrik akımı bir iletken içinde değişken bir manyetik alan içinde döndüğünde oluşan dönen akımlardır. Bu akımlar, manyetik alan içinde hareket eden bir iletkenin yüzeyinde veya içinde oluşabilir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Eddy current (girdap akımları) ile iç yapı kusurlarının tespiti [26]

Sayısal benzetim yöntemi teknolojisinin uygulanması, metal şekillendirme işlemleri bağlamında proses tasarımı aşamasının önemli bir unsuru haline gelmiştir. Bilgisayar

performansı arttıkça, ürün tasarım sürecindeki üç boyutlu sayısal benzetim yöntemleri giderek daha uygulanabilir hale gelmektedir. Bununla birlikte, sayısal benzetim yöntemlerinde sürtünmenin modellenmesi, özellikle aksenal simetrik parçaların haddelenmesi gibi sürtünmeye karşı oldukça hassas olan işlemlerde bir zorluk olmaya devam etmektedir [2]. Sayısal benzetim yöntemi, vidalar da dahil olmak üzere makine parçalarının şekillendirme sürecini ve soğuk dövme işleminde önemli bir rol oynayan ve daha fazla sayıda ürün üretme potansiyeli sunan şekillendirme işlemini analiz etmek için kullanılmaktadır. Ivanov [18–20] düz ve düz vidaların üretimi için bir ovalama makinesi kullanarak soğuk şekillendirme ile ovalamanın kinematikliğini, dış açma eğrilerini, kalıpla teması ve silindir geometrisini çıkarmış ve ovalama takımlarının tasarımını planlamıştır.

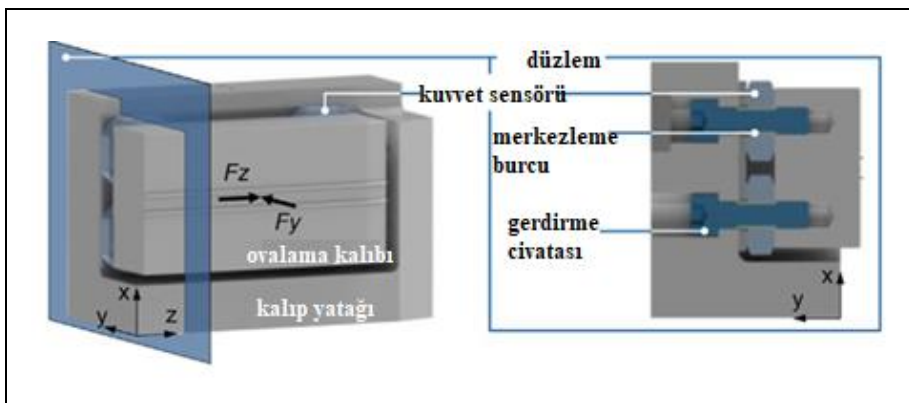
Teknolojideki ilerlemeler ovalama işleminin genel olarak anlaşılmasını geliştirmiş olsa da literatür taraması proses konfigürasyonundaki fiziksel değişikliklerin etkisini ele almamıştır. Ovalama işleminde meydana gelen hatalarla başa çıkmak genellikle sınırlı kapasiteye sahip, zaman açısından maliyetli bir süreçtir. Bu nedenle, bir ovalama işlemini güvenilir bir şekilde tasarlamak için, bu kusurların proses konfigürasyonuna göre önceden tahmin edilmesi gerekir. Ancak, proses konfigürasyonunun etkileri hakkındaki veri eksikliği nedeniyle, nihai ürünlerdeki kusurların tahmini şekillendirme esnasında tespit edilememektedir. Glaeser ve diğerleri [10], endüstriyel soğuk dövme işlemlerinde kusur tespiti için derin öğrenme tekniklerinin kullanılabilirliğini araştırmış ve endüstriyel yöntemlerle temizlenmiş verileri toplamıştır. Çalışma, elde edilen veriler sayesinde hataların tespit edilmesi ve önlenmesinde daha etkili olduğu iddiasıyla karakterize edilmekte, derin öğrenmenin endüstriyel sistemlerdeki potansiyelini ortaya koymakta ve gelecekte benzer araştırmalar için temel oluşturmaktadır. Shen ve Ai [8] soğuk dövme işlemi sırasında kalıplar üzerindeki kuvvetlerde oluşan tepe tonaj sinyalinin kalıpların ömrünü belirlemede önemli bir faktör olduğunu vurgulayarak dövme kuvvetlerinin doğru bir şekilde izlenmesi ve kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Çalışmalarında, çevrimiçi bir izleme sisteminin ve etkili öğrenme yöntemlerinin geliştirilmesinin, şekillendirme kalitesini ve ekipman koşullarını dinamik olarak izleme yeteneğini daha da geliştireceğini ve sonuçta mekanik bitmiş ürünün genel kalitesini artıracığını vurgulamışlardır.

Ovalama ve soğuk şekillendirme süreçlerinde meydana gelen hataların tanımlanması ve sınıflandırılması, üretim sürecini daha verimli ve güvenilir hale getirmeye yönelik önemli

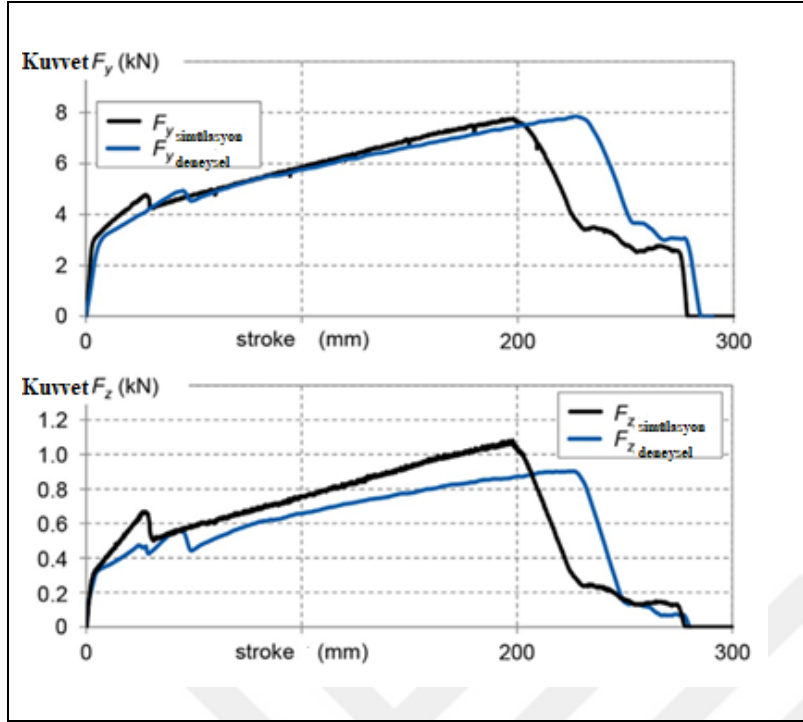
bir adımdır. Bu araştırmanın amacı, sürecin belirli konfigürasyonları nedeniyle meydana gelen kusurları gerçek zamanlı olarak anlayıp sınıflandırarak üretim verimliliğini artırmak ve kalite kontrolünü optimize etmektir. Bu sayede endüstriyel uygulamalarda yaşanan sorunlara daha etkin çözümler sunulması ve üretim sürecindeki hataların en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Ovalama işleminde meydana gelen hataların tespiti ve önlenmesine yönelik analiz yapılabilmesi için yapay zeka entegrasyonu ile geniş bir veri yelpazesi sunulacaktır.

Tez çalışması kapsamında mevcut hata tespitlerine yönelik sensör tercihleri incelenmiş, ovalama işlemine ve kalıp deformasyonunu tespit edecek sensör seçimi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu sensörler, üretim sürecindeki hataların proaktif olarak tespit edilmesi ve önlenmesi için önemlidir. Üretim sürecindeki hataları tespit etmek, analiz etmek ve önlemek için kullanılırlar.

Groche ve diğerleri [2] Ovalama işleminin incelenmesini sağlamak için, doğrudan kuvvet akışında besleme ve radyal yönde şekillendirme kuvvetlerinin ölçülmesine izin veren bir sensör kurulumu yapmıştır. Sayısal benzetim yöntemi sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Tribolojik sistemin deneysel çalışmasının tasarımı Şekil 2.16'da, besleme ve radyal yöndeki sayısal benzetim yöntemi ve deney sonuçları karşılaştırması Şekil 2.17'de verilmiştir.

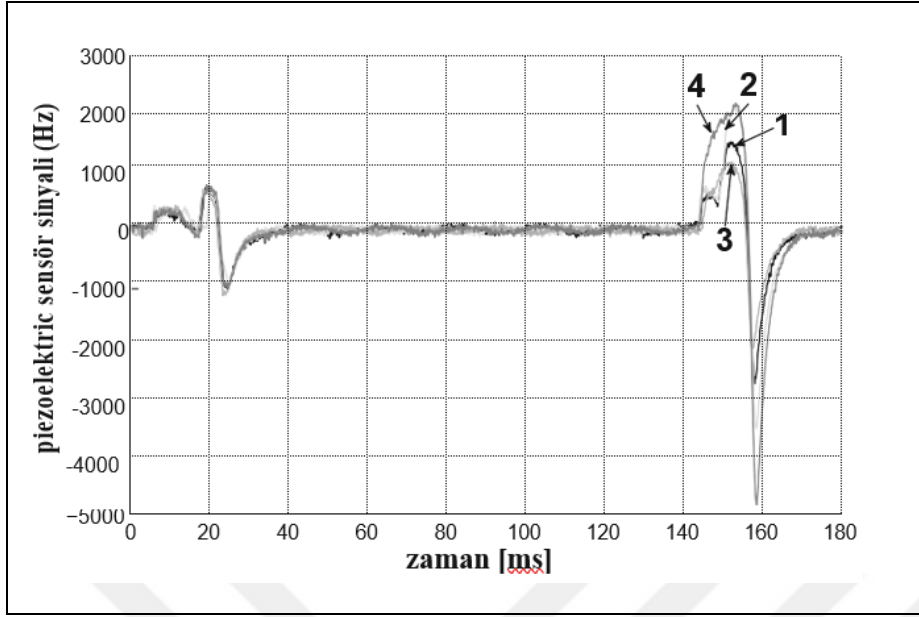


Şekil 2.16. Kuvvet ölçüm sensörü ve kalıplara kurulumu [2]



Şekil 2.17. Deneysel ve sayısal benzetim yöntemi ile ölçülen kuvvet değişimi [2]

Zabiński ve diğerleri [27], üretim süreçlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak için hesaplamalı yapay zeka yöntemlerinin endüstriyel ortamlarda nasıl uygulanabileceğini daha iyi anlamayı amaçlamıştır. Çalışma sonuçları, kestirimci bakım stratejilerini uygulamak ve üretim operasyonlarını optimize etmek için piezoelektrik sensör verileriyle elde edilen sinyallere dayanmaktadır (Şekil 2.18).

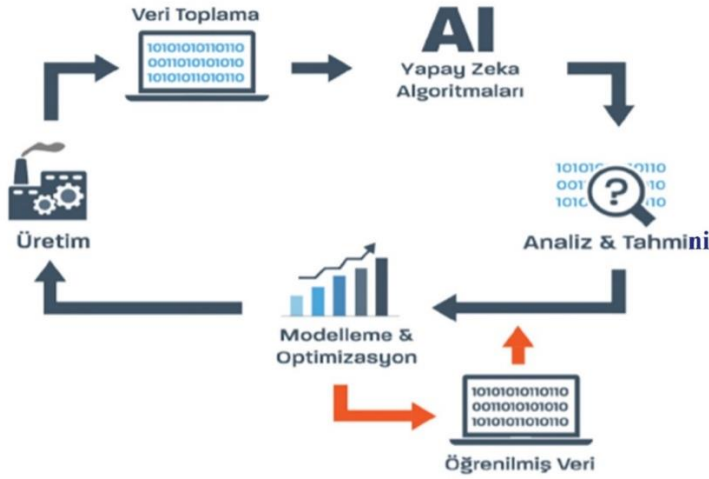


Şekil 2.18. Piezoelektrik sensör deneyi için sinyal modelleri [27]

2.5. Makine Öğrenmesi

Veri setinin özelliklerine ve hedeflerine bağlı olarak en uygun yöntemin seçilmesi önemlidir. Hata analizi için sensörler ve makine öğrenmesi ikilisi üretim süreçlerindeki hataları tespit etmek, analiz etmek ve önlemek için güçlü bir kombinasyondur. Makine öğrenmesi için uygun modelin seçilmesi hata tahminleme ve doğruluk metrikleri ile tahminin doğruluğu aşamasından oluşur. Hata tahminlemede makine öğrenmesi yöntemleri, verileri analiz ederek gelecekteki hataları tahmin edebilir. Makine öğrenmesi özellikle kategorik verilerle ilgilenir. Bu veriler hata tahmin modelleri oluşturmak için kullanılabilir. Doğruluk Metrikleri, doğruluk ölçümleri, makine öğrenmesi modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu metrikler, modelin tahminlerinin gerçek değere ne kadar yakın olduğunu gösterir.

Makine öğrenmesi döngüsü, başlangıçta veri toplama ve hazırlama ile başlar. Bu adım, veriyi temizlemeyi, eksik değerleri doldurmayı ve aykırı değerleri işlemeyi içerir. Ardından, veri ön işleme ve özellik mühendisliği aşamasında veri uygun hale getirilir ve makine öğrenmesi algoritmaları için hazırlanır. Daha sonra, uygun bir model seçilir ve eğitilir; eğitim seti üzerinde modelin performansı değerlendirilir. Makine öğrenmesi döngüsü Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Makine öğrenmesi döngüsünün gösterimi [28]

Üretim süreçlerinde sensörler üretim hattındaki hataları tespit ederken, makine öğrenmesi modelleri bu verileri analiz ederek gelecekteki hataları tahmin edebilir. Böylece hatalar önlenir ve üretkenlik artırılır. Makine öğrenmesi, tasarım aşamasında olası hataları tahmin edebilir. Tasarım HMEA (Hata Modu ve Etkileri Analizi) yöntemleri, tasarım sorunlarını erken bir aşamada belirleyebilir ve ortadan kaldırabilir. Sonuç olarak, sensörler tarafından sağlanan verilerin makine öğrenmesi modelleriyle analiz edilmesi, hataları en aza indirmek ve üretim süreçlerinde kaliteyi artırmak için güçlü bir yaklaşımdır. Bu sayede şirketler daha verimli ve hatasız üretim süreçleri sağlayabilir.

