

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**CNC FREZELEME İŞLEMİNDE ISIL GENLEŞME
KAYNAKLI BOYUTSAL HATALARIN BÜTÜNLEŞİK
CAD/CAM/FEA OPERASYONLARIYLA DÜZELTİLEREK
BOYUTSAL TAMLIĞIN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Hazırlayan
Şaban Murat ÜNLÜ**

**Danışman
Doç. Dr. Eyüp Sabri TOPAL**

Doktora Tezi

**Eylül 2015
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**CNC FREZELEME İŞLEMİNDE ISIL GENLEŞME
KAYNAKLI BOYUTSAL HATALARIN BÜTÜNLEŞİK
CAD/CAM/FEA OPERASYONLARIYLA DÜZELTİLEREK
BOYUTSAL TAMLIĞIN İYİLEŞTİRİLMESİ**

(Doktora Tezi)

**Hazırlayan
Şaban Murat ÜNLÜ**

**Danışman
Doç. Dr. Eyüp Sabri TOPAL**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Tarafından FBD-12-4062 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Eylül 2015
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Şaban Murat ÜNLÜ



YÖNERGEYE UYGUNLUK

CNC Frezeleme İşleminde Isıl Genleşme Kaynaklı Boyutsal Hataların Bütünleşik CAD/CAM/FEA Operasyonlarıyla Düzeltilerek Boyutsal Tamlığın İyileştirilmesi başlıklı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.



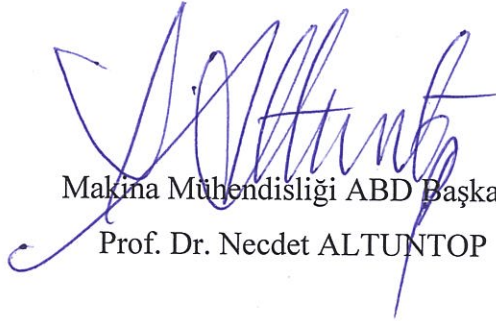
Tezi Hazırlayan

Şaban Murat ÜNLÜ



Danışman

Doç. Dr. Eyüp Sabri TOPAL



Makina Mühendisliği ABD Başkanı

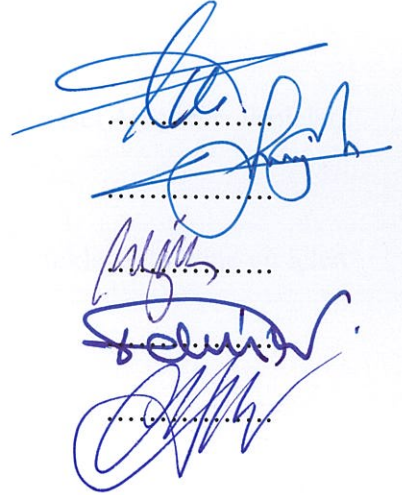
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

Doç. Dr. Eyüp Sabri TOPAL danışmanlığında Şaban Murat ÜNLÜ tarafından hazırlanan “CNC Frezeleme İşleminde Isıl Genleşme Kaynaklı Boyutsal Hataların Bütünleşik CAD/CAM/FEA Operasyonlarıyla Düzeltilerek Boyutsal Tamlığın İyileştirilmesi” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

04 /09/2015

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Eyüp Sabri TOPAL
 Üye : Prof. Dr. Cem SİNANOĞLU
 Üye : Doç. Dr. Recep GÜNEŞ
 Üye : Doç. Dr. Fehmi NAİR
 Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 06/10/2015 tarih ve 2015/41-09 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Kâzım KEŞLİOĞLU
 Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı programında gerçekleştirdiğim bu doktora tez çalışmasının, talaşlı imalatta ısı kaynaklı hataların azaltılması amacıyla yapılacak çalışmalara katkı sağlamasını ümit ediyorum.

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Eyüp Sabri Topal'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı Arş. Gör. Mehmet Dördüncü, Öğr. Gör. Emir Esim, Öğr. Gör. Erkan Yılmaz'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FBD-12-4062) teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Şaban Murat ÜNLÜ
Kayseri, Eylül 2015

CNC FREZELEME İŞLEMİNDE ISIL GENLEŞME KAYNAKLI BOYUTSAL HATALARIN BÜTÜNLEŞİK CAD/CAM/FEA OPERASYONLARIYLA DÜZELTİLEREK BOYUTSAL TAMLIĞIN İYİLEŞTİRİLMESİ

Şaban Murat ÜNLÜ

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Eylül 2015

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

ÖZET

Bu çalışmada CNC frezeleme işleminde ısı değişimlerinden kaynaklanan işleme hatasının incelenmesi ve düzeltilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla iş parçası CAD modelinin ısı genleşme/büzülme davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle (FEA) analiz edilmiş ve iş parçası CAD modeli bu analiz sonuçlarına göre “imalat ortamı hangi sıcaklıkta olursa olsun işparçası tam boyutlarında işlenecek şekilde” revize edilmiştir. Revizyon işlemi için bilgisayar destekli analiz modülü ile CAD modülünü entegre eden yeni bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım ile ısı analiz sonuçları dikkate alınarak işparçası CAD modeli yeniden yapılandırılmıştır. Revize edilmiş yeni CAD modeli üzerinde gerçekleştirilen CAM uygulaması ile hatayı düzeltecek alternatif CNC işleme kodları elde edilmiştir. Özdeş numuneler farklı imalat ortamı sıcaklıklarında işlenerek düzeltme stratejisinin performansının tekrarlanabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda Al7075 malzeme için %84, St4140 malzeme için %75 oranında başarı ile işleme hataları indirgenmiştir. Geliştirilen yöntemle talaşlı imalat sektöründe yüksek boyutsal kalitede parça üretebilmek için halen kullanılmakta olan, ortamın sürekli ideal sıcaklıkta (22 °C) kalması için klimatize edilmiş ve yalıtılmış atölyeler oluşturulmasına ihtiyaç kalmayacak, imalat ortamları hangi sıcaklıkta bulunursa bulunsun yüksek boyutsal tamlıkta ürünlerin üretimi ek maliyetlere katlanmaksızın mümkün olacaktır.

Anahtar Sözcükler: Frezeleme, Isıl hata indirgeme, CAD/CAM/FEA

CORRECTION AND EXPANSION OF THERMALLY-INDUCED ERRORS IN CNC MILLING VIA INTEGRATED CAD / CAM / FEA OPERATIONS

Şaban Murat ÜNLÜ

Erciyes Üniversitesi, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph. D. Thesis, September 2015

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Eyüp Sabri TOPAL

ABSTRACT

In this study, examining and correction thermal expansion induced errors on CNC milling machine is aimed. In this scope, workpiece thermal expansion attitude will be analysed with finite elements method on the CAD Model, and workpiece will be revised according to the results of analysis. For revision process, an interface software is developed, making a relation between computer aided analysis modul and CAD modul. Thanks to CAM process implemented on new CAD Model, a CNC part program that will correct the error is created. The method will be applied to identical samples at different conditions to examine the repeatability of the correction method. As a result of studies machining errors reduced with a success rate of 84% for Al7075 and 75% for St4140. By the method developed, the workpiece's dimensional error which thermally induced can be minimized at any temperature without using climatized to ideal temperature and isolated machining shops.