2.5.1. Makine öğrenmesi yöntemleri

"Yapay zekâ" terimi, insan zekasını taklit etmek üzere tasarlanmış makineler için kullanılmaktadır. Amaç, konuşma tanıma, görüntü tanıma, karar verme ve çeviri dahil olmak üzere insanların geleneksel olarak gerçekleştirdiği görevleri tahmin etmek, otomatikleştirmek ve optimize etmektir. Makine öğrenmesi, verilerden örüntülerin çıkarılması ve sonuçların tahmin edilmesi için algoritmaların geliştirilmesiyle ilgilenen bir yapay zekâ ve bilgisayar bilimi alanıdır. Denetimli öğrenme, makine öğrenmesinin bir alt alanını temsil eder ve bilinen sonuçlara sahip etiketli verilere dayalı tahmin modellerinin oluşturulmasına yönelik algoritmaları içerir. Buna karşılık, denetimsiz öğrenme, etiketlenmemiş verilerden örüntülerin keşfedilmesine adanmış makine öğrenmesinin bir alt alanını oluşturur [29]. Endüstride büyük ölçekli, doğrusal olmayan algılama ve kontrol

problemlerinin çözümünde pratik sonuçlar elde eden temel önemli sayıda algoritma Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Veriye dayalı analiz yöntemleri: yukarıdan aşağıya doğru üç bölüme ayrılmıştır: (1) istatistiksel öğrenme, (2) makine öğrenmesi ve derin öğrenme ve (3) takviyeli öğrenme ve kontrol yöntemleri [29]

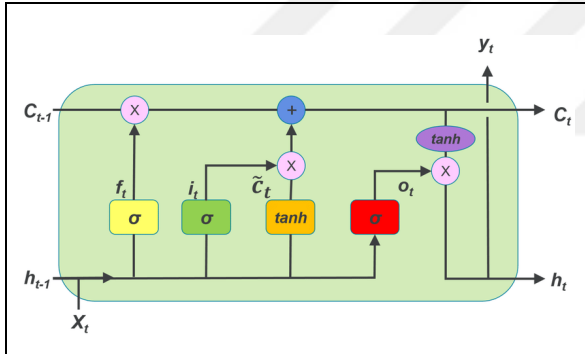
CCA	Kanonik korelasyon analizi	LASSO	En az mutlak büzülme ve seçim operatörü
FA	Faktöriyel analiz	LR	Lojistik regresyon
GMM	Gauss karışım modeli	PCA	Temel bileşen analizi
ICA	Bağımsız bileşen analizi	PLS	Kısmi en küçük kareler
LARS	En küçük açılı regresyon	RBC	Yeniden yapılandırma tabanlı katkı
ANFIS	Uyarlanabilir ağ bulanık çıkarım sistemi	GRNN	Genel regresyon nöral ağ
ANN	Yapay sinir ağı	MLP	Çok katmanlı algılayıcı
BN	Bayes ağı	RBFNN	Radyal temel fonksiyon nöral ağ
CNN	Evrişimli sinir ağı	RNN	Tekrarlayan sinir ağı
DNNE	Dekorla ilişkili sinir ağı topluluk	RT	Regresyon ağacı
DNN	Derin sinir ağı	RVM	Alaka vektör makinesi
ELM	Aşırı öğrenen makine	SFA	Yavaş özellik analizi
ESN	Yankı durumu ağı	SVM	Destek vektör makinesi
A3C	Asenkron avantaj aktör eleştirici	PI ²	Yol ile politika iyileştirme integralleri
ADP	Yaklaşık dinamik programlama	PID	Orantılı-integral-türev
DDPG	Derin deterministik politika gradyanı	PPO	Proksimal politika optimizasyonu
DQN	Derin Q-ağ	RTO	Gerçek zamanlı optimizasyon
HJB	Hamilton-Jacobi-Bellman	SAC	Yumuşak aktör-eleştirmen
MPC	Model öngörülü kontrol	TD3	İkiz gecikmeli DDPG

Derin öğrenme yöntemleri özellikle büyük veri setleri ve karmaşık sinyallerle uğraşırken kullanışlıdır. Derin öğrenme, insan beyninin işleyişini taklit eden yapay sinir ağları ve hesaplama sistemleri kavramına dayanmaktadır. Bu alandaki modeller, başarılı tahminler yapmak için büyük veri setleri üzerinde eğitilebilir. Temel derin öğrenme modelleri:

Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) görüntü analizi için kullanılır. Konvolüsyonel sinir ağları olarak da adlandırılır. Bu modeller özellik çıkarma ve sınıflandırma görevleri için etkilidir. Örneğin, görüntü tanıma, yüz tanıma ve nesne tespitinde yaygın olarak kullanılırlar.

Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN), zaman serisi işleme ve doğal dil işleme gibi alanlarda etkili olan RNN'ler, önceki adımlardan gelen bilgileri depolayarak sürekli verileri işleyebilmektedir.

Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağları, sıralı verilerdeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmek için tasarlanmış özel bir tekrarlayan sinir ağı türüdür. Standart RNN'lerin aksine, LSTM'ler Şekil 2.20'de gösterildiği gibi unutmama, giriş ve çıkış kapıları adı verilen mekanizmalara sahiptir. Bu kapılar, hücre durumunu güncelleyerek hangi bilginin saklanacağı, hangi bilginin atılacağı ve hangi bilginin sonraki hücrelere iletileceği konusunda karar verir. Böylece LSTM'ler, uzun metinlerdeki bağlamları, zaman serilerindeki trendleri ve diğer sıralı verilerdeki karmaşık yapıları daha etkili bir şekilde modelleyebilir. Bu özellikleri sayesinde doğal dil işleme, zaman serisi analizi ve birçok diğer alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Eş. 2.7'de LSTM fonksiyon yapısı gösterilmiştir [6].



Şekil 2.20. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) sinir ağı

$$\begin{aligned}
 i_t &= \sigma(W_{xi}x_t + W_{hi}h_t + b_i) \\
 f_t &= \sigma(W_{xf}x_t + W_{hf}h_t + b_f) \\
 o_t &= \sigma(W_{xo}x_t + W_{ho}h_t + b_o) \\
 \bar{c}_t &= \tanh(W_{xc}x_t + W_{hc}h_{t-1} + b_c) \\
 c_t &= f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \bar{c}_t \\
 h_t &= \tanh(o_t \odot c_t)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Burada σ lojistik sigmoid fonksiyonu, $\odot$ hadamart (element bazında) çarpımı; W_i, W_f, W_o, W_c yinelenen ağırlık matrisleri; b_i, b_f, b_o, b_c ön yargı terimleridir. Gizli bir

birime h_t ek olarak LSTM; bir giriş kapısı i_t , kayıp kapı f_t , çıkış kapısı o_t , giriş modülasyon kapısı $\bar{c}_t$ ve bellek hücresi c_t içerir.

Boltzman Makineleri (BM) ve Kısıtlanmış Boltzman Makineleri (RBM) olarak adlandırılan modeller, hızlı öğrenme algoritmalarıdır. Özellikle olasılıksal modeller ve veri boyutunu azaltma (boyut indirgeme) için kullanılırlar. Derin İnanç Ağları (DBN), önceki bölümde verilen RBM'lerin yığınıdır. Genellikle özellik çıkarımı ve sınıflandırma görevlerinde kullanılırlar. Derin Oto Kodlayıcılar (DAE) ve Oto-Kodlayıcılar (AE), veri boyutunu azaltmak için kullanılır. Veriye özgü bir temsil oluşturmak amacıyla girdi verisini sıkıştırır ve ardından tekrar genişletirler.





3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında, ovalama işleminde kalıplarda meydana gelen kusurları, kusurların tribolojik etkenlere bağlı nedenlerini araştırmak ve gerinim sensörü ile elde edilecek verilerle makine öğrenmesi yöntemiyle kusurların işlem sırasında tespit edilmesine yönelik yaklaşım geliştirmek ve neden-sonuç ilişkisini ortaya koymak amaçlanmıştır. Bu çalışma, yaygın olarak kullanılan bir malzeme örneği üzerinde gerçekleştirilen ovalama işleminin kuvvet ve frekans analizlerini içermekte ve bu analizler sayısal benzetim yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmaktadır.

Araştırmada, özellikle kalıp deformasyonları ve bunların kalıp üzerinde olası hatalara neden olan etkileri üzerinde durulmuştur. Kalıp deformasyonundan kaynaklanan bu anomaliler, gerçek ortam testleri ve sayısal benzetim yöntemi analizleri yoluyla karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler, kalıp kullanımında meydana gelebilecek olası hataları ve güçlükleri önceden tahmin etmeye yönelik değerli bilgiler sağlamaktadır.

3.1. Simufact ile Ovalama İşleminin Modellenmesi ve Analizi

Diş açma konusunda endüstriyel uygulama çokluğuna rağmen, süreç davranışını ölçen ve süreç parametrelerini birbirine bağlayan ayrıntılı bilgi ve modellerin eksikliği vardır. Yapılan çalışmalarda, vida diş açma işlemindeki metal deformasyonu iki boyutlu düzlem gerinim problemine göre basitleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada ise ovalama işleminde yaygın olarak kullanılan K340 çeliğinden imal kalıbın sayısal benzetim yöntemi ile gerinim değişimi incelenmiş olup, kalıbın fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Soğuk şekillendirme işlemi sırasında kalıba etki eden kuvvetlerin kalıp üzerinde meydana getirdiği deformasyonu Resim 3.1’de görsel olarak belirtilmektedir. Sayısal benzetim yöntemi ile farklı işleme koşullarında kalıba etki eden basınç ve kuvvet değerleri analiz edilerek, gerçek koşullarda ortaya çıkan olası hata senaryoları değerlendirilmiş ve üretim sürecinin optimize edilmesi için veri sağlanması amaçlanmıştır.

Çizelge 3.1. K340 çeliği fiziksel özellikleri

Parametre	Değer
Sıcaklık (°C)	20
Yoğunluk (kg/dm ³)	7,68
Termal iletkenlik (W/(m.K))	17,8
Özgül ısı kapasitesi (kJ/kg K)	0,49
Spes. elektrik direnci (Ohm.mm ² /m)	40,6
Elastikiyet modülü (10 ³ N/mm ²)	206

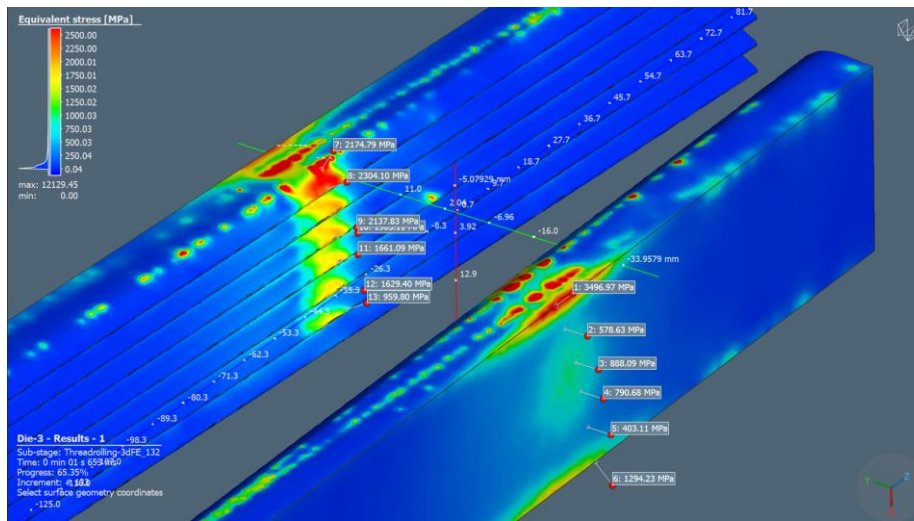


Resim 3.1. Deforme olmuş (sol) ve sağlam kalıp (sağ) optik projektör ile görünümü

Simufact, endüstriyel süreçlerde kullanılan bir sayısal benzetim yöntemi yazılımıdır ve bu yazılım genellikle metal şekillendirme, kaynak, döküm gibi üretim süreçlerinde kullanılır. Çizelge 3.2’de Simufact Forming 2023.2 programı ile yapılan ovalama işlemine ait sayısal benzetim yöntemi parametreleri verilmiştir. Simufact kullanılarak yapılan ovalama işlemi sayısal benzetim yönteminde, malzeme üzerine uygulanan kuvvetlerin ve şekillendirme işlemi analizine ait görüntü Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Simufact Forming 2023.2 programı ile sayısal benzetim yöntemi analiz parametreleri

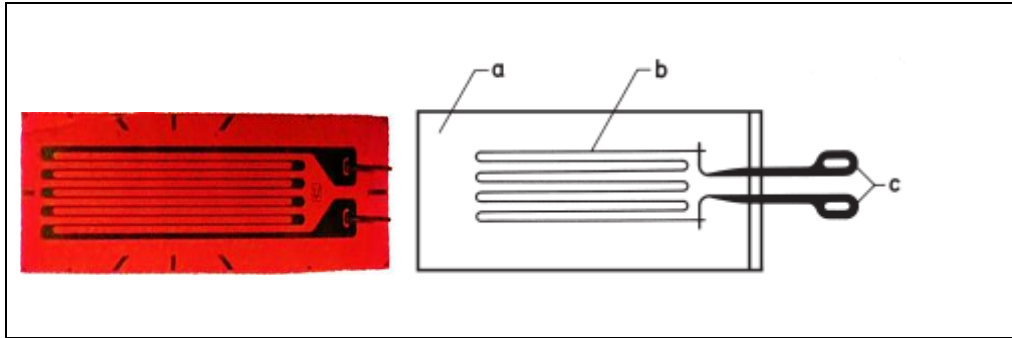
Parametre	Değer
Kalıp Malzeme Cinsi	K340
Kalıp Malzeme Sertliği, HRC	60-61
Vida Malzeme Cinsi	19MnB4
Vida çap ölçüsü, mm	Ø3,50
Kalıp Diş Açısı	30°
Kalıp Diş Adımı, mm	2,24
Kalıp Diş Üstü Çapı, mm	Ø5,0 – 5,18
Kalıp Diş Dibi Çapı, mm	Ø2,68 – 2,83
Başlangıç Kalıp Sıcaklığı, C°	20
Başlangıç Vida Sıcaklığı, C°	20
Mesh eleman sayısı	174.922 adet, 199.723 adet ve 261.382 adet
Kalıp stroke süresi, s	0,26
Stroke miktarı, mm	220



Şekil 3.1. Sayısal benzetim yöntemi modeli

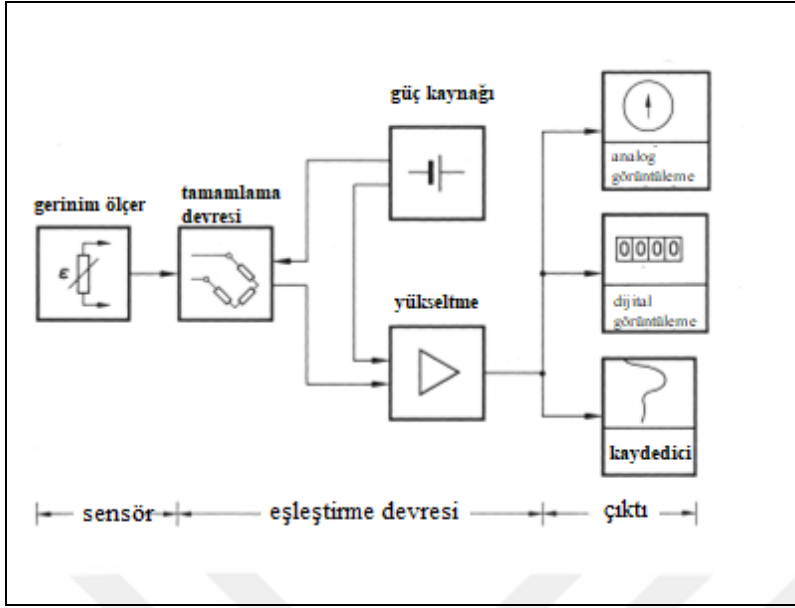
3.2. Gerinim Ölçer (Strain gauge) ile Kuvvet Sinyallerinin Toplanması

Makinelerin, binaların, araçların, uçakların vb. yapısal parçalarını değerlendirmenin olağan yolu, malzeme mukavemeti hesaplamalarına dayanmaktadır. Operasyonel koşullar altında mekanik gerilmeleri belirlemek neredeyse imkansızdır. Malzeme gerilimlerinin deneysel olarak belirlenmesine yönelik pratik bir yöntem, 1678 yılında İngiliz bilim adamı Robert Hooke (1635-1703) tarafından yapılan bir keşfe dayanmaktadır. Hooke, malzeme gerilimi ile ortaya çıkan ve “gerinim” olarak adlandırdığı deformasyon arasında bir ilişki gözlemlemiştir. Bu deformasyon aynı zamanda nesnelerin yüzeyinde de meydana gelir ve ölçüm için erişilebilir hale gelir [30]. Ölçüm nesnesinden gerinim ölçere aktarılan gerinim, elektrik direncinde bir değişikliğe neden olur. Gerinim ölçerler, dış kuvvetlerin neden olduğu uzunluk değişikliklerini ölçer ve bunları elektrik sinyallerine dönüştürür; bu sinyaller daha sonra analiz için dijital değerlere dönüştürülebilir. Gerinim ölçer sensörleri, malzeme üzerindeki çok küçük gerinim değişikliklerini dahi hassas bir şekilde ölçebilme, küçük boyutlarda üretilebilir ve farklı geometrik şekillere sahip yüzeylere kolayca monte edilebilme kabiliyeti nedeniyle seçilmiştir. Gerinim ölçerler, malzemenin boyutundaki en küçük değişimi bile elektriksel bir sinyal olarak doğrudan ölçebilir. Bu sayede, gerilme veya basınç gibi diğer parametrelerin dolaylı olarak hesaplanmasına olanak tanır. Şekil 3.2’de deneyde kullanılan gerinim ölçer sensör gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Gerinim ölçerin karakteristik tasarımı (a-taşıyıcı malzeme b-ölçüm ızgarası c-bağlantılar) [30]

Gerinim ölçer (Strain Gauge) sensörleri, geniş bir ölçüm aralığına sahiptir. Bu özellik, farklı malzemelerde veya işlem koşullarında oluşabilecek çeşitli gerinim değerlerini ölçmek için uygundur. Gerinim ölçer ile ölçüm sisteminin şeması Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

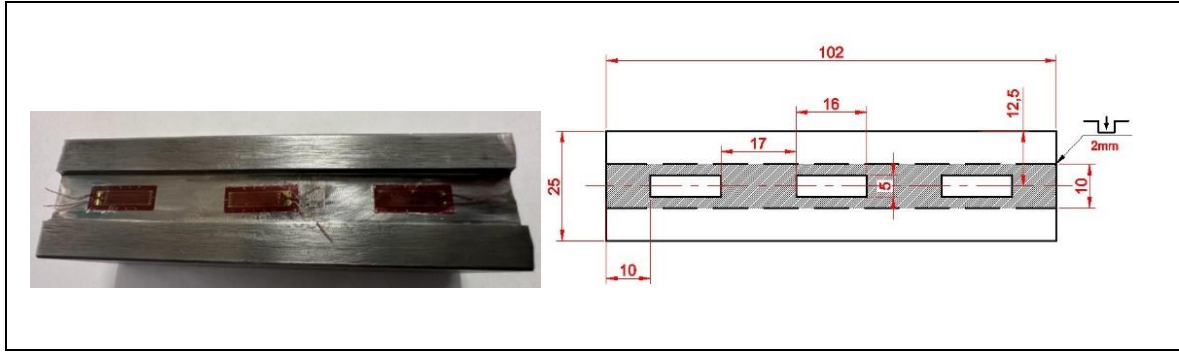


Şekil 3.3. Gerinim ölçer ile ölçüm sisteminin şeması [30]

Metaller için gerinim ölçerin çalışma prensibi, Wheatstone ve Thomson tarafından keşfedilen elektrik iletkenlerinin gerinim/direnç ilişkisine dayanmaktadır [30]. Gerinim ölçer: bir metalik folyo şeridi veya posta pulu gibi bir yüzeye tutturulabilen bir yarı iletken malzeme (tel) şeridinden oluşur. Gerinim ölçere gerilim uygulandığında, tel hafifçe gerilir ve kesit alanı değiştiği için direnci (R) de değişir. Dirençteki değişim ($\Delta R/R$) değişim gerinim ile orantılıdır. Ölçüm katsayısı (k) olarak da adlandırılan gerilme duyarlılığı Eş. 3.1’de gösterilmiştir.

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Gerinim ölçer sensörler küçük ebatlarda üretildiğinden deney için seçilen gerinim ölçer sensörler Resim 3.2’de görüldüğü gibi ovalama kalıbı üzerinde 3 noktaya yerleştirilmiştir. Sensörlerden ölçülen değerlerin ortalaması ile gerinim değişimi ölçülmüştür. Sensörler için girilen ayar parametreleri ise Çizelge 3.3’de verilmiştir.



Resim 3.2. Deneyde kullanılan kalıp üzerine yerleştirilmiş gerinim ölçerler

Çizelge 3.3. Gerinim ölçer (Strain gauge) sensör test parametreleri

Parametre	Değer
Ölçüm türü	Bridge*
Skala	1000 mV/V
Low-pass filtresi	10 Hz
Low-pass tipi	Bessel
Sensör özelliği	Quarter 3-wire, 120 ohm
Bridge shunt**	Sns+100kOhm
Strain gauge üzerine uygulanan voltaj	2,5 v
Sensörün hassasiyeti (k)	2
Bridge faktörü	1
Örnekleme hızı (adet/sn)	20.000
Birim	Microstrain
Lead Wire compesation	1

*Bridge: strain gauge'ler ile gerinim ölçümlerinde elektrik direncini ölçmek için köprü devresini ifade etmektedir.

**Bridge shunt: farklı direnç değerleri varsa yazılımda otomatik olarak algılanacağı ve ona göre hesaplatma yapacağı anlamına geliyor.

3.3. Veri Toplama Sistemi Donanım Özellikleri (IoT)

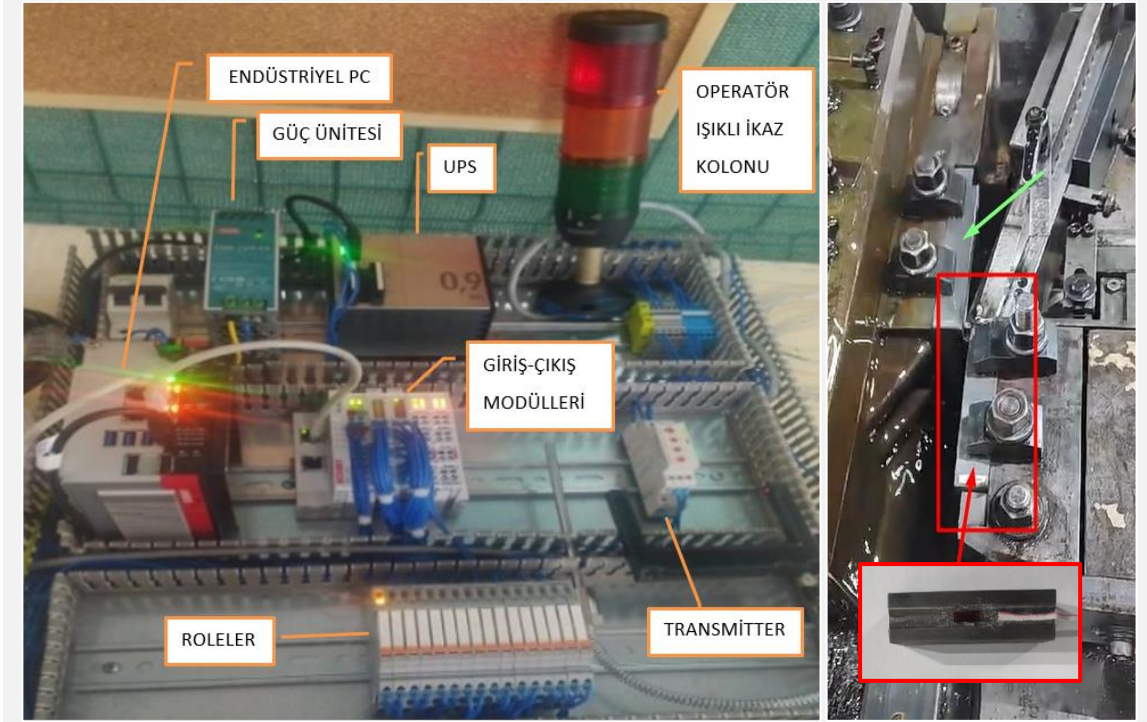
Hataların tespiti hususunda gerekli ölçüm ve data bilgilerinin alınabileceği prototip test düzeneği oluşturulması, vida imalatındaki ovalama kalıplarında meydana gelen hataların kuvvet etkisinin incelenmesi sağlanmıştır. Hazırlanan prototip veri alma ünitesi, ovalama cihazına entegre edilen bir sistemdir ve gerçek zamanlı veri toplama işlevselliği sağlar. Bu sistem, çeşitli bileşenleri barındırarak özelleştirilmiş bir yapıya sahiptir. İlk olarak, güç ünitesi, sistemin çalışması için gerekli olan elektrik gücünü sağlar. Veri kaydedici (Data logger) ovalama işlemi sırasında elde edilen verileri kaydederek depolar. Bu veriler daha sonra analiz için kullanılır. Röle, arzu edilen koşullar altında işlemi durdurmak ve arzu edilen işlevleri etkinleştirmek için kullanılmaktadır. Verici (Transmitter), toplanan verileri uzaktan iletebilme yeteneğine sahiptir, bu da sistemde uzaktan erişim ve izleme sağlama özellikleri ile sisteme entegre edilmiştir. Kesintisiz güç kaynağı (UPS), elektrik kesintileri sırasında sistemin çalışmasını ve veri kaybını önlemek amacıyla sisteme eklenmiştir. Endüstriyel bilgisayar veri toplama, analiz ve kontrol için güçlü bir işlem kapasitesi sunarak yazılım araçlarıyla entegre olarak kullanılmıştır.

Özelleştirilmiş veri toplama sistemi, güç aşımı gibi olası sorunları algılamak için ikazlı uyarı ışığı gibi alarm sistemleri ile donatılmıştır. Bu sayede, sistemdeki aşırı güç tüketimi veya diğer kritik durumlar hakkında kullanıcıya anlık bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada yer alan veri toplama sistemine ilişkin teknik donanıma ait bilgilere Çizelge 3.4'te yer verilmiştir.

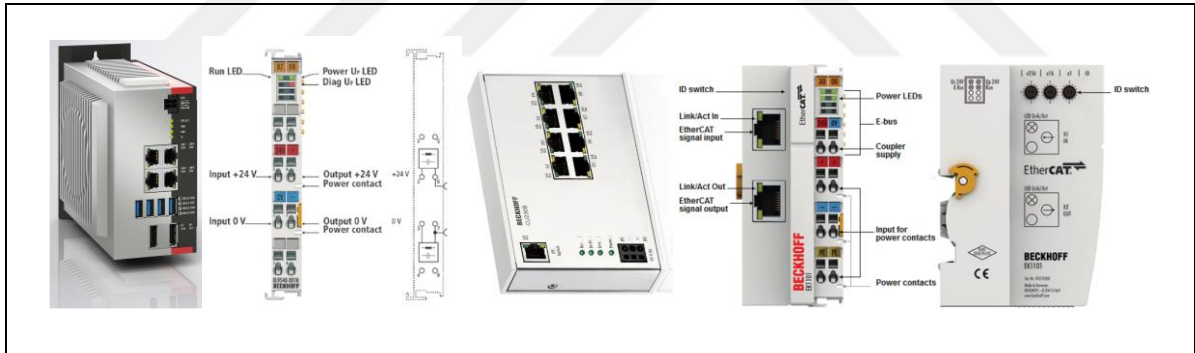
Çizelge 3.4. Araştırmada kullanılan test donanımına ait teknik bilgiler

Donanım	Marka	Teknik Özellikleri	Haberleşme Protokolü
Endüstriyel PC	Beckhoff	✓ İşlemci 6. Nesil Intel® Pentium® G4400, 3.3 GHz, 2 çekirdek ✓ 8 GB DDR4 RAM ✓ 80 GB M.2 SSD ✓ Microsoft Windows 10 IoT Enterprise 2019 LTSC, 64 bit, English, for Industrial PCs	EtherCAT
Real-time Ethernet çoklayıcı	Beckhoff	✓ 8 adede kadar Ethernet ağının bağlanmasına olanak tanır	EtherCAT
Kapasitif UPS	Beckhoff	✓ 110 W	DC
Güç Ünitesi	Siemens	✓ 20 Amper, 24VDC	DC
Veri toplama cihazı	Monodaq	✓ Maks. örnekleme hızı: 50 kS/s, çözünürlük: 16 bit	EtherCAT
Gerinim ölçer (strain gauge)	Kyowa	✓ Gage Factor $2.11 \pm 1.0\%$ ✓ Gage Length 10 mm ✓ Gage Resistance $119.6 \Omega \pm 0.4\%$ ✓ Transfer Sensitivity Ratio $(0.2 \pm 0.2)\%$	DC
Ovalama Makinesi	Top Stability	✓ SW5L-66	-

Tüm bu bileşenler bir araya getirilerek oluşturulan prototip veri alma ünitesi, ovalama cihazında gerçek zamanlı veri toplama, güç yönetimi ve aşırı durumların tespit edilmesi gibi önemli fonksiyonları başarıyla yerine getirir. Bu şekilde, endüstriyel süreçlerde güvenilirlik, verimlilik ve kalite kontrolü sağlamak için önemli bir araç haline gelmesi hedeflenmiştir. Veri işleme terminali ile gerinim ölçer gerçek zamanlı deneyler için kritik öneme sahip bir yapıdır. Bu sistem, özellikle kalıp üzerindeki deformasyonu hassas bir şekilde ölçmek ve verileri anlık olarak işlemek için kullanılmıştır. Resim 3.3’de veri işleme terminali, Resim 3.4’de ise kullanılan donanım gösterilmiştir.



Resim 3.3. Veri işleme terminali ile gerinim ölçer (ttrain gauge)'ın kalıp üzerinde yerleşimi



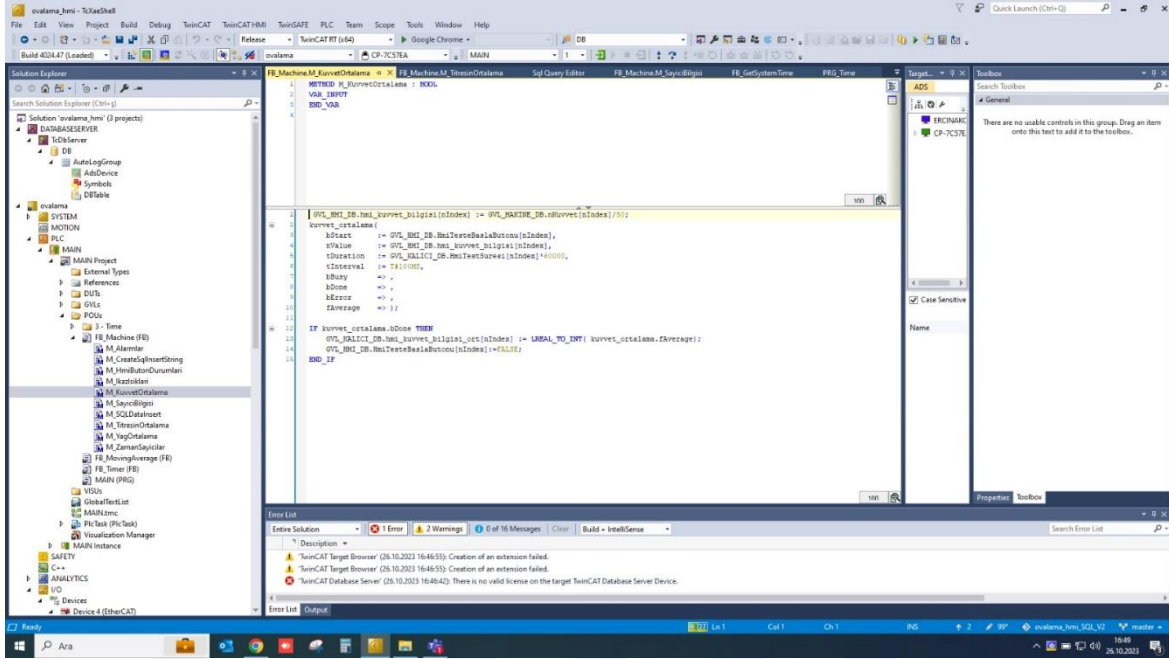
Resim 3.4. Beckhoff marka endüstriyel PC ve entegre edilebilir sinyal giriş-çıkış modülleri

3.4. Veri Toplama Mimarisi

Kusurların tespit edilmesi ve nihai verilerin elde edilmesi için veri toplama yöntemleri kullanılır. Veri toplama sistemi mimarisi, kusurların tespiti ve nihai verilerin elde edilmesi için kullanılan yöntemlerin bir bütünüdür. Bu mimari, büyük ve karmaşık veri kümelerini etkin bir şekilde yönetmek, depolamak, işlemek ve analiz etmek amacıyla kapsamlı bir çerçeve sunar. Özellikle endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemleri için kritik öneme sahiptir.