Keywords: Machining, thermal error compensation, CAD/CAM/FEA

İÇİNDEKİLER

CNC FREZELEME İŞLEMİNDE ISIL GENLEŞME KAYNAKLI BOYUTSAL HATALARIN BÜTÜNLEŞİK CAD/CAM/FEA OPERASYONLARIYLA DÜZELTİLEREK BOYUTSAL TAMLIĞIN İYİLEŞTİRİLMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. CNC Tezgâhların Tarihçesi	4
1.2. CNC Nedir?	5
1.3. CNC ve CNC Takım Tezgâhları.....	5
1.3.1. CNC Tezgâh Seçimi	6
1.3.2. CNC Programlama İlkeleri.....	7
1.3.3. CNC Tezgâh Eksenleri	10
1.4. Literatür Araştırması	11
1.5. İşleme Hataları ve Düzeltme Teknikleri	40
1.5.1. Isıl Hatalar	40
1.5.2. Geometrik Hatalar	42
1.5.3. Kesme Kuvvetlerinden Kaynaklanan Hatalar	44
1.5.4. Kinematik Hatalar	44
1.5.5. Alet Cihaz Hataları	45
1.5.6. Aşınma Hataları	45

1.5.7. Diğer Hatalar	45
1.6. Isıl Hata Analizi.....	45

2. BÖLÜM

TEORİK ÇALIŞMA

2.1. Hata Düzeltme yöntemi	50
2.2. ANSYS Uygulaması	52
2.3. ANSYS Makro Uygulaması.....	55
2.4. ANSYS Analizleri.....	56
2.4.1. Al 7075 Malzeme Analizleri	56
2.4.2. St 4140 Malzeme Analizleri.....	65
2.5. Sonlu Eleman Analizinden Katı Modele Geçiş.....	74

3. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzeme ve Teçhizat.....	76
--	----

4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Al7075 Malzeme İçin Deneysel Sonuçlar	83
4.2. St4140 Malzeme İçin Deneysel Sonuçlar	87
4.3. Sıcaklığa Bağlı Hata Miktarı.....	91
4.4. Dairesel Cep Hata Düzeltme Performansı	96

5. BÖLÜM

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

5.1. Tartışma	98
5.2. Sonuçlar	99

KAYNAKLAR	101
EKLER.....	110
ÖZGEÇMİŞ.....	130

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1	CNC programlamada temel kod grupları	7
Tablo 1.2	ISO kod sistemi	8
Tablo 1.3	Boyutsal tamlik elde etmede kullanılan yöntemler	16
Tablo 1.4	Üç eksenli dik işleme merkezinde oluşan 21 geometrik hata bileşeni	17
Tablo 1.5	Hata bileşenleri şematik gösterimi	17
Tablo 1.6	Beş eksenli CNC takım tezgâhlarındaki işleme hatalarını azaltmak için kullanılan yöntemler	36
Tablo 3.1	Deney numuneleri malzeme özellikleri	79
Tablo 4.1	Al 7075 Dairesel cep sıcaklığa bağlı hata miktarı	96
Tablo 4.2	St 4140 Dairesel cep sıcaklığa bağlı hata miktarı	97

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Darisel Harekette Yön Belirlenmesi [3]	10
Şekil 1.2.	Sağ El Kuralı.....	11
Şekil 1.3.	İş parçası ölçü hatalarının indirgenmesi için önerilen yaklaşım.....	15
Şekil 1.4.	Bir takım tezgâhı taşıyıcı sisteminin altı serbestlikli gösterimi.....	18
Şekil 1.5.	Kızak hareketleri sonucu oluşan 6 hata bileşeni	22
Şekil 1.6.	Takım tezgâhında hata indirgeme şeması	24
Şekil 1.7.	Termal etki diyagramı.....	25
Şekil 1.8.	Bir freze tezgâhında ısı etkileri sonucu oluşan yer değiştirmeler	26
Şekil 1.9.	Hatve, yuvarlanma ve yalpalama hatalarının gösterimi.....	27
Şekil 1.10.	Freze tezgâhının ısı değişimlerden en çok etkilenen kısımları	39
Şekil 1.11.	Doğrusal ve açısal hatalar. (a) Öteleme eksen(y eksen), (b) Dönme eksen (z eksen)	43
Şekil 1.12.	Bir kirişin termal uzama modu	46
Şekil 1.13.	Bir kirişin termal eğilme modu.....	47
Şekil 1.14.	Yatay frezeleme	47
Şekil 1.15.	Dikey (alın) frezeleme	48
Şekil 1.16.	Talaş kaldırmada etkili olan kuvvetler.....	49
Şekil 2.1.	Hata Düzeltme Yöntemi	51
Şekil 2.2.	Model Parça Teknik Resmi.....	53
Şekil 2.3.	FEM analizlerinde kullanılan eleman tipi SOLİD186.....	54
Şekil 2.4.	Model Parça Mesh Yapısı.....	54
Şekil 2.4.	Al7075 İdeal Sıcaklık X Doğrultusu Deformasyonu.....	56
Şekil 2.5.	Al7075 İdeal Sıcaklık Y Doğrultusu Deformasyonu.....	56
Şekil 2.6.	Al7075 17°C X Doğrultusu Deformasyonu	57
Şekil 2.7.	Al7075 17°C Y Doğrultusu Deformasyonu	57
Şekil 2.8.	Al7075 27°C X Doğrultusu Deformasyonu	58

Şekil 2.9.	Al7075 27°C Y Doğrultusu Deformasyonu	58
Şekil 2.10.	Al7075 12°C X Doğrultusu Deformasyonu	59
Şekil 2.11.	Al7075 12°C Y Doğrultusu Deformasyonu	59
Şekil 2.12.	Al7075 32°C X Doğrultusu Deformasyonu	60
Şekil 2.13.	Al7075 32°C Y Doğrultusu Deformasyonu	60
Şekil 2.14.	Al7075 7°C X Doğrultusu Deformasyonu	61
Şekil 2.15.	Al7075 7°C Y Doğrultusu Deformasyonu	61
Şekil 2.16.	Al7075 37°C X Doğrultusu Deformasyonu	62
Şekil 2.17.	Al7075 37°C Y Doğrultusu Deformasyonu	62
Şekil 2.18.	Al7075 2°C X Doğrultusu Deformasyonu	63
Şekil 2.19.	Al7075 2°C Y Doğrultusu Deformasyonu	63
Şekil 2.20.	Al7075 42°C X Doğrultusu Deformasyonu	64
Şekil 2.21.	Al7075 42°C X Doğrultusu Deformasyonu	64
Şekil 2.22.	St4140 22°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	65
Şekil 2.23.	St4140 22°C Y Doğrultusu Deformasyonu.....	65
Şekil 2.24.	St4140 17°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	66
Şekil 2.25.	St4140 17°C Y Doğrultusu Deformasyonu.....	66
Şekil 2.26.	St4140 27°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	67
Şekil 2.27.	St4140 27°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	67
Şekil 2.28.	St4140 12°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	68
Şekil 2.29.	St4140 12°C Y Doğrultusu Deformasyonu.....	68
Şekil 2.30.	St4140 32°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	69
Şekil 2.31.	St4140 32°C Y Doğrultusu Deformasyonu.....	69
Şekil 2.32.	St4140 7°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	70
Şekil 2.33.	St4140 7°C Y Doğrultusu Deformasyonu.....	70
Şekil 2.34.	St4140 37°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	71
Şekil 2.35.	St4140 37°C Y Doğrultusu Deformasyonu.....	71
Şekil 2.36.	St4140 2°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	72

Şekil 2.37.	St4140 2°C Y Doğrultusu Deformasyonu.....	72
Şekil 2.38.	St4140 42°C X Doğrultusu Deformasyonu.....	73
Şekil 2.39.	St4140 42°C Y Doğrultusu Deformasyonu.....	73
Şekil 2.40.	igs formatındaki düğüm noktası ısı analiz çıktısı	74
Şekil 2.41.	Düğüm noktalarından kabuk nokta bulutu elde etme	75
Şekil 2.42.	Talaşlı imalat yapmaya hazır model	75
Şekil 3.1.	CNC Dik İşleme Merkezi	76
Şekil 3.2.	Komperatör yardımıyla takım-tutucu hassasiyetinin ölçümü.....	77
Şekil 3.3.	Takım Ölçme Probu Ayarı İçin a)Çap ve b)Boy Ölçümü	77
Şekil 3.4.	Takım Ölçme Probu ile a)Takım Boy ve b)Çap Ölçümü	78
Şekil 3.5.	Takım Ölçme Probu ile Elde Edilen a)Takım Boy ve b)Çap Değerleri	78
Şekil 3.6.	Kaba İşleme İçin Kullanılan Kesici Takım	79
Şekil 3.7.	İnce İşleme İçin Kullanılan Kesici Takım ve Hidrolik Tutucu	80
Şekil 3.8.	İnce İşleme İçin Kullanılan Kesici Takım	80
Şekil 3.9.	Kızıl Ötesi Sıcaklık Ölçer ile İş parçası Sıcaklık Ölçümü.....	81
Şekil 3.10.	İmalatı Yapılan Numune İş Parçaları.....	81
Şekil 4.1.	CMM ölçüm Noktaları.....	82
Şekil 4.2.	2°C Al7075 Hata Analizi	83
Şekil 4.3.	7°C Al7075 Hata Analizi	83
Şekil 4.4.	12°C Al7075 Hata Analizi	84
Şekil 4.5.	17°C Al7075 Hata Analizi	84
Şekil 4.6.	27°C Al7075 Hata Analizi	85
Şekil 4.7.	32°C Al7075 Hata Analizi	85
Şekil 4.8.	37°C Al7075 Hata Analizi	86
Şekil 4.9.	42°C Al7075 Hata Analizi	86
Şekil 4.10.	2°C St4140 Hata Analizi.....	87
Şekil 4.11.	7°C St4140 Hata Analizi.....	87
Şekil 4.12.	12°C St4140 Hata Analizi.....	88