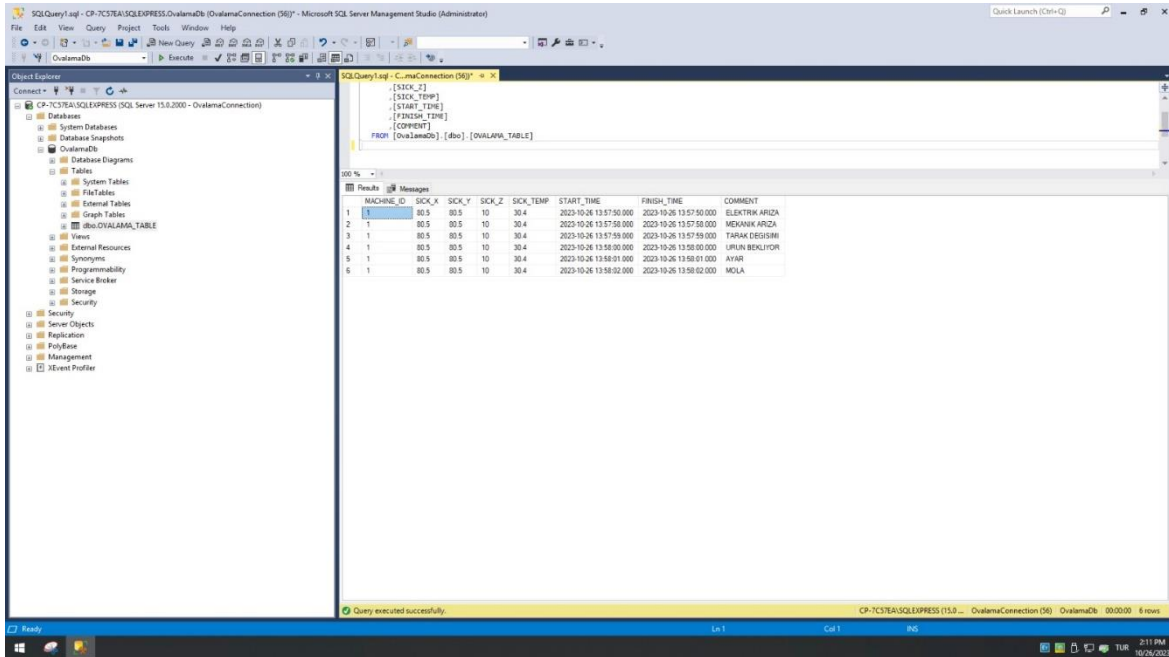
TwinCAT fonksiyon blok diyagramı ve SCL (Structured Control Language) kullanımı, bu mimarinin temel bileşenlerinden biridir. Resim 3.5’de gösterilen TwinCAT fonksiyon blok diyagramı, veri toplama sürecinde kullanılan çeşitli işlev bloklarını ve bunların birbirleriyle olan ilişkilerini gösterir. Bu bloklar genellikle sensör verilerini okuma, verileri işleme, hata analizi yapma ve sonuçları kullanıcıya veya diğer sistemlere iletmek gibi görevleri yerine getirir.

SCL, dil yapısı gereği veri işleme ve kontrol algoritmalarının yazılmasında kullanılır. Resim 3.5’de sunulan SCL örneği, bu programlama dilinin nasıl kullanıldığını ve veri toplama sürecinde nasıl entegre edildiğini göstermektedir. SCL, özellikle karmaşık veri analizleri veya kontrol stratejileri için esneklik sağlar ve sistemdeki veri akışını yönetmeye yardımcı olması sebebiyle kullanılmıştır.



Resim 3.5. TwinCAT fonksiyon blok diyagramı, SCL (structured control language)

SQL veri tabanı yapısının detaylandırılması, araştırmanın veri yönetimi ve analiz süreçlerinde önemli bir adımdır ve toplanan verilerin düzenli ve anlamlı bir şekilde organize edilmesini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur (Resim 3.6).



Resim 3.6. SQL (veri depolama alanı)

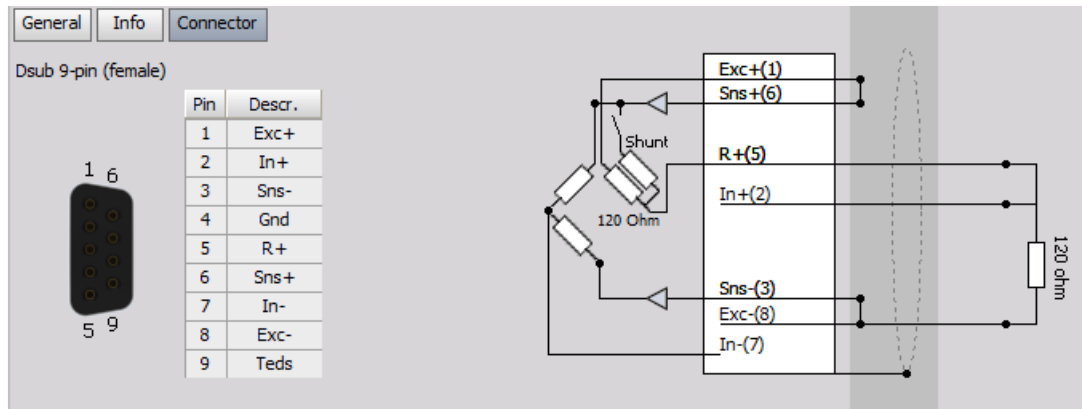
3.5. Veri Toplama Cihazı

Veri toplama yöntemleri ve araçları, sorunun tipine, veri türüne ve araştırma tasarımına bağlı olarak seçilir. Veri toplama cihazları sensörlerden gelen sinyalleri ölçmek ve bunları dijital formata dönüştürmek için kullanılan cihazlardır. Ölçülen sinyaller, voltaj, akım, sıcaklık, basınç, ışık, ses, titreşim gibi çeşitli sinyalleri bilgisayarlarda analiz edilmek ve işlenmek üzere kaydetmek için kullanılır. Projede kullanılan MonoDAQ marka veri toplama cihazına ait resim Resim 3.7’de, sensör bağlantı şeması ise Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Resim 3.7. MonoDAQ marka veri toplama cihazı

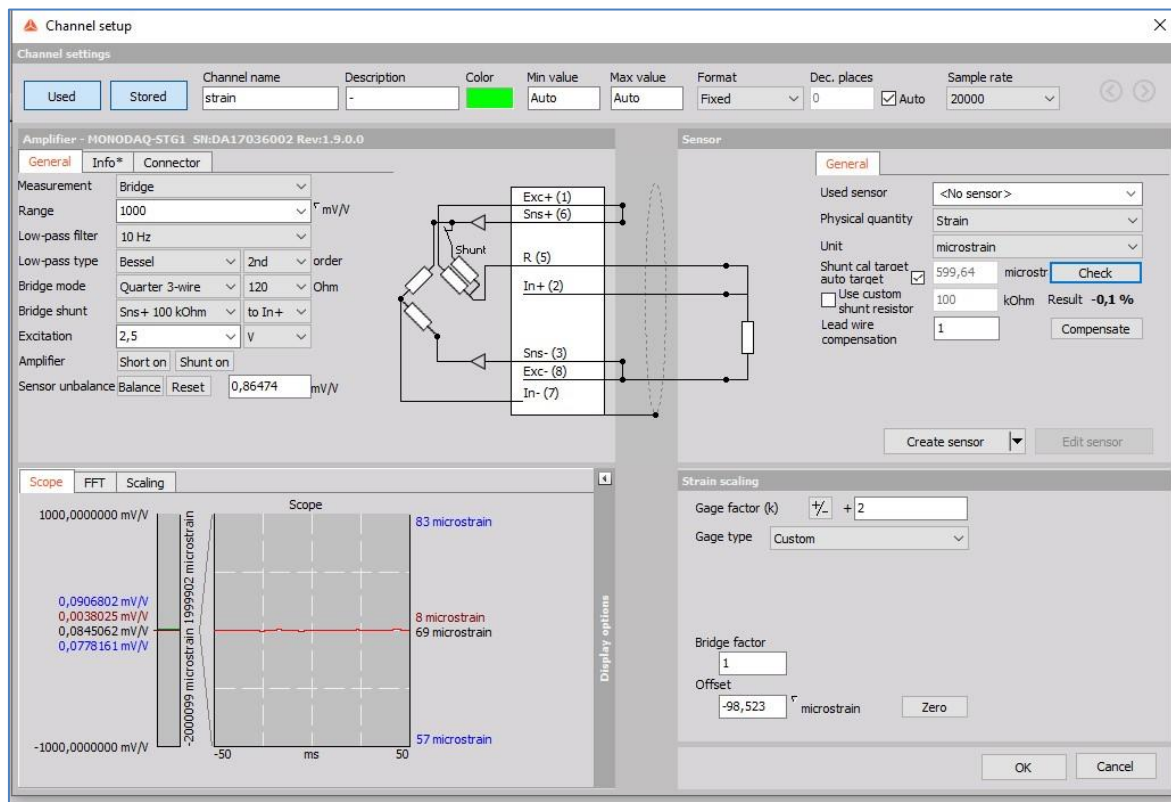
Gerinim ölçerin veri toplama cihazına bağlantı şeması Şekil 3.5’de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Gerinim ölçer (strain gauge)’in veri toplama cihazına bağlantı şeması

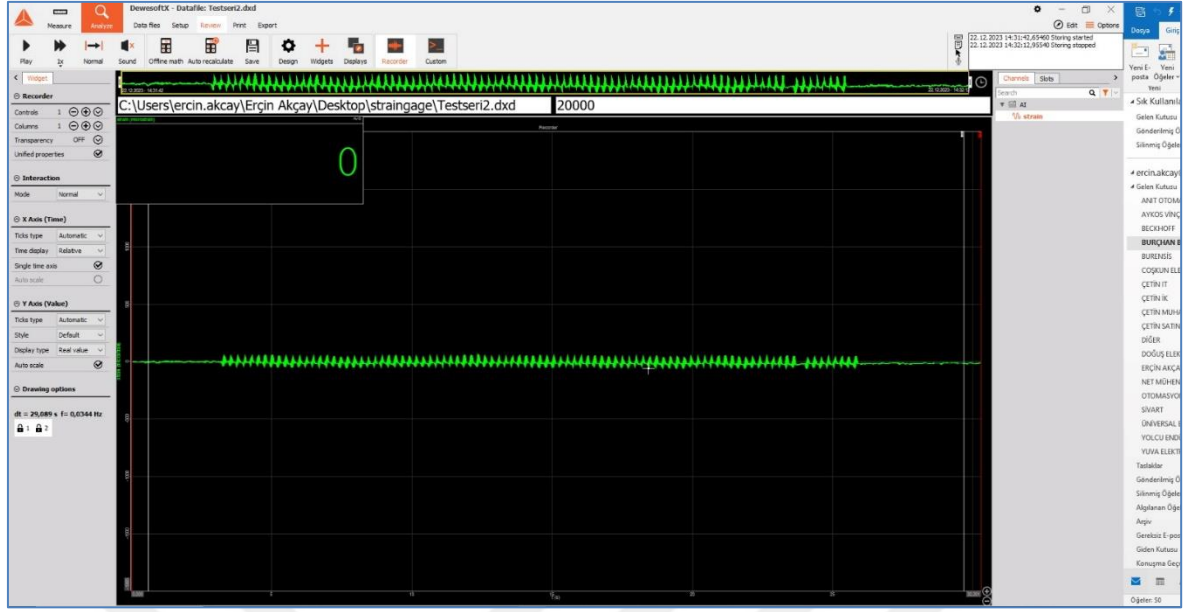
3.6. Veri Toplama Sistemi Uygulama Özellikleri

Veri toplama sistemlerinde uygulama özellikleri ve ayar parametreleri genellikle seçilen sensörün özelliklerine ve kullanım senaryosuna göre yapılandırılmaktadır. Bu sistemler, ölçülen verilerin doğru bir şekilde toplanması, işlenmesi ve analiz edilmesi için çeşitli ayar seçenekleri sunmaktadır. Sensörün bağlantı şekli, teknik parametreleri, ölçüm tipi, filtreleme ve frekans ayarları, ölçüm tipi özellikleri, örnekleme frekansı DewesoftX kullanıcı arayüzü üzerinden ayarlanmıştır (Resim 3.8).



Resim 3.8. DewesoftX veri toplama yazılımı ayar ekranı

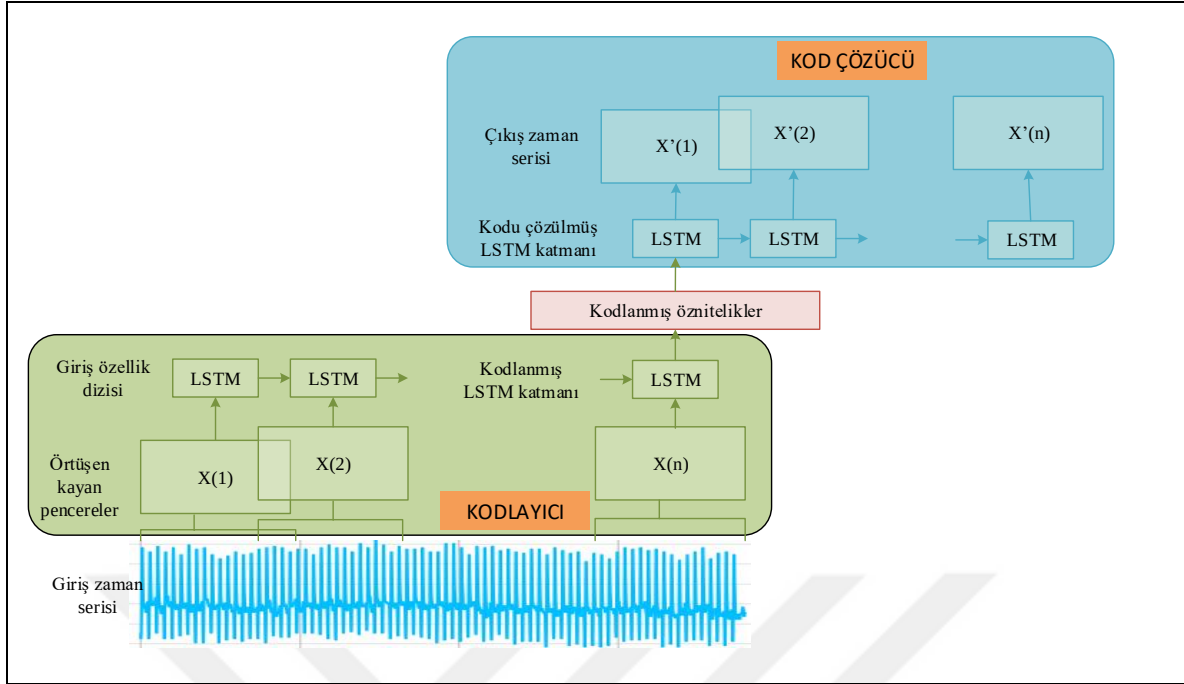
DewesoftX ölçüm ekranı, hem mühendislik tasarımı ve test süreçlerinde hem de araştırma ve geliştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir araç olarak kullanılmaktadır. DewesoftX ölçüm ekranı, kullanıcıların gerçek zamanlı ölçüm verilerini görsel olarak izlemek, kaydetmek ve analiz etmek için kullanılmıştır (Resim 3.9).



Resim 3.9. DewesoftX ölçüm ekranı

3.7. LSTM ile Ovalama Makinesi Anomali Tespiti

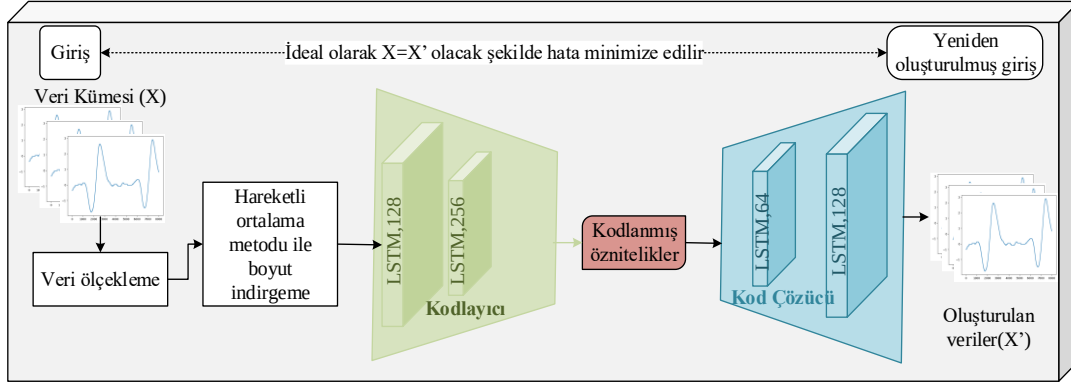
LSTM oto kodlayıcılar kodlayıcı ve kod çözücü olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Oto kodlayıcılar giriş verisini sıkıştırarak bir özet kod üretir ve ardından bu kodu kullanarak orijinal veriyi yeniden oluşturur. LSTM bellekli ve hatırlama yapıları nedeni ile zaman serilerindeki uzun ve kısa süreli vadeli bağımlılıkları öğrenme yeteneğine sahiptir. Otomatik kodlayıcı ise girişini çıkışına kopyalamak için tasarlanmış bir sinir ağıdır. İç katmanlarda girişi bir temsil ile kodlayan gizli katmanı da bulunur. Oto kodlayıcı ağ giriş sinyali ile çıkış sinyali arasındaki farkı en aza indirecek şekilde eğitilerek gizli katmandaki verimli veri kodlamayı öğrenir. Bir LSTM otomatik kodlayıcı ise bu iki kavramı birleştirerek zamansal giriş dizilerinin temsillerini öğrenmek için LSTM katmanlarını kullanır. Şekil 3.5’de LSTM tabanlı bir otomatik kodlayıcının zaman serisi üzerinde iki modülünün gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.5. LSTM otomatik kodlayıcı ile zaman serisi modelleme

Şekil 3.5’de verilen mimari genel olarak bir LSTM otomatik kodlayıcıdaki temel üç yapıyı göstermektedir. Veri seti olan tek değişkenli veya çok değişkenli zaman serisi olarak LSTM otomatik kodlayıcıya verilir. Zaman serisinden kayan pencereler yöntemi ile elde edilen örtüşen alt seriler LSTM modüllerine verilmektedir. Daha sonra zaman serisinden kodlanmış öz nitelikler elde edilir. Elde edilen öz nitelikler LSTM kod çözücü kullanılarak mümkün olduğu kadar orijinal seriye yakın bir şekilde geri çözer. Temel çalışma prensibi normal zaman serileri ile eğitilmiş bir LSTM otomatik kodlayıcı kendi iç gösterimlerinde bu seriyi verimli bir şekilde kodlayacaktır. Ancak eğitilmiş ağa anormal veri geldiğinde kod çözücü eğitim aşamasında bu tür kalıpları görmediğinden bu verileri düzgün bir şekilde yeniden oluşturamayacaktır. Yeniden yapılandırma hatasının yüksek olması bir anormalliğin varlığını gösterecektir.

Sensörde örnekleme oranı 20.000 örnek/saniye olacak şekilde veriler alınmıştır. Verilerde iki vuruşluk ovalama işlemi toplamda 8.000 örnek içermektedir. Fakat LSTM direkt olarak bu uzunlukta veriyi eğitmek için uygun değildir. Bu yüzden veri boyutunun düşürülmesi gerekmektedir. Veri boyutunu düşürmek için hareketli ortalamalar ile her bir zaman serisi 128 örneğe düşürülmüştür. Bu şekilde LSTM otomatik kodlayıcıya veri örnekleri verilmiştir. Şekil 3.6’da önerilen yaklaşımın blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.6. Ovalama makinesi anomali tespiti için önerilen yaklaşım

Şekil 3.6’da ilk olarak veri kümesinden elde edilen veri setleri 8000 örnek olarak bölünmektedir. Daha sonra veri seti standart sapma ve ortalama özelliğini kullanan z-skor normalizasyon yöntemi ile Eş. 3.2’deki gibi ölçeklenmektedir.

$$X(i) = \frac{X[i] - \mu}{\sigma} \quad (3.2)$$

Eş. 3.2’de μ ve σ değerleri sırasıyla ortalama ve standart sapmayı göstermektedir. Veri kümesinde her bir örnek 1x8000 boyutunda olduğundan LSTM ile bu uzunlukta bir zaman serisini modellemek zordur. Bu yüzden hareketli ortalama metodu ile verinin şekli değişmeyecek şekilde her bir veri örneği 1x128 boyutuna düşürülmüştür.

4. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME

Ovalama işlemi sırasında potansiyel hataları önceden belirlemenin önemli bir gerekliliği, temas bölgesi içindeki etkileşimlerin ve tribolojik sistemin doğru bir şekilde anlaşılmasıdır. Yüzeyler arasındaki sürtünme, aşınma ve kalıba etkiyen anomali kuvvet etkisi gibi fenomenler, ovalama işleminin kalitesi ve verimliliği üzerinde doğrudan etkili olması sebebiyle kalıp deformasyonunun tespiti ve kalıba etkiyen kuvvetlerin anormalliğinin belirlenmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, ovalama işleminde yaygın olarak kullanılan K340 çeliği örnek malzeme olarak kullanılmış, ovalama işleminde hata türlerini tespit etmek için kuvvet ve frekans analizleri yapacak platform kullanılmış ve sayısal benzetim yöntemini doğrulamak için deneyler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

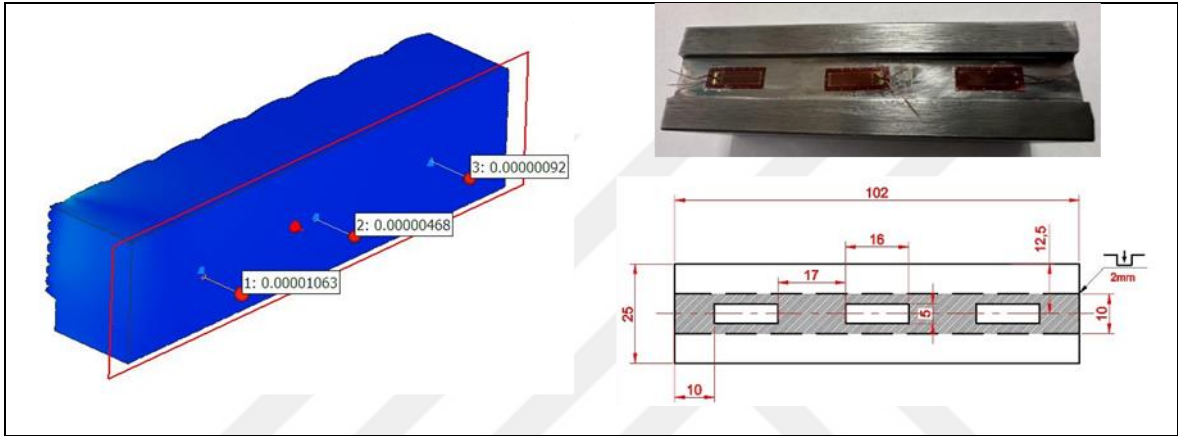
Bu çalışmada, gerçek zamanlı veri toplama için gerinim ölçer sensörleri kullanılarak kalıp üzerine etkiyen kuvvetler sürekli olarak ölçülmesinin yanı sıra Simufact yazılımı kullanılarak yapılan sayısal benzetim yöntemleriyle K340 çeliğinden yapılan ovalama kalıbına etkiyen kuvvetlerin analizi yapılmıştır. Gerinim ölçer sensörlerinin doğru yerleştirilmesi, bu kuvvet yoğunluk bölgelerinde gerçek zamanlı gerilme değerlerini hassas bir şekilde ölçebilmek için kritik öneme sahiptir. Kalıbın sayısal benzetim yöntemi sonuçlarına göre belirli bir noktasına ve kritik bir bölgesine sensör yerleştirilerek, o bölgede meydana gelen gerilme miktarı sürekli olarak izlenmesi sağlanmıştır. Bu veriler, iş parçasının kalitesini etkileyen potansiyel deformasyonları veya gerinim noktalarını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, metal şekillendirme işlemlerinde gerinim ölçer sensörlerinin doğru yerleştirilmesi ve sayısal benzetim yöntemi sonuçlarına uygunluğu, iş parçasının kalitesini artırmak, üretim süreçlerini optimize etmek ve kalıbın dayanıklılığını sağlamak için önemli bir adımdır.

4.1. Sayısal Benzetim ile Gerinim Değişimi

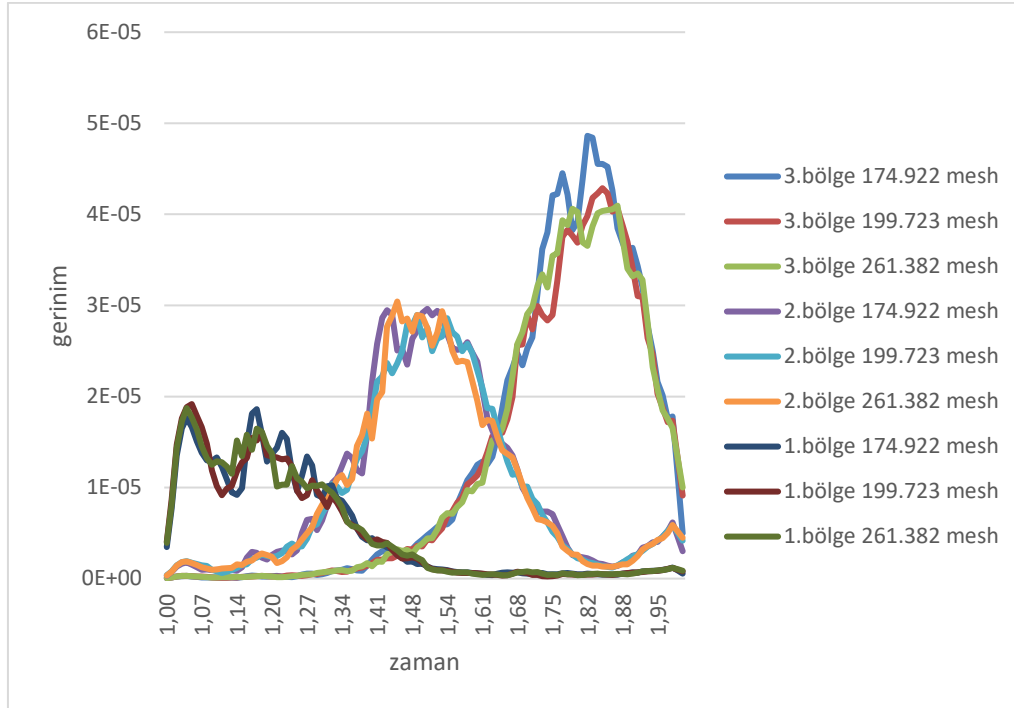
Sayısal benzetim yöntemiyle yapılan ovalama işlemi analizi gerinim ölçer sensörlerinin yerleşimi ve kalıp deformasyonunun tespiti için önemli bir rol oynamaktadır. Ovalama kalıbı Solidworks ile modellenerek ovalama işlemi Simufact ile simüle edilerek analizler

gerçekleştirilmiştir. Aşağıda yapılan deneylerin sonuçları şekiller halinde listelenmiştir. Şekil 4.1'de sayısal benzetim yöntemi sonuçlarına dayanarak meydana gelen kalıp üzerine etkiyen gerinim dağılımları sensörlerin montajlandığı üç kritik bölgeye ayrılarak gösterilmiştir: 1.bölge ürünün kalıba giriş yaptığı kısım, 2. bölge kalıbın orta kısmı, 3. bölge ise ovalamanın tamamlanmaya yaklaştığı kalıbın son bölgesidir. Bu bölgelerde sanal sensör varmış gibi ovalama işleminin sayısal benzetim modellemesinde gerinim değişimleri ölçülmüştür.

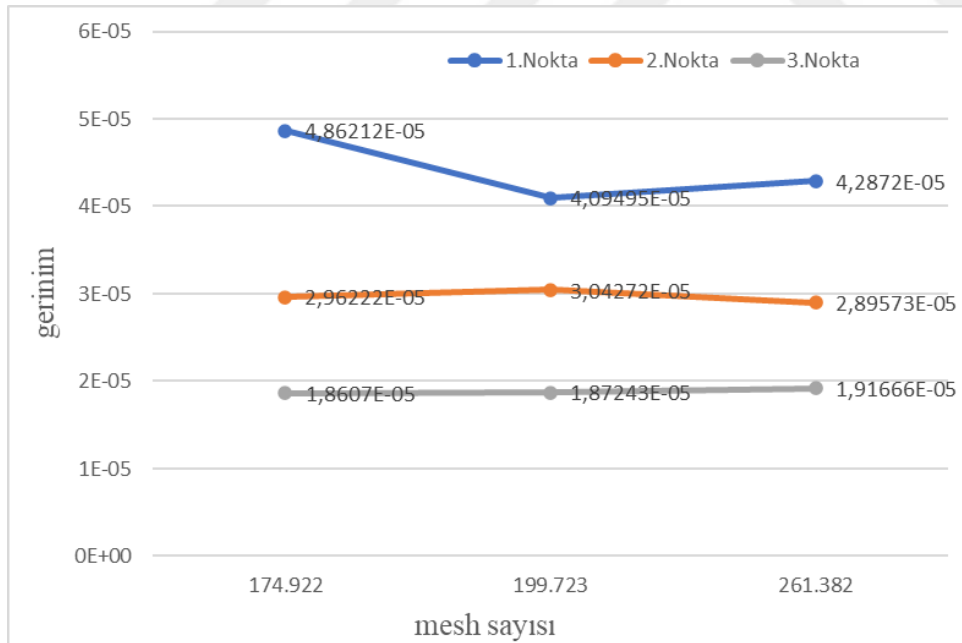


Şekil 4.1. Simufact sayısal benzetim yöntemi ile giriş-orta ve çıkış bölgesinden gerinim ölçümü şeması

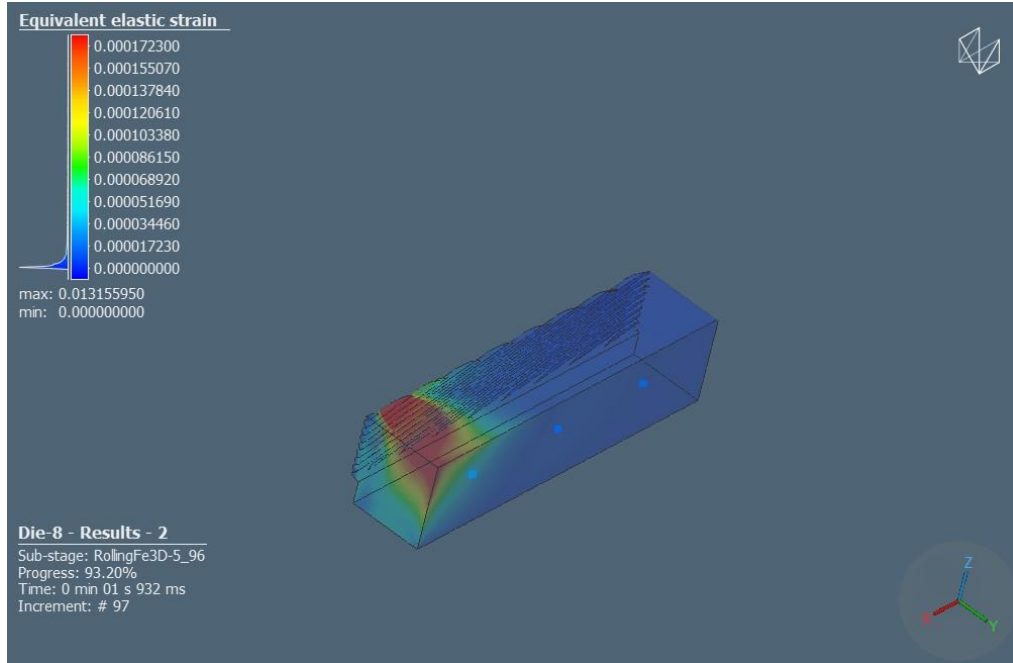
Yapılan sayısal benzetim analizinde mesh'den bağımsızlık kontrolü için programın otomatik olarak atadığı 199.723 adet mesh ile analize ek olarak kalıba 174.922 adet ve 261.382 adet mesh atanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'de yapılan analizlerde kalıp üzerindeki üç bölgenin gerinim değişim grafiği verilmiştir. Şekil 4.3'de bu üç bölgede oluşan en yüksek gerinimlerin değişimleri gösterilmiş olup birbirine yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. Farklı mesh değerlerinde 3 bölgede oluşan gerinim değişimi