Şekil 4.13.	17°C St4140 Hata Analizi.....	88
Şekil 4.14.	27°C St4140 Hata Analizi.....	88
Şekil 4.15.	32°C St4140 Hata Analizi.....	88
Şekil 4.16.	37°C St4140 Hata Analizi.....	89
Şekil 4.17.	42°C St4140 Hata Analizi.....	89
Şekil 4.18.	30 mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	90
Şekil 4.19.	30 mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	90
Şekil 4.20.	60 mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	91
Şekil 4.21.	60 mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	91
Şekil 4.22.	100 mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	93
Şekil 4.23.	100 mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	93
Şekil 4.24.	160 mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	94
Şekil 4.25.	160 mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	94
Şekil 4.26.	200 mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	95
Şekil 4.27.	200 mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü	95
Şekil 4.28.	Dairesel Cep Ölçüm Noktaları.....	96

GİRİŞ

Talaşlı imalat üretim teknikleri arasında önemli bir yere sahiptir. Talaşlı imalat tekniği haddelme ve döküm ürünleri gibi yarı mamullerin tam mamul hale getirilmesinde ya da parçaların son boyutlarına getirilmesinde kullanılır. Yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemleri frezeleme, tornalama, taşlama, delme ve vargellemedir. Özellikle kalıp imalatı ve karmaşık parçaların işlenmesinde kolaylıklar sağladığı için frezeleme işlemi yaygın olarak kullanılmakta olup diğer imalat yöntemleri arasında ayrıcalıklı bir yere sahiptir. Gelişen teknoloji ile birlikte Bilgisayarlı Sayısal Denetim (CNC) takım tezgâhlarında yapılan yenilik ve kolaylıklar, üretim hızını önemli ölçüde artırmış ve üretim maliyetlerini azaltarak daha verimli çalışma imkanı sağlamıştır. CNC frezeleme ürünleri kalıpcılık, otomotiv, denizcilik, havacılık, biyomekanik sistemler, savunma ve uzay endüstrisi dahil olmak üzere bir çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Frezeleme işlemleri bu özelliğinden dolayı birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Araştırmacılar ve takım tezgâhı üreticileri, üretim hızını artırmanın yanında gerekli toleransları sağlayabilen makine elemanları imal etmeye yönelmişlerdir. Belirtilen bu faktörler birbiriyle çok yakından ilişkili olup işleme hassasiyeti üretim kalitesini doğrudan, üretim hızını ve maliyetini ise dolaylı olarak etkilemektedir.

Takım tezgâhlarının işleme hassasiyetini arttırmada kullanılan yöntemler aşağıda sunulmuştur;

1. Yüksek işleme hassasiyetine sahip özel tezgâh ve takımlar kullanmak, üretim maliyetlerini artıran pahalı bir yoldur.
2. Çeşitli kalite kontrol yöntemleri ile iş parçalarının sürekli ölçülmesi ve tolerans dışı parçaları yeniden imalata alıp düzeltmek, bu metotta düzeltilebilen parçalar tekrar işlenir, hatalı parçalar ıskartaya ayrılır. Takım tezgâhı işleme süresini ve hammadde ve takım maliyetlerini artıran pahalı bir yoldur.
3. İmalat esnasında çevrimiçi ve çevrim dışı hata düzeltme teknikleri kullanarak imalat hatalarını düzeltmek ya da hata oluşmadan önce engellemek. Bu yöntemle takım tezgâhı

yapısı, işleme koşulları ve sıcaklık farklılıklarından dolayı ortaya çıkan işleme hataları azaltılmaya çalışılır. Yukarıda belirtilen iki metoda göre daha düşük maliyetlidir. Bu yüzden de son zamanlarda yapılan çalışmalarda hata indirgeme çalışmaları üzerine birçok araştırma yapılmıştır.

Hata indirgeme çalışmalarında araştırmaların çoğunlukla çevrim içi düzeltme tekniklerine yoğunlaştığı gözlenmektedir. Bunun sebebi, işleme şartlarının karmaşıklığı ve takım tezgâhlarının termal modellerinin doğru bir şekilde oluşturulabilme zorluğundan kaynaklanmaktadır. Çevrim içi tekniklerde anında eş zamanlı ölçüm ve düzeltme (veya telafi) yapıldığı için sistem davranışlarının detaylı modellenmesi gerekmektedir. Hata azaltma yöntemleri kullanarak gerçekleştirilen birçok araştırmada henüz laboratuvar koşullarının dışına çıkılamamıştır. Bunun sebebi kullanılan tekniklerin pahalı donanımlar ve yazılımlar gerektirmesi ve kullanılan yöntemlerin takım tezgâhı işletim sistemlerine uyarlanmasının zorluğundan kaynaklanmaktadır.

Isıl hataların etkisini azaltmak için kullanılan bir diğer yöntem de takım tezgâhının bulunduğu ortamın sürekli olarak 22°C oda sıcaklığında tutulmasıdır. Bu işlem iklimlendirme olarak isimlendirilen metotla yapılır ve çeşitli ısıtma/soğutma ekipmanları (klima gibi) gereklidir.

İklimlendirme işlemleri üretim maliyetlerini artırmanın yanında talaşlı imalat sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri, tezgâh yapısındaki motorların ürettiği ısı gibi ani oluşan ısı farklılıklarını dengelemede yetersiz kalmakta ve takım tezgâhı yapısal elemanlarını soğutmak için ilave soğutma sistemleri de gerekmektedir.

Yapılan kapsamlı literatür araştırmasının sonucunda yukarıda belirtilen hususlar da dikkate alınarak, CNC Frezeleme işleminde ısıl değişimlerin etkisiyle ortaya çıkan işleme hatalarının en aza indirilebilmesi için yeni bir yaklaşım geliştirilmesi gerektiği hissedilmiştir. Bu yaklaşımla, CNC frezeleme işleminde ek donanımlar kullanmaksızın ve imalat hızında düşüşe meydan vermeden boyutsal tamlığın iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu hedef doğrultusunda iş parçası CAD modelinin ısıl genleşme/büzülme davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle (FEA) analiz edilecek ve iş parçası CAD modeli bu analiz sonuçlarına göre “imalat ortamı hangi sıcaklıkta olursa olsun işparçası tam boyutlarında işlenecek şekilde” revize edilecektir. Revizyon işlemi için bilgisayar destekli analiz

modülü ile CAD modülünü entegre eden yeni bir yazılım geliştirilecektir. Bu yazılım ısı analiz sonuçlarını dikkate alarak iş parçası CAD modelini yeniden yapılandıracaktır. Düzeltilmiş yeni CAD modeli üzerinde gerçekleştirilen CAM uygulaması ile hatayı düzeltecek alternatif CNC işleme kodları elde edilecektir. Özdeş numuneler farklı imalat ortam sıcaklıklarında işlenerek düzeltme stratejisinin performansının tekrarlanabilirliği araştırılacaktır. Geliştirilen yöntemle talaşlı imalat sektöründe yüksek boyutsal kalitede parça üretebilmek için halen kullanılmakta olan, ortamın sürekli ideal sıcaklıkta (22 °C) kalması için klimatize edilmiş ve yalıtılmış atölyeler oluşturulmasına ihtiyaç kalmayacak, imalat ortamları hangi sıcaklıkta bulunursa bulunsun yüksek boyutsal tamlikta ürünlerin üretiminde taşlama işlemine gereksinim ortadan kaldırılabilecek ve bitirme işlemi sayısını azaltarak üretim maliyetlerinin azaltılması mümkün olacaktır.

Tez çalışması kapsamında ortam sıcaklığı ve işleme sırasında iş parçası sıcaklığına bağlı oluşan ısı kaynaklı boyutsal hataların etkisini azaltmak için uygulanan yeni yöntemlerle farklı sıcaklıklarda iş parçaları üç eksenli CNC dik işleme merkezinde işlenecektir.

Tez çalışmasında izlenmesi düşünülen yöntem aşağıdaki şekilde planlanmıştır.

Birinci bölümde, tez çalışmasında kullanılan analiz metotları hakkında açıklayıcı teorik bilgiler ve çalışma alanından bahsedilmiştir. Ayrıca konu ile ilgili literatür özeti verilmiştir.