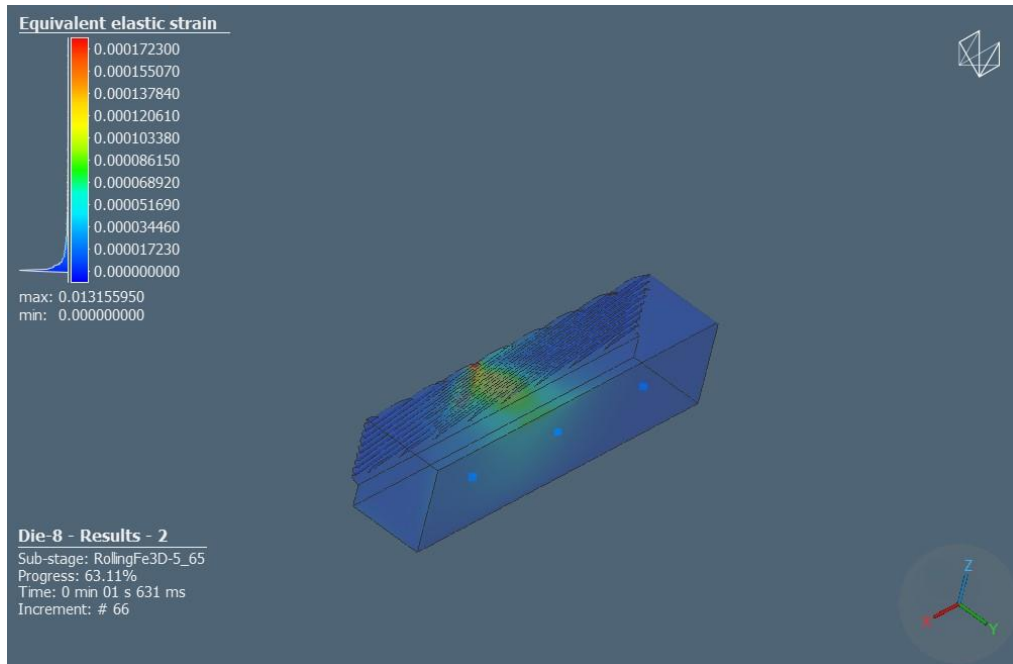


Şekil 4.3. Farklı mesh değerlerinde 3 noktada oluşan en yüksek gerinimler



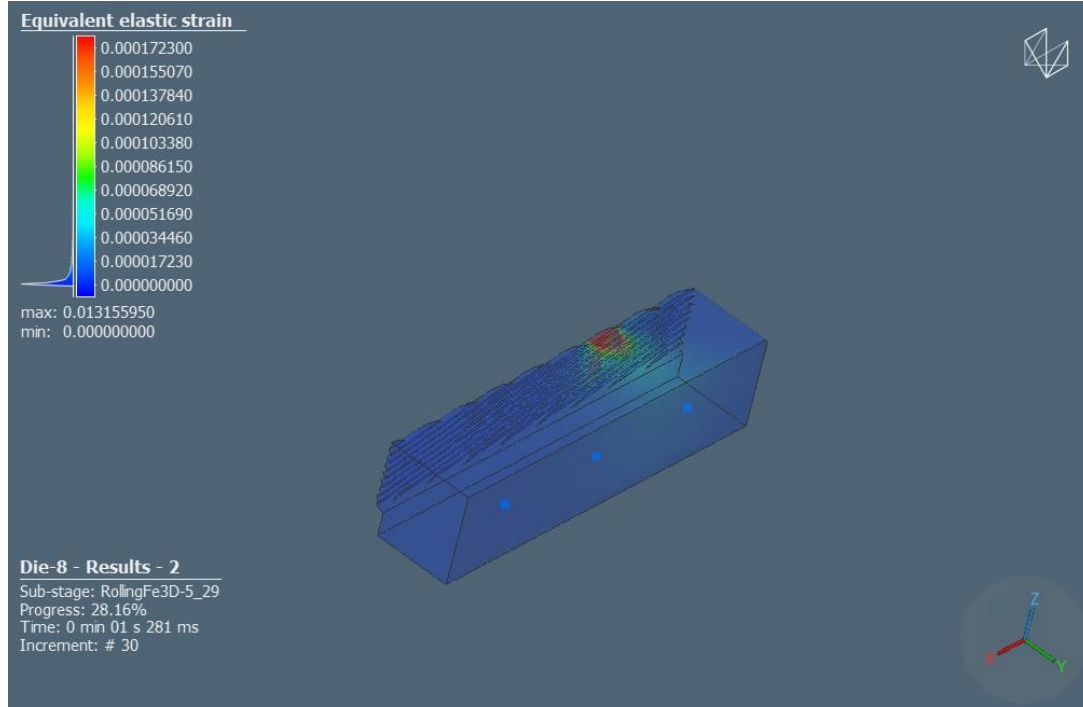
Şekil 4.4. Simufact sayısal benzetim: kalıp giriş kısmındaki gerinme görüntüsü

Şekil 4.4’de kalıp giriş kısmındaki gerilme bölgesi, malzeme yorulması, çatlama veya deformasyon gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilecek önemli faktörler için gerinme değerleri yönünden incelenmiştir.



Şekil 4.5. Simufact sayısal benzetim: kalıp orta kısmında oluşan gerinme görüntüsü

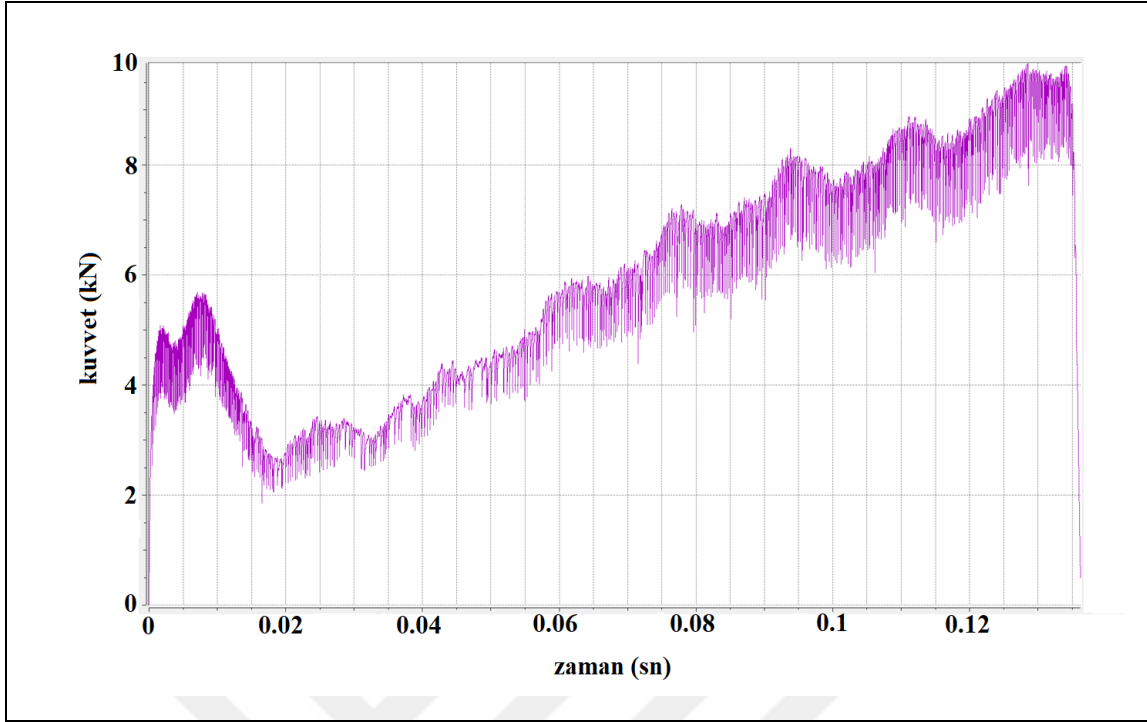
Şekil 4.5’de kalıp orta kısmında meydana gelen gerilme değerleri, malzemenin ne kadar deformasyona uğradığını ve bu deformasyonun homojenliğini göstermekle beraber deformasyonun düzensiz olması veya belli bölgelerde aşırı gerilmenin olması, iş parçasının son kalite standardını olumsuz etkileyebilmesi nedeniyle önem arz etmektedir.



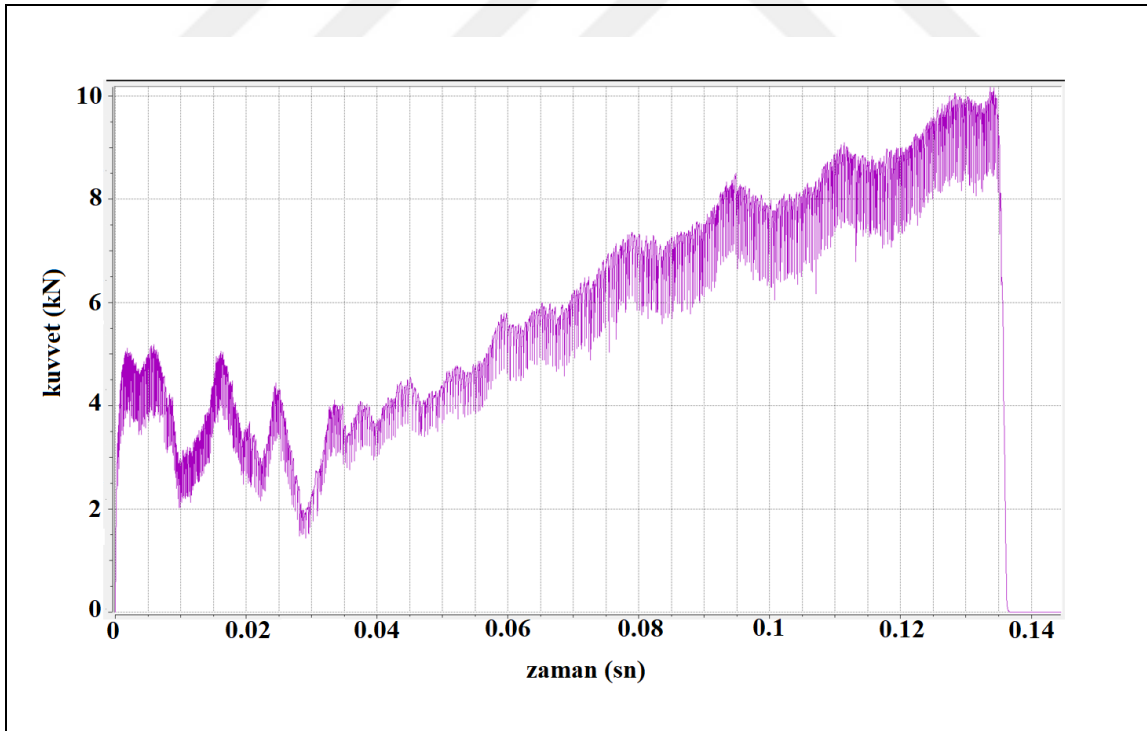
Şekil 4.6. Simufact sayısal benzetim : kalıp son kısmında oluşan gerilme görüntüsü

Şekil 4.6’da kalıbın son kısmındaki gerilme miktarı kalıbın dayanıklılığı, tekrarlı işlem sürekliliği ve genel üretim verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Saniyede 20.000 örnekleme alınarak yapılan sayısal benzetim yöntemi kuvvet değişimi grafiği sağlam ve deformasyona uğramamış kalıp için Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



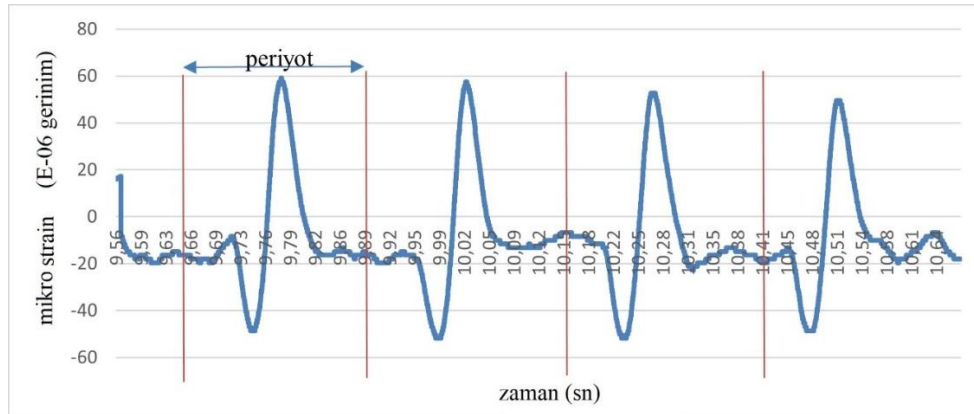
Şekil 4.7. Sağlam kalıp için Simufact kuvvet değişimi kuvvet-zaman



Şekil 4.8. Deforme kalıp için Simufact kuvvet değişimi kuvvet-zaman

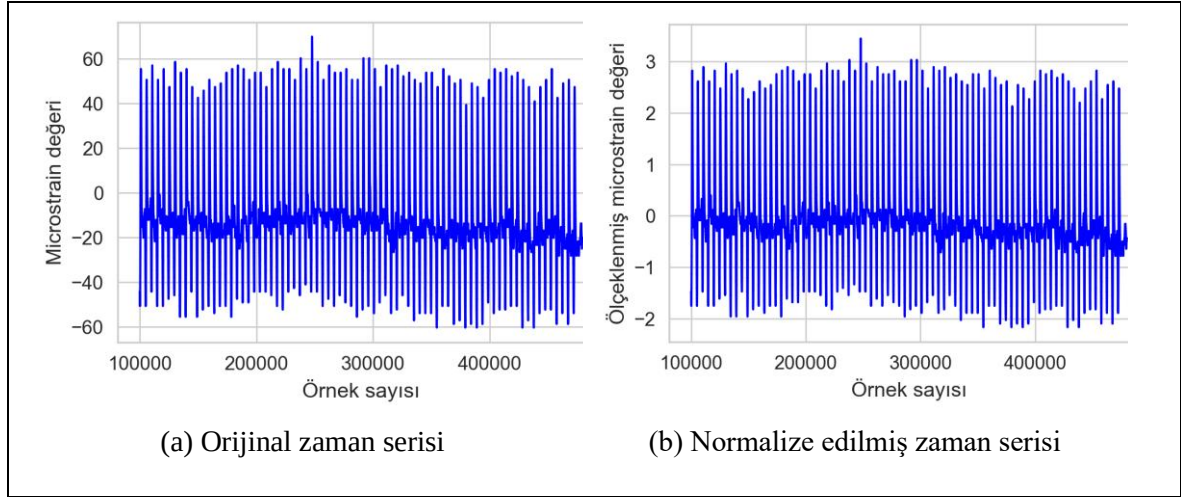
4.2. LSTM ile Veri Setinin Öğretilmesi ve Anomali Tespiti

Şekil 4.9’de gerinim ölçer sensör ile ovalama işlemi esnasında kalıpta oluşan okunan gerinim değişimine yer verilmiştir. Ovalama işlemi sırasında malzemede kademeli olarak mekanik gerinme oluştuğu gözlenmektedir.



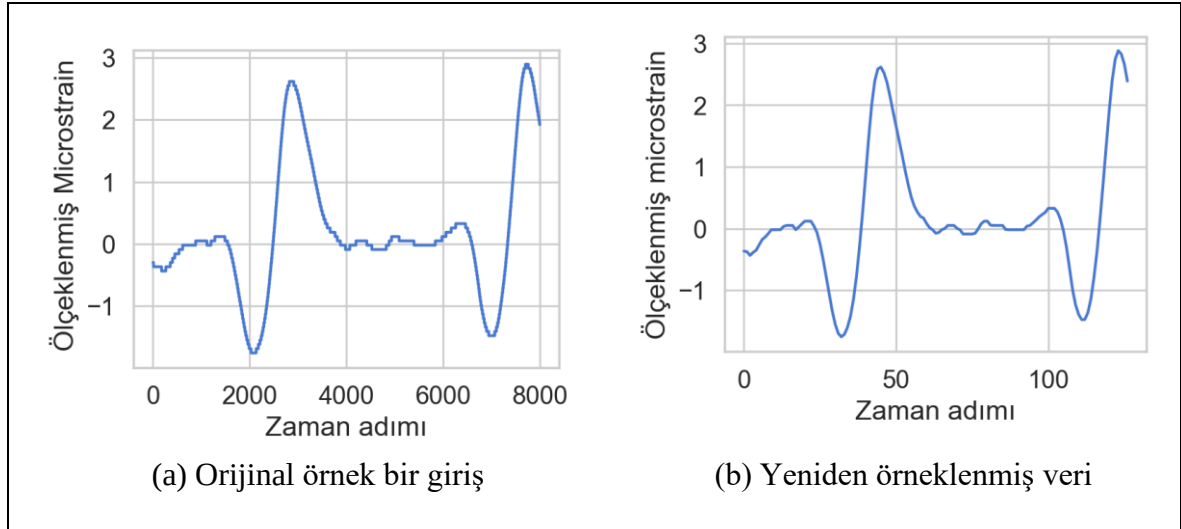
Şekil 4.9. Gerinim ölçer sensör ile ovalama işlemi esnasında kalıpta oluşan okunan gerinim değişimi

LSTM tabanlı otomatik kodlayıcı ile anomali tespiti için eğitim aşamasında sadece sağlam kalıptan gelen sensor bilgileri kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken zaman serisinden 380.000 örnekten oluşan bir bölüm alınmıştır. Bu makinanın sürekli durumda sağlam olarak çalıştığı ve duruşları içermeyen bir zaman serisi bölümüdür. Fakat zaman serisi z-skor normalizasyon yaklaşımı ile normalize edilmiştir. Şekil 4.10’de orijinal zaman serisi ile normalize edilmiş zaman serisi gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Normal durum için kullanılan zaman serisi

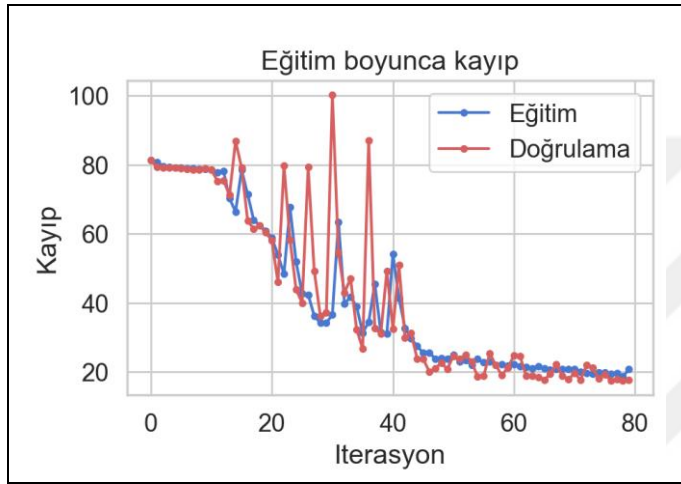
Şekil 4.10'deki zaman serisinden iki vuruş arası ovalama işlemi için zaman serisi örnek olarak alınmıştır. Dolayısıyla bu iki vuruş 8.000 örnekten oluşmaktadır. Fakat 8000 örnek girişine sahip bir LSTM'i eğitmek oldukça zordur. Bu yüzden her bir örneğin boyutunu düşürmek için kayan ortalamalar tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır. Bu şekilde zaman serisi 128 örnekten oluşan bir yapıya dönüşmüştür. Şekil 4.11'de orijinal zaman serisi ile boyutu azaltılmış örnek veri gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Orijinal bir giriş örneği ile hareketli ortalama ile örneklenmiş veri

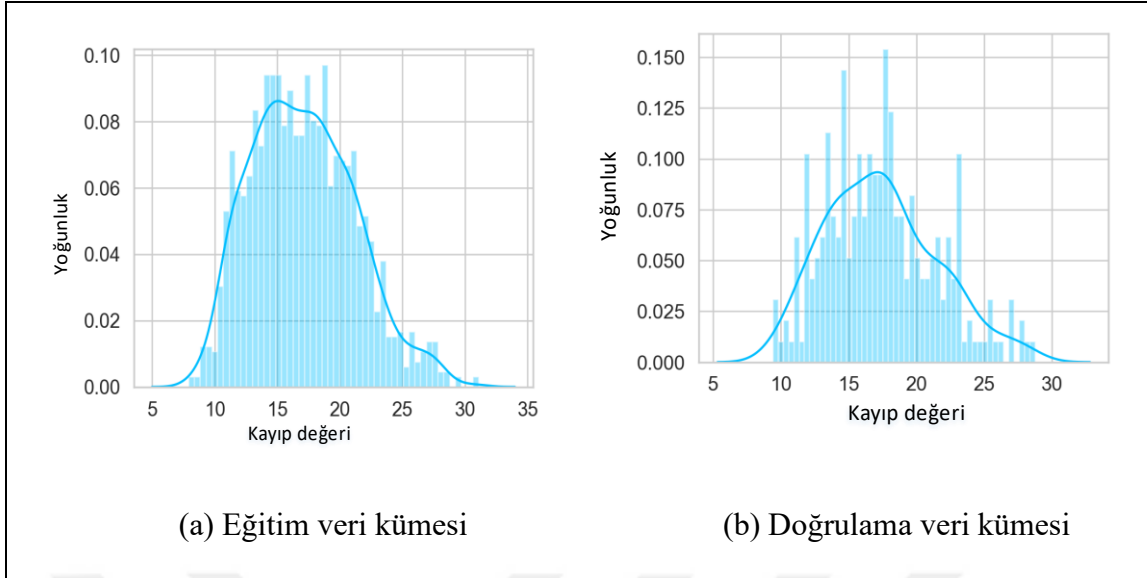
Şekil 4.11'de görüldüğü gibi herhangi bir veri kaybı olmadan orijinal serinin 128 örnek ile sıkıştırılmış bir örneği elde edilmiştir. Bu zaman serisinin doğru bir temsilini göstermektedir. Zaman serisinde örtüşme oranı 200 seçilerek toplamda (1860,128)

boyutunda bir veri seti elde edilmiştir. Dolayısıyla veri seti 1860 örnekten oluşmaktadır. LSTM tabanlı otomatik kodlayıcıda optimize edici olarak “Adam” metodu kullanılmış ve öğrenme oranı 10^{-4} seçilmiştir. Kayıp fonksiyonu olarak L1Loss modeli kullanılmıştır. L1Loss, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasını hesaplar. Uygulama Python programlama dili ile Pytorch derin öğrenme kütüphanesinde yazılmıştır. Veri kümesi eğitim ve doğrulama olarak ayrılmış olup 80 iterasyon boyunca eğitim yapılmıştır. Şekil 4.12’de eğitim ve doğrulama için kayıp grafiği verilmiştir.



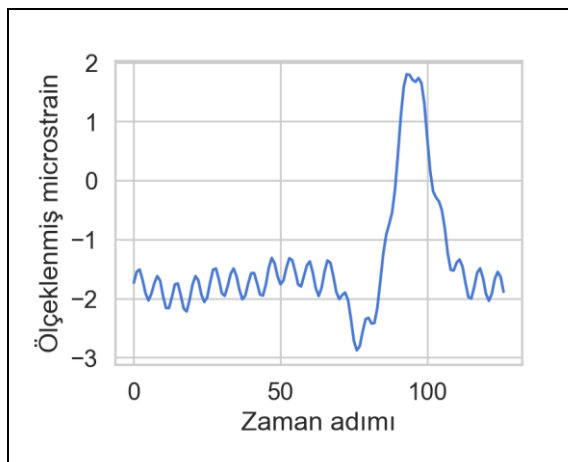
Şekil 4.12. Modelin eğitim ve doğrulama kaybı

Şekil 4.12’de modelin kayıp değeri 50. Adımdan sonra stabil duruma gelmekte olup eğitim ve doğrulama için 20 civarına düşmektedir. Şekil 4.16’da eğitim ve doğrulama için kayıp grafiklerinin histogramı verilmiştir.



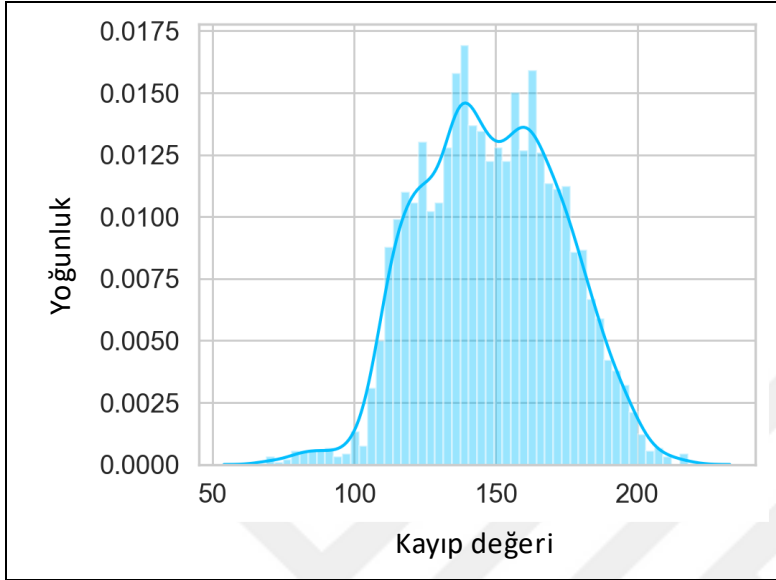
Şekil 4.13. Eğitim ve doğrulama için kayıp değerlerinin histogramı

Şekil 4.13’de gösterildiği gibi sağlam kalıpta hem eğitim hem de doğrulama için kayıp değerlerinin 5 ile 30 arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum aslında modelin eğitim grafiğini de doğrulamaktadır. Eğitim grafiğinde modelin doğrulama ve eğitim için kayıp değerleri 20 civarında olmuştur. İki durum için de kayıp değerlerinin daha çok 20 civarında olduğu diğer değerlerin yoğunluğunun daha düşük olduğu görülmektedir. Anomali tespiti için gerinim sensöründen deforme hatası olarak alınan zaman serisi kullanılmıştır. Bu zaman serisinde her bir zaman serisi örneği 8.000 veriden oluşmaktadır. Hareketli ortalama yöntemi ile her bir örnek 128 boyutuna düşürülmüştür. Şekil 4.14’de kullanılan bir zaman serisi örneği verilmiştir.



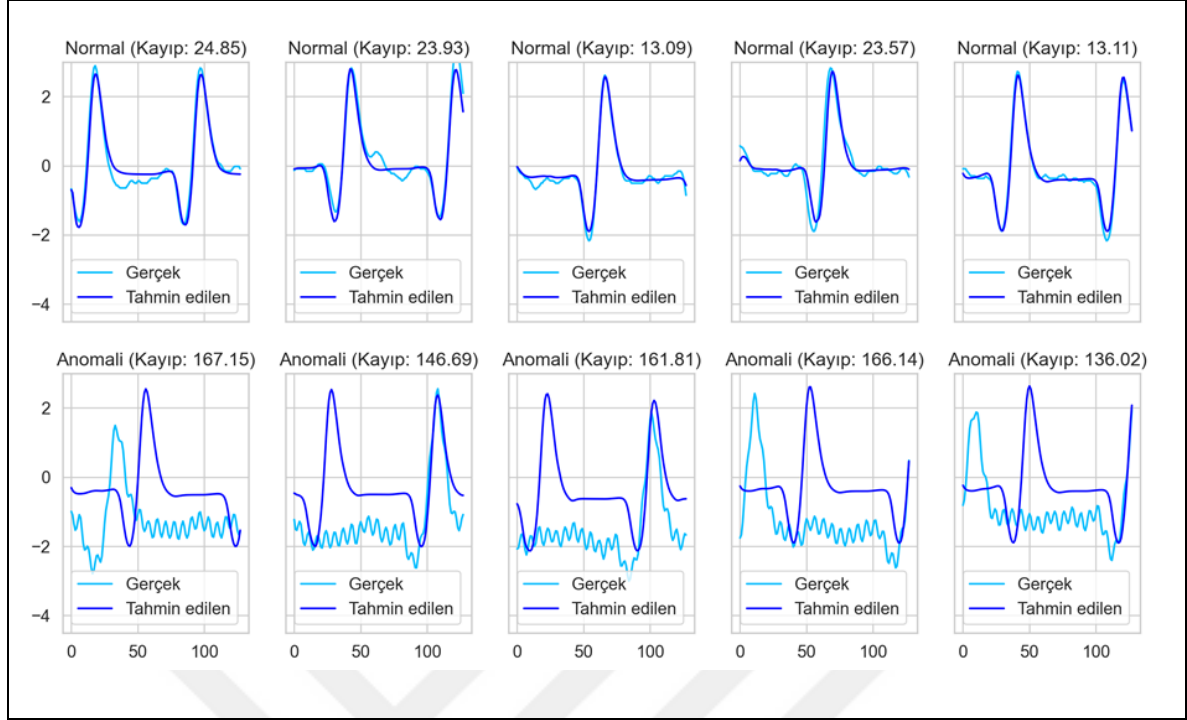
Şekil 4.14. Deforme arızası için bir zaman serisi örneği

Şekil 4.14’de bir örneği verilen zaman serisi daha önce hatasız veriler ile eğitilmiş modele verilerek kayıp değeri hesaplanmıştır. Şekil 4.15’de deforme hatasına sahip zaman serisinin model kayıp değerinin histogramı verilmiştir.



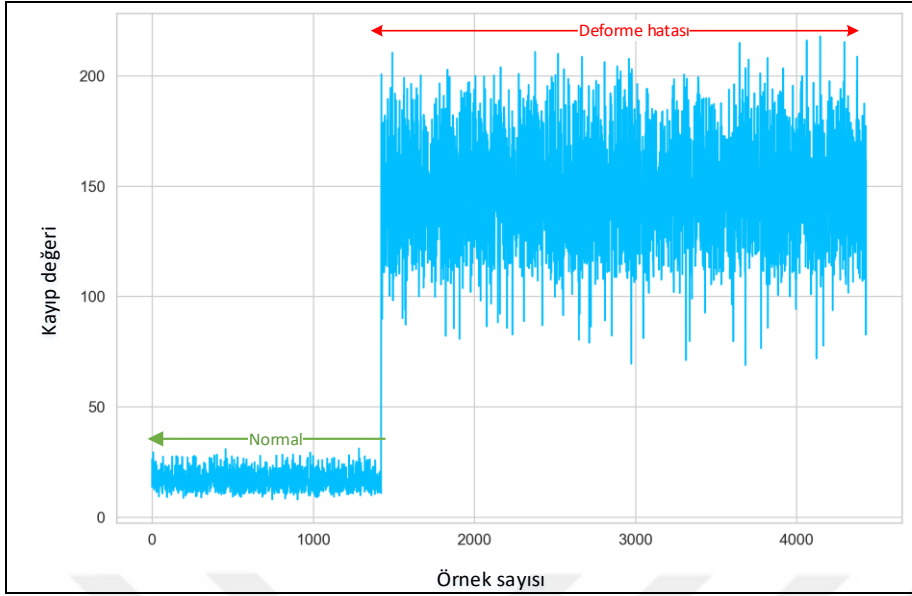
Şekil 4.15. Deforme arızası için modelin ürettiği kayıp değerlerinin histogramı

Şekil 4.15’de kayıp değerlerinin genellikle 150 civarında kümелendiği ve kusurlu verilerde 50 ile 220 bandı arasında değiştiğini göstermektedir. Modelin hem sağlam hem de anomali durumlar için ürettiği yeniden oluşturma zaman serileri ve kayıp değerleri Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Sağlam ve anomali durum için gerçek sinyaller ve modelin ürettiği sinyaller

Şekil 4.16’da görüldüğü üzere gerçek (true) veri örnekleri hem normal ve hem de anomali veri seti için verilmiştir. Normal durumda verilen dört örnek için kayıp değerinin 16 ile 23 arasında değiştiği ve zaman serisi örneklerinin tam olarak modellendiği görülmektedir. Fakat anomali örneklerde zaman serisinin yeniden oluşturulmasının doğru bir şekilde yapılamadığı ve kayıp değerinin 115 ile 139 arasında değişen bir değerde olup oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Sağlam ve anomali kayıp değerleri normal durum için kullanılan test örnekleri ve deforme hatası örnekleri için Şekil 4.17’de verilmiştir.