İkinci bölümde, yapılan çalışmanın teorik alt yapısı kullanılan yazılımlar ve yöntem ile ilişkili olarak oluşturulmuş ve sunulmuştur.

Üçüncü bölümde teorik alt yapı sonrası kullanılan malzeme ve teçhizat bilgileri sunulmuş ve deneysel çalışma hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, Alüminyum ve Çelik malzeme için elde edilen deney sonuçları grafiklerle ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Beşinci ve son bölümde, tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların genel bir değerlendirilmesi yapılmış ve daha sonra yapılacak çalışmalar için bazı öneriler verilmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. CNC Tezgâhların Tarihçesi

Nümerik kontrol fikri II. Dünya savaşının sonlarında ABD hava kuvvetlerinin ihtiyacı olan karmaşık uçak parçalarının üretimi için ortaya atılmıştır. Çünkü bu tür parçaların o günkü mevcut imalat tezgâhları ile üretilmesi mümkün değildi. Bunun gerçekleştirilmesi için Parsons Corporation ve MIT (Massachusetts Institute of Tehcnology) ortak çalışmalara başladı. 1952 yılında ilk olarak bir freze tezgâhını nümerik kontrol ile teçhiz ederek bu alandaki ilk başarılı çalışmayı gerçekleştirdiler. Bu tarihten itibaren pek çok takım tezgâhı imalatçısı nümerik kontrollü tezgâh imalatına başladı. İlk önceleri NC takım tezgâhlarında vakumlu tüpler, elektrik röleleri, karmaşık kontrol ara yüzleri kullanılıyordu. Ancak bunların sık sık tamirleri hatta yenilenmeleri gerekiyordu. Daha sonraları NC takım tezgâhlarında daha kullanışlı olan minyatür elektronik tüp ve yekpare devreler kullanılmaya başlandı. Taylor, Merchant ve Kronenberg gibi araştırmacılar yaptıkları çalışmalar sonucunda talaş kaldırma işlemlerinin mekaniğini incelemişler bu alandaki gelişmelere öncülük etmişlerdir. Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler nümerik kontrollü sistemleri de etkilemiştir. Artık günümüzde NC tezgâhlarda daha ileri düzeyde geliştirilmiş olan entegre devre elemanları, ucuz ve güvenilir olan donanımlar kullanılmaktadır [1].

ROM (Read Only Memory) teknolojisinin kullanılmaya başlanmasıyla da programların hafızada saklanması mümkün olmuştur. Sonuç olarak bu sistemli gelişmeler CNC' nin (Computer Numerical Control) doğmasına öncülük etmiştir. CNC teknolojisi daha sonra torna, matkap vb. takım tezgâhlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

CAD (Computer Aided Design) ve CAM (Computer Aided Manufacturing) uygulamaları birleştirilerek CAD/CAM sistemleri oluşturulmuş, bunların CNC ve DNC tezgâhlarla entegrasyonu ile Esnek İmalat Sistemleri FMS (Flexible Manufacturing System) ortaya çıkmıştır. FMS ile fabrikaların kalite kontrol, stok kontrol ve yönetim gibi diğer kısımlarında bilgisayar kontrolü altında birleştirilmesi Bilgisayar Destekli Bütünleşik İmalat Sistemleri CIM (Computer Integrated Manufacturing) devrini başlatmıştır.

1.2. CNC Nedir?

Bilgisayarlı Nümerik Kontrolde (Computer Numerical Control) temel düşünce takım tezgâhlarının sayı, harf vb. sembollerden meydana gelen ve belirli bir mantığa göre kodlanmış komutlar yardımıyla işletilmesi ve tezgâh kontrol ünitesinin yazılımla kontrol edilebilmesidir. Bilgisayarlı Nümerik Kontrolde tezgâh kontrol ünitesinin bilgisayarla kontrol edilmesi sonucu programların muhafaza edilebilmelerinin yanında parça üretiminin her aşamasında programı durdurma, programda gerekli olabilecek değişiklikleri yapabilme, programa kalınan yerden tekrar devam edebilme ve programı son şekliyle hafızada saklamak mümkündür [1].

1.3. NC ve CNC Takım Tezgâhları

Nümerik Kontrol (NC) metal ve metal olmayan malzemelerden talaş kaldırarak üretim yapan takım tezgâhlarına uygulanabilen bir yöntemdir. Yaygın olarak kullanılan NC tezgâhlar şunlardır;

- Torna tezgâhı
- Freze tezgâhı
- Matkap tezgâhı
- Delik genişletme tezgâhı
- Taşlama Tezgâhı

NC takım tezgâhlarında CNC tezgâhlarda bulunan depolama ünitesi (hafıza) bulunmaz. Takım tezgâhının kontrol ünitesi bir satırdaki bütün verileri okur ve gerekli işleme operasyonlarını gerçekleştirir. Parça programları kâğıt şerit üzerindeki farklı konumlarda bulunan deliklerden oluşur.

CNC tezgâhların üstünlükleri şunlardır;

- Takım tezgâhına yüklenen parça işleme programları, kontrol ünitesi hafızasında saklanabilir, gerek duyulursa program üzerinde gerekli değişiklikler yapılarak tekrar kullanılabilir.
- İşleme programları içerisinde döngüler (delik delme gibi) ve alt programlar tanımlanabilir.
- Kesici takımlara uygulanan boy ve çap telafisi işlemleri üretimi kolaylaştırır.
- İşleme kalitesi ve hızı konvansiyonel tezgâhlara göre çok daha iyidir.
- CNC kontrol ünitesi ile birden fazla bilgisayar iletişim kurabilir.
- Takım tezgâhında parça işlenmeden grafik olarak parça programı izlenebilir.
- Kesici takımlar otomatik olarak değiştirilir.
- Tezgâh ayarlama zamanı kısadır.
- İnsan etkisi az olduğu için seri ve özdeş ürünler üretilebilir.
- Tezgâh verimliliği yüksektir.
- Elektrik, işçilik ve malzeme tüketimi en aza indirgenmiştir.
- Master, şablon gibi elemanlar kullanmaya gerek yoktur.

CNC tezgâh kullanımının kısıtları şunlardır;

- Ayrıntılı imalat planı gerekir.
- Kurulum maliyeti konvansiyonel tezgâhlara oranla yüksektir.
- Tezgâh işletme ücreti yüksektir.
- Kaliteli ve pahalı takımlar kullanılır.
- Tezgâh bakım maliyetleri yüksektir.
- Kalifiye eleman gerektirir.

1.3.1. CNC Tezgâh Seçimi

CNC tezgâh seçiminde aşağıdaki özelliklere dikkat edilmelidir.

- Takım tezgâhında işlenecek parça boyutu
- Tezgâh işleme hassasiyeti
- İş mili devir sayısı
- Motor gücü ve torku
- Tezgâh tablasının taşıyabileceği yük değeri
- Tezgâh magazin alabileceği takım sayısı ve özellikleri

- İşlenecek iş parçası türü
- Kesme şartları (ıslak kuru)
- Kullanım kolaylığı
- Yedek parça ve servis temininin kolaylığı

Yukarda sayılan özelliklere göre takım tezgâhı seçildikten sonraki bir diğer önemli aşama takım tezgâhının montajı ve kurulumudur. Bu konuda imalatçı firma tarafından önerilen kurulum montaj ve zemin hazırlığı talimatlarına uyulması takım tezgâhının titreşimsiz ve düzgün çalışmasıyla birlikte işleme hassasiyetini de artıracaktır.

1.3.2. CNC Programlama İlkeleri

İşlenecek iş parçası boyutları ve kullanılacak kesici takım özelliklerine göre hareket ve takımların tanımlandığı komutlar bütününe CNC programı denir. Kodlar bir dizi harf, rakam ve noktalama işaretlerinden oluşur. Bir satır düzenindeki ";" işaretine kadar yazılı kodlar bütününe "blok" adı verilir. Örneğin N01 G90 G54 X10. Y26. Z40. ;. Bu kodlar ve fonksiyonları Tablo 1.1 ve 1.2'de gösterilmiştir. CNC programlar rakamlardan oluşan isimlerle tanımlanır örneğin O5155 (Fanuc için), %5155 (Siemens için).

CNC programlar el ile takım tezgâhı kontrol panelinden satırlar halinde ya da, CNC tezgâha bağlı bir bilgisayar bağlantısı (RS232 gibi) ile grafik destekli CAD/CAM sistemleri yardımıyla tezgâha aktarılır. CNC programlarda kullanılan temel kod grupları aşağıda verilmiştir.

Tablo 1.1 CNC Programlamada Temel Kod grupları

Nxx	Program satır numarası
Gxx	Hazırlık kodları
Fxx	İlerleme hızı
Mxx	Röle sinyal kodları
Sxx	İş mili devir sayısı
Txx	Kesici takım numarası

Burada xx nümerik değişkeni temsil etmiştir.

Hazırlık kodları (Gxx) CNC ana programındaki farklı NC algoritmaları içerir. Örneğin dairesel (G02, G03) ve lineer (G01) interpolasyon standart kodları. Vida işleme, matris olarak yayılmış delikleri sırasıyla delme, takımın çap ve uzunluğunun ayarlanması gibi değişik operasyonları yapabilen alt programlar G kodları sınıfına dâhildir. Röle sinyal kodları (Mxx) tezgâhtaki röleye veya PLC'ye (Programmable Logical Control) bağlı anahtarları açıp kapamak için kullanılır. Örneğin iş mili motorunun ve soğutma suyu pompasının çalıştırılması veya durdurulması, eksen ilerlemelerinin durdurulması, programın bittiğini belirtip tezgâhın başlangıç noktasına götürülmesi gibi komutları içerir.

Tablo 1.2 ISO Kod Sistemi

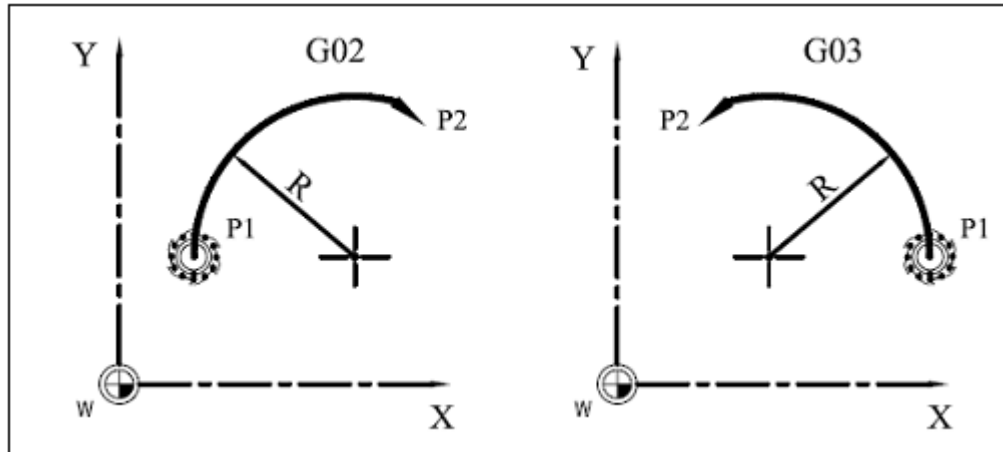
O	Program numarası
N	Satır numarası
F	İlerleme hızı(mm/dk veya mm/dev)
S	Devir sayısı(dev/dk)
T	Kesici takım
M	Yardımcı fonksiyonlar
G	Hazırlık fonksiyonları
P	Besleme süresi(milisaneye)
L	Tekrarlama sayısı
Q	Kesme derinliği
X	Koordinat kodları(Takımın x eksenini yönündeki hareketi)
Y	Koordinat kodları(Takımın y eksenini yönündeki hareketi)
Z	Koordinat kodları(Takımın z eksenini yönündeki hareketi)
I	Dairesel interpolasyonda x eksenini doğrultusundaki yarıçap bileşeni
J	Dairesel interpolasyonda y eksenini doğrultusundaki yarıçap bileşeni
K	Dairesel interpolasyonda z eksenini doğrultusundaki yarıçap bileşeni
R	Çevrimde kesmenin başlangıç noktası, daire yarıçapı
C	Pah kırma işlemi
H	Takım uzunluk telafisi
/	Bu işaretin bulunduğu satır okunmadan geçilir

NC programı tezgâhın CNC ünitesine direkt olarak klavyesinden, ethernet yardımıyla veya RS-232 seri iletişim kablosu ile merkezi imalat bilgisayarıdan aktarılabilir. Aynı NC program grafik destekli CAD/CAM program paketlerinden daha hızlı ve hatasız olarak parçanın resminden çıkartılabilir [2].

1.3.2.1. Geometrik Kodlar

Hazırlık fonksiyonları G kodları ile ifade edilir. Kalıcı ve geçici olmak üzere iki tür G kodu vardır. Bu kodlar kendisinden sonra gelecek farklı bir G koduna kadar veya iptal edilinceye kadar geçerliliğini korur. Takımın gideceği pozisyon mutlak (G90) ya da artımsal (G91) ölçü sistemi ile tanımlanmalıdır. G01 kodu ile birlikte X, Y, Z eksenlerinde takımın ilerleme hızı tanımlanmış F ilerleme hızı değerindeyken, G00 kodu ile takımın ilerleme hızı F değerinden çok daha hızlıdır.

G02-G03 dairesel interpolasyon kodu kesici takımın eğrisel ya da dairesel hareket yapmasını sağlar. G02 takımın saat yönünde hareketini sağlarken, G03 ise takımın saat yönü tersine hareketini sağlar.



Şekil 1.1. Dairesel Harekette Yön Belirlenmesi [3]

Bu kodlar hakkında geniş bilgi tablo halinde Ekler kısmında sunulmuştur

1.3.2.2.Yardımcı Kodlar

Yardımcı kodlar M kodları ile ifade edilir. M kodları CNC tezgâhın çeşitli bölümlerini açma kapama şeklinde kontrol eder. İş milinin çalıştırılıp durdurulması, soğutma sıvısının açılıp-kapatılması, işleme programını durdurma gibi işlemleri yerine getirir. M kodları 0'dan 99'a kadar iki hanelidir.

1.3.2.3. CAM Mantiğı

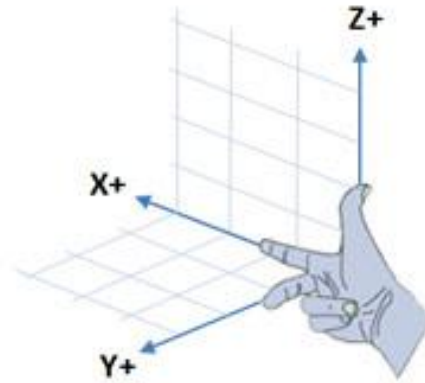
CNC parça programını elle yazmak yerine bilgisayar desteği ile oluşturmak işlem süresini kısalttığı için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Öncelikle işlenecek

parçanın boyutlarına göre bir katı model CAD paket programları yardımıyla oluşturulur. Bu programlarla bütünleşik çalışan CAM modülleri kullanılarak aşağıdaki aşamalar sırayla uygulanır.

- CAM modülü açılarak yapılacak işlem (frezeleme, tornalama) seçilir.
- İşlenecek iş parçası için önce kütük sonra parça modeli seçilir.
- Varsa aparat ve fikstürler seçilir.
- İşleme hassasiyeti değeri girilir.
- İşleme sırasında kullanılacak kesici takımlar belirlenir.
- Kesici takımlar için işleme operasyonları belirlenir.
- Takım yolları oluşturulur.
- Programda simülasyon yaptırılarak işlemler kontrol edilir.
- Mevcut tezgâha uygun işleme kodları üretilir.
- Bu kodlar tezgâha aktarılır.

1.3.3. CNC Tezgâh Eksenleri

CNC takım tezgâhı eksenleri Kartezyen koordinat sistemine göre düzenlenmiştir. Eksenin bir yönü artı diğer yönü eksidir. Eksen yönlerini tanımlanırken sağ el kuralı kullanılır.



Şekil 1.2. Sağ El Kuralı

Şekil 1.2' de gösterildiği gibi; parmak uçları + yönü gösterecek şekilde, başparmak +Z yönünü, orta parmak +Y yönünü ve işaret parmağı +X yönünü göstermektedir.

CNC torna tezgâhında X ve Z eksenleri varken. CNC freze tezgâhlarında üç eksen

bulunur. CNC frezelerde tablanın boyuna hareketini X eksen, enine hareketi Y eksen ve kesici takımın aşağı yukarı hareketi ise Z doğrultusundadır.