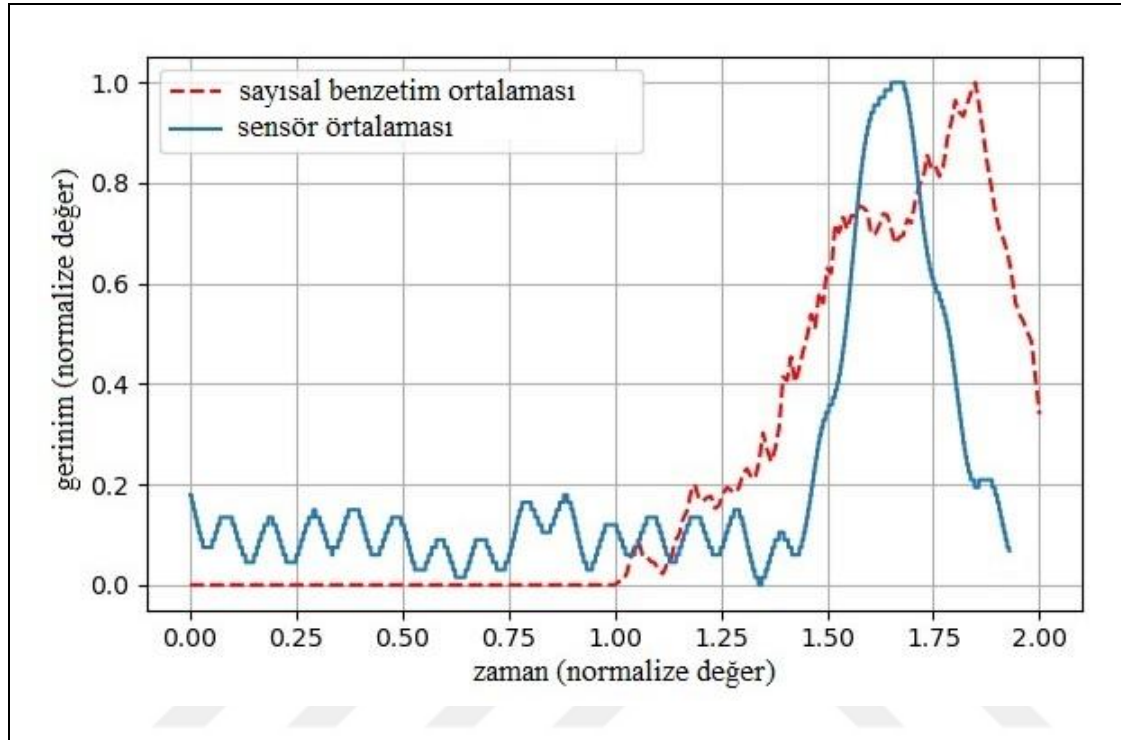
Şekil 4.17. Normal ve deforme durumu örnekleri için kayıp değerleri

Şekil 4.17’de ilk kısımda normal veriler için kayıp değerlerinin 50’nin çok altında olduğu ve standart sapmasının düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte deforme hatası olan verilerde bazı örneklerde kayıp değerinin 70- 80 bandında olduğu fakat genelde 100’ün üzerinde olduğu görülmektedir. Bir eşik değeri belirlenmemiş fakat normal ile anomali durumlarının kayıp değerlerinin ayırt edici olduğu söylenebilir.

Dünyada binlerce farklı tipte civata ve vida türü kullanılmaktadır. Bu çeşitlilik, kullanılan malzeme, boyut, diş yapısı, başlık şekli, amaç ve standartlara göre büyük farklılıklar göstermektedir. Ovalama makinelerinde pek çok farklı civata ve vidanın dişi üretilmekte olup, söz konusu her tip için farklı frekans ve öğrenme uygulaması yapılmasına ihtiyaç duyulmakta, üretimde meydana gelen tribolojik faktörlerin değişimi (yağlama, ısınma vs..) göz önüne alındığında sayısal benzetim sonucuna göre öğrenme yapılabilmesinin kolaylık sağlayacağından simülasyon ile sensör verilerinin benzer değişimi karşılaştırılmıştır.

Ovalama kalıbı üzerinde 3 noktada sanal sensör varmış gibi elde edilen verilerin ortalamaları ile gerçek sensör çıktıları tepe noktalarına göre normalize edilerek Şekil 4.18’de aynı grafikte verilmiştir. Sayısal benzetim yöntemi ve gerçek test sonuçları arasında korelasyon ve benzer karakteristik değişimler gözlenmiştir. Grafikte sayısal benzetim ve deneysel veriler genel olarak benzer bir trend göstermektedir. Her ikisi de belirli bir noktaya kadar yükselerek ve daha sonra düşüş eğilimi göstermektedir. Bu, sayısal benzetimin deneysel koşulları başarılı bir şekilde yansıttığını göstermektedir.

Sayısal benzetim ile elde edilmiş veride daha fazla dalgalanma ve küçük genlik değişiklikleri bulunması, sayısal benzetimin daha hassas bir modelleme yaptığına veya modelin gerinim sensöründeki küçük değişikliklere duyarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.18. Sayısal benzetim yöntemi ve sensör ile elde edilen gerinim değişimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan değerlendirmelerde yük dağılımlarında yoğunlaşan bölgeler tespit edilmiş ve hatalı üretime sebep olacak verilerin toplanması için veri kümesi oluşturulmuştur. Diş açma işleminin gerçekleştirildiği ovalama kalıplarında kuvvet ve frekans analizi yapılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Ovalama işlemi boyunca 150 ms'de 1 strok tamamlandığı tespit edilmiş olup, 20.000 örnekleme üzerinden ortalama değer ve karakteristik yük değişimleri gözlenmiştir. Strok boyu ve zamana göre yük dağılımları incelenmiş risk bölgeleri tespit edilerek ovalama işleminde kalıplarda meydana gelecek yük değişimleri kaynaklı problemlerin önlenmesi için veri toplanmıştır.

5.1. Sonuçlar

Sayısal benzetim yöntemi ve sensör ölçüm sonucu elde edilen gerinimin doğrusal değişmediği görülmektedir. Bu da vida şekillendirme işleminde oluşan kalıp deformasyonu gibi sorunları oluşmadan tespit etmek için veri işleme yöntemlerinin kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, soğuk şekillendirme endüstrisinde gerçek zamanlı izleme ve kalite kontrol için potansiyel bir yöntem sunmaktadır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, ovalama işlemi sırasında kalıp deformasyonu ve gerinim değerlerinin analiz edilmesi için kullanılabilecek stratejiler ve yöntemler konusunda yol gösterici olacaktır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Normal durumda LSTM modelin ürettiği kayıp değerleri genellikle 20 civarındadır. Zaman Serisi Veri İşleme Orijinal zaman serisi örneği boyutu 8000 örnek alınmıştır. LSTM modeli için her bir örneğin boyutu 128 örnek olarak alınmıştır. LSTM tabanlı anomali tespiti ile anormal durumda modelin ürettiği kayıp değerleri genellikle 100 civarındadır. Eğitim ve doğrulama için ayrılmış veri setleri üzerinde yapılan testler, modelin stabil bir şekilde öğrenme gösterdiğini ve doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir. Uygun veri işleme modeli seçilerek makine öğrenmesi yapılabileceği elde edilen data setleri ile gösterilmiştir.
- Ovalama-diş açma işlemi çok hızlı gerçekleştiğinden veri değişiminin anlık ve çok hassas bir şekilde alınıp tepki verilmesi (NOK olarak ürünün sağlamlara karışmaması)

sağlanabilir. Bunun için gerinim ölçer sensörün kullanılmasının sağlayacağı avantaj ortaya konmuştur.

- Sayısal benzetim yöntemi ve test düzeneğiyle elde edilen gerçek test sonuçları arasında korelasyon ve benzer karakteristik değişimler gözlenmiştir.
- Gerinim ölçer sensör ile elde edilen verilerle de her bir hata türünün belirlenebileceği ortaya konmuştur.
- Uygun veri işleme modeli seçilerek makine öğrenmesi yapılabileceği elde edilen data setleri ile gösterilmiştir.

5.2. Öneriler

- Gelecekteki araştırmalar, daha karmaşık üretim senaryolarını kapsayacak şekilde genişletilebilir ve farklı malzemeler veya prosesler üzerinde derinleştirilebilmesi için bu çalışma temel oluşturabilecek niteliktedir.
- Farklı LSTM yapıları veya başka derin öğrenme teknikleri kullanılarak, anomali tespitindeki doğruluğun artırılması için çalışmalar yapılabilme potansiyeli yüksektir.
- Endüstriyel otomasyon ve proses kontrol sistemleri ile entegrasyon sağlayarak, ekipmanların otomatik olarak izlenmesi, veri toplanması ve analiz edilmesi ile operasyonel verimliliği artırır ve hata yönetimini iyileştirilmesinin takibi ile mevcut proje kapsamı genişletilebilir.
- Kalıp deformasyonu gerçek zamanlı tespiti için gerinim ölçer sensör yerine farklı sensör (Yük hücresi, lazer tarama, akustik emisyon Sensörleri, manyetik alan Sensörleri, ultrasonik Sensörler, görüntü işleme ve kamera sistemleri) teknolojiler akuple edilerek gerçek zamanlı veri toplanma araçları genişletilebilir niteliktedir.

KAYNAKLAR

1. Chauhan, P. S., Agrawal, C. M., ve Dwivedi, R. K. (2014). Effect of material and process parameter on dimensions of rolled external threads. *Applied Mechanics and Materials*, 493, 453–460.
2. Groche, P., ve Kramer, P. (2018). Numerical investigation of the influence of frictional conditions in thread rolling operations with flat dies. *International Journal of Material Forming*, 11, 687–703.
3. Giorleo, L., ve Cartapani, M. (2022). *Influence of die threading and finishing length in the thread-rolling process using flat dies: a numerical analysis*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 1–9.
4. Domblesky, J. P., ve Feng, F. (2002). A parametric study of process parameters in external thread rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 121(2–3).
5. Udaya, K., Kishore, K., ve Sreekrishna, S. (2019). Analysis on thread rolling using flat dies. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 06(04), 4638–4645.
6. Ismail, A. A., Wood, T., ve Bravo, H. C. (2018). *Improving Long-Horizon Forecasts with Expectation-Biased LSTM Networks*. London.
7. Kramer, P., ve Groche, P. (2018). Defect detection in thread rolling processes – Experimental study and numerical investigation of driving parameters. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 129, 27–36.
8. Shen, W., ve Ai, C. (2010). *On-line monitoring methodology for die forging quality based on the piezoelectric effect*. In Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA) (pp. 4173–4177).
9. Liu, S., Xia, Y., Liu, Y., Shi, Z., Yu, H., Li, Z., ve Lin, J. (2022). Tool path planning of consecutive free-form sheet metal stamping with deep learning. *Journal of Materials Processing Technology*, 303, 117530.
10. Glaeser, A., Selvaraj, V., Lee, S., Hwang, Y., Lee, K., Lee, N., ve Min, S. (2021). Applications of deep learning for fault detection in industrial cold forging. *International Journal of Production Research*, 59(16), 4826–4835.
11. Dec, G. R. (2021). *LSTM cell implementation on FPGAs*. Parallel Processing Letters, 31(02), 2150011.
12. Oberg, E., Jones, F.D., Horton, H.L., ve Ryffel, H.H., (2004), *Machinery's Handbook : A reference book for the mechanical engineer, designer, manufacturing engineer, draftsman, toolmaker, and machinist*. (27th Edition). New York: Industrial Press Inc.
13. Sağlam, H., ve Kuş, R. (2011). *Performance of internal thread rolling head and the mechanical properties of rolled thread*. In 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) (pp. 16–18).

14. Aktaş, S., ve Kişioğlu, Y. (2017). *Experimental investigation of the effect of screw production method on mechanical resistance in different materials*. 2. International Energy and Engineering Conference. Gaziantep.
15. Ibrahmi, A., Hbaieb, M., ve Krichen, A. (2017). *Experimental study of the effect of the threading process on the mechanical and tribological behaviors of the triangular thread*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88, 269–276.
16. Askeland, D. R., Fulay P.P., ve Wright, W. J. (2011). *The science and engineering of materials*. (6th Edition). Cengage Learning,
17. Zhang, S., Zhang, D., Liu, D., Dong, Y., Li, F., ve Zhao, S. (2022). Analysis of friction characteristics during the thread cold rolling process by using a novel single-tooth rolling friction test. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(7), 5439–5449.
18. Ivanov, V. (1997). Rolling of internal threads: Part 2. *Journal of Materials Processing Technology*. 72(2), 221–225.
19. Ivanov, V. (1996). Profiling of rollers for thread rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 59(4), 333–336.
20. Ivanov, V., ve Kirov, V. (1997). Rolling of internal threads: Part 1. *Journal of Materials Processing Technology*.
21. Dyson, C. J., Hopkins, W. A., Aljeran, D. A., Fox, M. F., ve Priest, M. (2024). *Tribological considerations of threaded fastener friction and the importance of lubrication*. *Tribology International*. 191, 109162.
22. Xie, Z., Xue, Q., Wu, J., Gu, L., Wang, L., ve Song, B. (2019). Mixed-lubrication analysis of planetary roller screw. *Tribology International*, 140, 105883.
23. Zhang, S., Zhang, D., Jiang, H., Jiang, F., ve Zhao, S. (2022). Numerical and experimental analysis of deformation behaviors and microstructure evolution in the thread rolling process. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 230–242.
24. Kukielka, K., ve Kukielka, L. (2007). *The numerical analysis of the trapezoidal thread rolling process*. PAMM, 7(1).
25. Volz, S., ve Groche, P. (2024). Experimental investigation on slip conditions during thread rolling with flat dies. *Friction*, 12(1), 136–143.
26. Liu, Y., Xie, A., Shen, D., ve Yang, X. (2020). *Eddy Current Testing in Service of the Boiler Heating Surface Tube Elbow in Thermal Power Plants*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 585). IOP Publishing Ltd.
27. Zabiński, T., Mączka, T., Kluska, J., Kusy, M., Hajduk, Z., ve Prucnal, S. (2014). *Failures prediction in the cold forging process using machine learning methods*. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), Vol. 8467, 622–633. Springer Verlag.

28. İnternet: makine öğrenmesi, web: <https://www.retmes.com/en/moduller/uretim-zekasi/makine-ogrenimi>. Erişim Tarihi: 14.10.2024
29. Lawrence, N. P., Damarla, S. K., Kim, J. W., Tulsyan, A., Amjad, F., Wang, K., ve Gopaluni, R. B. (2024). Machine learning for industrial sensing and control: A survey and practical perspective. *Control Engineering Practice*, 145, 105841.
30. Hoffmann, K. (1989). *An Introduction to measurements using strain gages*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt. (189-232)







Gazili olmak ayrıcalıktır