1.4. Literatür Araştırması

Takım tezgâhının ve işlediği parçanın doğruluğunu etkileyen en önemli hatalardan biri de termal hatalardır [4, 5]. Bu hatalar iki yolla azaltılabilir ilki hatalardan kaçınma ikincisi ise hatayı indirgeme yöntemidir [6]. Hatadan kaçınma yönteminde termal hataları en aza indirmek için ısı kaynakları sistemden uzaklaştırılmalı, takım tezgâhının yapısı ve tezgâh imalatında kullanılan malzemeler değiştirilmelidir. Fakat bu işlemler üretim maliyetlerinin artmasına sebep olacaktır. Hata indirgeme metotları termal hatayı tahmin etme ve sonrasında hataları bir yazılım ile azaltma eğilimindedir. Tezgâh hataları ile yer değiştirme hataları arasında ilişki modellenir, hata indirgeme sinyalleri CNC kontrolörüne yollanır, böylece tahmin edilen termal tezgâh hatasının tersi yönünde bağlı hareket iş miline verilerek hata indirgenir. Yüksek tamlıkta işleme kabiliyeti, yüksek kalite ve düşük maliyetli üretim için en verimli metotlardan biri de hata indirgeme işlemleridir [7, 8]. Hata indirgeme işlemlerinde iki sınırlayıcı faktör vardır bunlar; termal hata modelinin yeterli doğruluğu sağlayamaması ve sıcaklık değişiklikleri arasındaki ilişkidir. Sıcaklık değişimlerindeki yüksek farklar tespit edilerek bu değerlerin elemine edilmesi gerekir yoksa önemli sıcaklık değişiklikleri yanlış algılanabilir ve oluşturulan termal hata modelinin doğruluğu sapmaya uğrar.

Sürekli olarak çalışan bir takım tezgâhında, zamana bağlı olarak işleme şartları ve çevresel etkilerin değişiklik göstermesiyle doğrusal olmayan termal deformasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu mekanizma takım tezgâhı deformasyonlarını çok karmaşık hale getirmekte ve dolayısıyla ısı kaynaklı hataların tahminini zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak, ısı kaynağının yerine (motorlar, yataklar, hidrolik sistem, ortam sıcaklığı gibi) göre değişen anahtar sıcaklık değişiklikleri ve termal hatalar arasındaki ilişkinin en iyi şekilde ortaya konulması ile termal hata modeli başarıya ulaşır [9, 10].

Modern imalat şartlarında, üretim maliyetlerini düşürme ve özellikle işparçası boyutsal tamlığını artırmada yöntem geliştirme büyük öneme sahiptir. Çeşitli etkenler sonucu oluşan geometrik ve boyutsal hatalar, işleme sırasındaki takım deformasyonu ve işparçası hataları, termal çarpılmalar, takım aşınması ve takım tezgâhı hatalarından oluşur. İş parçası ölçü tamlığını geliştirmede iki ana yaklaşım kullanılır; iş parçası-takım

hareketlerinin modellenmesi ve boyutsal hataları indirmek için kesici takım pozisyonunun interpolasyonu veya alternatif takım yolu oluşturma yaklaşımıdır [11].

Okafor ve Arkadaşları [12] yaptıkları çalışmada çevresel kontrol ünitesi boyunca düşük kuvvetli (low powered) He-Ne laser (Renishaw) kullanarak dikey işleme merkezindeki lineer hataların ve sıcaklık değişiminin sonuçlarını incelemişlerdir. Çalışmada üç eksenli, Acramatic 2100 CNC işlemciye sahip Cincinnati Milacron Sabre 750 CNC tezgâh kullanmışlardır. Tezgâhtaki sıcaklık dağılımı her bir eksen üzerine yerleştirilen üç farklı sıcaklık sensörü ile ölçülmüştür. Dik işleme merkezinin doğruluğu, geometrik ve termal hataların fonksiyonu olan çevresel etkiler (bağıl nem, hava sıcaklığı ve basıncı), sıcaklık dağılımı ve kesici takımın pozisyonu dikkate alınarak tanımlanmıştır. Yapılan ölçümlerde eksen sürücü motorlarının en etkili ısı kaynağı olduğu sonucuna varmışlardır. Tezgâhın soğuk şartlarda çalışmasında lineer pozisyon doğruluğu en iyi iken, işleme zamanındaki artış ile birlikte üç eksen için de bu doğruluğun bozulduğunu tespit etmişlerdir.

Wang ve Arkadaşları [13] zamana bağlı hata azaltma tekniğinin verimliliğini ve doğruluğunu geliştirmek için, bir Fourier Serisi-Yapay Sinir Ağı tabanlı hata azaltma yöntemi kullanarak farklı işleme şartlarında CNC freze tezgâhında termal etkilerden kaynaklanan geometrik hataları azaltmışlardır. İlk olarak, geometrik hataları göz önüne alarak, yüksek tamlık ve hızlı hesaplama ile Fourier serisi yardımı ile hata modelini oluşturmuşlardır. İkinci olarak farklı hata eğrilerinin eğimleri ile önemli termal noktaların sıcaklıkları arasındaki ilişkiyi Yapay Sinir Ağı kullanarak incelemişlerdir. Daha sonra herhangi bir termal konumdaki eksen pozisyonlama hatasını azaltmak için bileşik hata modelini oluşturmuşlardır. Son olarak da çok eksenli eş zamanlı hata azaltma ve otomatik hata modelini karakterize eden eş zamanlı dinamik hata azaltma sistemini geliştirmişlerdir. Yapılan deney sonuçları, kullanılan metodun farklı işleme şartlarında ölçü tamlığını iyileştirdiğini kanıtlamıştır.

İşleme hatalarının en önemli kaynaklarından biri olan termal hatalar, toplam hatanın %40 -%70'ini oluşturmaktadır [14]. Son yıllarda araştırmacılar, termal etkileri en aza indirmek için termal olarak optimize edilmiş tezgâh yapısı geliştirme, ısı kaynaklarını sistemden ayrı yerlere yerleştirme ve geliştirilmiş soğutma teknikleri kullanma yöntemlerine başvurmuşlardır [13]. Bu yöntemlerdeki iyileştirmelerin sınırlı olması

üretim maliyetlerini önemli ölçüde artırmıştır. Bu yüzden de düşük maliyetle hata azaltma tekniği, CNC tezgâhların işleme doğruluğunu artırmada büyük önem taşımaktadır [13]. Matematik modele bağlı hata azaltma yazılımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu matematik modeller başarılı gözükmesine rağmen birçoğu deneysel olarak özel kesici takımlarla yapılan işleme verilerini kullandığı için genel olarak her işleme şartına uygulanamaz. Yani bu metotlarla yaygın olarak kullanılan termal hata düzeltme tekniklerinin eksikliklerini tamamlayacak yüksek doğrulukta bir matematik model oluşturmak oldukça güçtür [14].

Lu ve Arkadaşları [15] üç eksenli bir tezgâhta termal etkiler sonucu oluşan geometrik hataları belirlemek için 21 geometrik hata bileşenini ve bu hataların farklı sıcaklıklardaki değişiminin hesaplanması gerektiğini ve bu hataları doğru bir şekilde tespit etmenin çok güç ve zaman alıcı olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada üç eksendeki pozisyonlama hatalarını inceleyen bir metot geliştirmişlerdir. İşleme uzunluğu ve bilyeli vida sıcaklığının fonksiyonu olarak CNC tezgâhta işleme sırasında oluşan pozisyonlama hatalarını modellemişlerdir. Diğer 18 hata bileşeni soğuk başlama değerleri için özdeş kabul edilmiştir. Geliştirilen modelin doğruluğunu göstermek için CNC işleme merkezi simule edilmiş ve işlenen parçalar ölçülmüştür. Hata azaltma tekniği sonrasında ısı kaynaklı boyutsal hatalar, frezelemede 115,40 μm 'den 45.37 μm ye, delme işleminde ise iki delik arası maksimum uzaklık hatası ise 38.69 μm 'den 14 μm 'ye azaltılmıştır.

Han ve Arkadaşları [16] sıcaklık değişimlerinin hassas olarak tespit edilmesi ve termal hata modelinin hatasız bir şekilde belirlenmesinde termal hata azaltma işleminin zorluklarına değinmişler ve yaptıkları çalışmada takım tezgâhları için matematiksel termal hata yaklaşımı kullanmışlardır. Fuzzy küme analizi ile sıcaklık değişiklikleri belirlenmiş ve sonra karakterize edilen değişimleri bağımsız bir şekilde birleştirilerek iyileştirmiştir. Cluster (küme) doğruluğu, kümelerin mantıklı ölçümü ve sıcaklık değişimlerinin doğru sınıflandırılmasına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca bu termal deformasyon ve sıcaklık değişiklikleri arasındaki ilişkiyi tespit etmek için gerilme analizi kullanarak bir matematik model oluşturmuşlardır. Ön görülen modelin performansını ölçmek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Pt-100 termal rezistanslar ve Eddy akım sensörleri kullanarak sırasıyla sıcaklık ve termal dalgalanma izlenmiştir. Dört küme için 32 farklı sıcaklık değerinde sınıflama yapmak için Fuzzy küme analizi

kullanılmıştır. Bir gerileme (regresyon) termal hata modeli 4 kritik sıcaklık noktası için uygulanmıştır. Bu sonuçlar 4 temsili sıcaklık değişkeni ile takım tezgâhındaki termal hataların tahmin edilebileceğini göstermiştir. Deney sonuçlarından Z eksenindeki 25 μm lik hata 1.8 μm 'ye, Y eksenindeki 7 μm 'lik hata 0.7 μm 'ye düşürülmüştür. Geliştirilen metotla takım tezgâhının doğruluğunun artırılabilceği ve bu yöntemin farklı CNC tezgâhlara da uygulanabileceği gösterilmiştir.

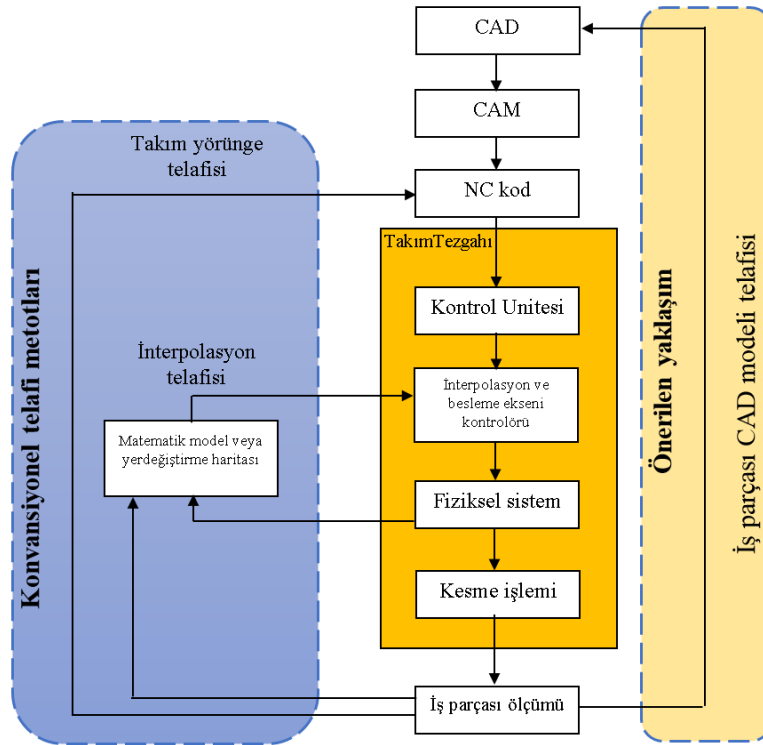
Zhang ve Arkadaşları [17] tarafından takım tezgâhlarının termal simülasyonla doğruluğunu artırmak için, takım tezgâhının sıcaklık haritası ve termal deformasyon modeli elde edilerek dik işleme merkezinin simülasyon modelini oluşturulmuşlardır. Simülasyon ve deneysel sonuçları karşılaştırıldıktan sonra sonlu eleman modelinin doğruluğu ispatlanmıştır.

Qianjian ve Arkadaşları [18] termal hataların takım tezgâhlarının doğruluğunu etkileyen, iş parçasında boyutsal hatalara sebep olan en önemli unsur olduğunu ve hataların doğru modellenmesinin hata azaltma işleminin önkoşulu olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada gerilemeyi (regresyon) takip eden tahmin (PPR (Projection pursuit regression)) metodu ile bir termal hata modeli oluşturulmuştur. PPR hata modeli ile CNC tezgâhın doğruluğu iyileştirilmiştir. PPR tabanlı termal hata azaltma modeli gündelik kullanılan CNC tezgâha uygulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda iş parçası çapında ölçülen termal hata 34 μm 'den 5 μm 'ye azaltılmıştır.

Schmitz ve Arkadaşlarının [19] yaptıkları durum değerlendirmesi (case study) çalışmasında geometrik, termal, yüzeysel, kesme kuvvetlerinden oluşan hatalar ve tezgâh parçalarının boyutsal hatalar incelenmiştir. Yapılan ölçümlerde bağımsız olarak belirtilen analizler yapılmıştır. 1) lazer toplu çubuk kullanılarak yarı-durgun (quasi-static) hatalar; 2) termal etkilerden dolayı oluşan geometrik hata değişimi; 3) kapasitans ölçer kullanarak iş mili termal hataları; 4) ızgaralı kodlayıcı (grid plate encoder) kullanarak iki boyutlu yüzey hataları ve 5) kesme sırasında zorlanmış titreşim sonucu oluşan yüzey hataları. İlk üç hata bileşenin etkileri, Monte Carlo Simülasyonu içine entegre olmuş homojen dönüşüm matris dönüşümü kullanılarak iş parçası boyutlarıyla ilişkilendirilmiştir. Bu hata kaynaklarının etkileri incelenerek kesme kuvveti hatalarının yüksek hızda işleme tezgâhı-takım tutucu kombinasyonunda en etkili hata bileşeni olduğu tespit edilmiştir [19].

Termal hatalara sebep olan ısı büyük oranda işleme sırasında iş mili ve tezgâh eksen motorlarından ortaya çıkar. Buna ek olarak kesme sırasında ısı açığa çıkar ve deforme olmuş talaş ile birlikte bu ısı transfer olur. Genellikle talaştaki ısıyı uzaklaştırmak için çeşitli soğutucular kullanılır. Bu ısı kaynakları tezgâh geometrisini bozar ve tezgâh parçalarında hatalara sebep olur [19].

Sortino ve Arkadaşları [11] yaptıkları çalışmada, iş parçası boyutsal tamliğini artırmak için kullanılan yöntemleri (Tablo 1.3) göstermiş ve CAM yazılımı ile üç boyutlu CAD model için eğri uydurma yöntemi kullanarak yeni bir hata azaltma yaklaşımı sunmuşlardır (Şekil 1.3.). İlk olarak iş parçasına CAM yapılarak takım yolları oluşturulmuştur. Daha sonra optik metotlarla işparçası boyutları ölçülmüştür. İdeal iş parçası modeli ile ölçülen nokta bulutunun yer değiştirmeleri hesaplanmıştır. Son olarak yer değiştirme vektörleri uygulanarak hatalar indirgenmiş bir iş parçası modelini oluşturulmuştur. İndirgenmiş takım yolunu hesaplamak için oluşturulan model CAM yazılımı tarafından referans alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda geliştirilen yeni yaklaşımın iş parçasının geometrik hatalarını azalma yeteneği gösterilmiştir.



Şekil 1.3. İş parçası ölçü hatalarının indirgenmesi için önerilen yaklaşım [11]

Tablo1.3 Boyutsal tamlik elde etmede kullanılan yöntemler [11]

Yayınlanma yılı	Boyutsal hata sebepleri			Yüzey ölçüm methodu		İşleme yöntemleri		Hata düzeltme yöntemleri	
	Takım tezgâhındaki hata	Takım- iş parçası arasında sapma	Termal deformasyonlar	Optik methodlar	Temas methodlar	2D	3D	Takım yörünge telafisi	Interpolatör telafisi
1995	x			x					x
1996			x	x		x			x
1997	x	x	x		x			x	
1998	x	x	x		x	x		x	
1998	x	x	x		x	x		x	
1999	x	x	x	x	x	x		x	
2003		x			x		x	x	
2004		x			x	x		x	
2006	x				x		x		x
2008	x	x	x	x		x		x	
2010	x				x	x		x	
2011		x		x		x		x	
2011	x	x	x	x	x		x	x	
2011		x		x		x			x
2012	x			x		x	x	x	
2012			x	x			x		x
2012	x				x		x	x	
2013	x	x	x		x		x	x	

Vyroubal [20] yaptığı çalışmada yüksek tamlıkla işlemede temel alanlardan birinin de tezgâhın termal durumunun izlenebilirliğinin önemini vurgulamış ve işleme şartları, soğutma sisteminin performansı ve üretim sırasında tezgâhın termal deformasyonunun yazılımla azaltılması konusunda çalışma yapmıştır. Geliştirilen ayrışma analizi tabanlı yöntemle, iş mili eksenini doğrultusundaki tezgâh termal hatalarının azaltılmasına odaklanılmıştır. Özel olarak tasarlanmış ölçüm sistemi yardımıyla tezgâh kolonundaki deformasyonlar, yatak ve aynı anda iş mili-takım deformasyonları ölçülebilmektedir. Hata telafi miktarı sıcaklık ölçümleri kullanılarak multinomiyal eşitliklerin toplamı ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamanın doğruluğu, iş parçası ve soğutma suyu sıcaklığı gibi ölçümler kullanılarak artırılmıştır. Geliştirilen bu yöntem gelişmiş tezgâhlara uygulanabildiği gibi yavaş kontrol sistemli eski tezgâhlara da uygulanabilmektedir.

Isı dalgalanmaları etkileri tamamen yok edilemeyen fiziksel bir olaydır. Yine de bu olay tezgâh geliştirme süreçlerinde mutlaka ele alınması gereken bir konudur. Isı ve ısı akısının istenmeyen etkileri tezgâh gövdesi ve iş parçasında meydana gelen hacimsel ve geometrik değişikliklerdir. Bu değişiklikler takım ve işparçası arasında belirlenmiş toleransları olumsuz yönde etkileyen istenmeyen hareketlerin (eylemlerin) oluşmasına sebep olur. Hata düzeltme mekanizmaları bu hareketlerin yada sonuçlarının indirgenmesini amaçlar [20].

Bryan [14] tarafından sunulan çalışmada takım tezgâhındaki ısı kaynakları çeşitli gruplara ayrılmıştır. İlk grup tezgâhın kendisi (motorlar yataklar ve sürücüler), ikinci grup tezgâhta kullanılan tüm sıvılar, üçüncü grup takım tezgâhının bulunduğu ortam, sonuncu ise kesme işleminin kendisidir.

Birçok araştırmacı takım tezgâhlarının termal davranışlarını tanımlamak için farklı indirgeme yöntemleri kullanmışlardır. İstatistiksel yaklaşımla az sayıda sıcaklık sensörünü takım tezgâhı üzerine kolayca uygulamışlardır [21, 22]. Fakat bu metotta sensör sayısının az olması tezgâhtaki tüm ısı kaynaklarının etkilerini gösterememiştir. Diğer yandan sıcaklık sensör sayısının fazla olması ise hata azaltma işleminin doğruluğu ile ilgili iyi sonuçlar vermeyebilmektedir [23].

Yang ve arkadaşları [24] transfer fonksiyonu yaklaşımı kullanarak geliştirdikleri modelle işleme hatalarını azaltmışlardır. Bu metodun dezavantajı ise termal kaynakların her birinin ayrı ayrı analizinin çok uzun zaman alması ve lineer olmayan matematiksel denklemleri çözmek için harici bilgisayar donanımına ihtiyaç duyulmasıdır. Kang ve arkadaşları [9] ise çeşitli yapay sinir ağı modelleri kullanarak işleme hatalarını azaltmaya çalışmışlar ancak YSA'yı eğitmek için çok sayıda veriye ihtiyaç duyulduğu için işlem süresi uzayarak zaman kaybına sebep olmuştur.

İşleme sırasında meydana gelen toplam işleme hatalarının büyük bir kısmı hacimsel pozisyonlama hatalarından meydana gelir. Düşük maliyetle tezgâh doğruluğunu artırmak için termal hatalar yanında geometrik hataların da karakterize edilerek belirlenmesi gerekir [25]. Bu çalışmada üç eksenli dikey işleme merkezindeki geometrik ve termal hatalar dikkate alınarak kinematik hata modeli geliştirilmiştir. Rijit cisim kinematiği ve dar açı yaklaşımı ile üç eksenli dik işleme merkezi, homojen koordinat dönüşümü kullanılarak modellenmiştir. Hata indirgeme için geliştirilen matematik model, iş parçası-takım ara yüzündeki hata vektörünü hesaplamak için kullanılmıştır [25].

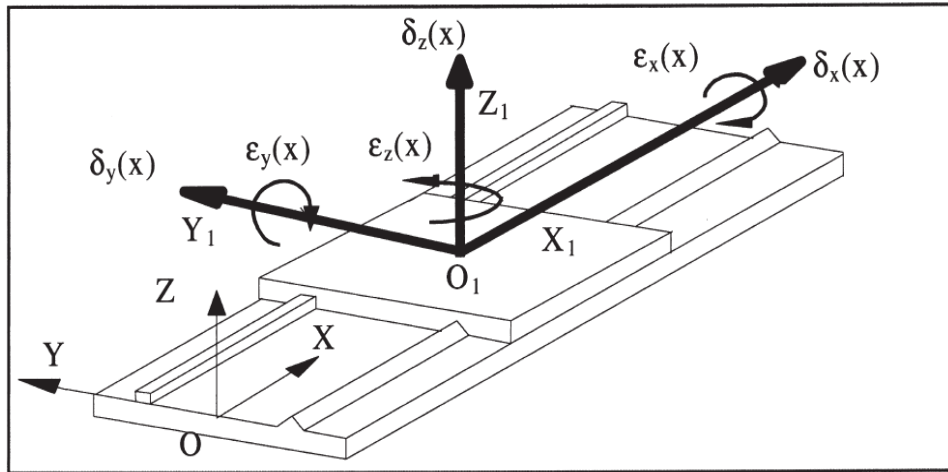
Tablo 1.4 Üç eksenli dik işleme merkezinde oluşan 21 geometrik hata bileşeni [25]

Lineer pozisyonlama hataları (oranlama hatası)	3
Doğrusallık hataları	6
Açısal hatalar	9
Diklik hataları- makine eksenleri	3
	Toplam 21 hata bileşeni

CNC tezgâhların pozisyonlama hassasiyeti, lineer ve dairesel eksenler ve tezgâh yapısını oluşturan yapı elemanlarının stabilizesine bağlıdır. Bu hassasiyeti artırmak özellikle de büyük ve karmaşık sistemlerde çok zordur [27].

Tablo 1.5 Hata bileşenleri şematik gösterimi [25]

OXYZ	Referans koordinat sistemi
$O_1X_1Y_1Z_1$	Taşıyıcı koordinat sistemi
X	İstenilen yöndeki hareket
$\varepsilon_x(x)$	X-ekseni etrafında dönme hatası (roll)
$\varepsilon_y(x)$	Y-ekseni etrafında dönme hatası(pitch)
$\varepsilon_z(x)$	Z-ekseni etrafında dönme hatası (yaw)
$\delta_x(x)$	X eksenı boyunca öteleme (ölçek) hatası
$\delta_y(x)$	Y eksenı boyunca öteleme (yatay doğrusalık) hatası
$\delta_z(x)$	Z eksenı boyunca öteleme (dikey doğrusalık) hatası



Şekil 1.4. Bir takım tezgâhı taşıyıcı sisteminin altı serbestlikli gösterimi [25, 26].

Aslında ısı kaynaklı deformasyonlar, uzun süre işleme ile ortaya çıkan deformasyonların temelini oluşturan üretim işleminin kendisinden kaynaklanır. Bu yüzden tezgâh gövdesindeki zamana bağlı yapısal deformasyonları tahmin edip modellemek oldukça zordur. Tezgâhın hem geometrik sistemindeki karmaşıklık hem de fiziksel olarak ortaya çıkan yükleme şartlarını modelleme zorluğu, geliştirilen modellerin başarısını önemli ölçüde kısıtlamıştır. Sonuç olarak yapısal deformasyon alanı ve geliştirilmiş dinamik yükler arasındaki ilişkinin modellenmesi, aktif hata azaltmada (indirgemed) sınırlı bir başarıya ulaşabilmiştir. Yapılan bu çalışmada geliştirilen farklı bir alternatif hata indirgeme yaklaşımı ile yapısal bileşenlerdeki yer değiştirme alanının eş zamanlı ölçümü dinamik/termal davranış modeli oluşturulmadan yapılmıştır [27].

Günümüzde imalat endüstrisi için parça üreten tezgâhların işleme hassasiyeti büyük bir öneme sahiptir. Takım tezgâhı ile ilgili tezgâh yapı elemanlarının boyutsal tamlığı ile ilişkili olarak performansı, kalitesi ve üretim güvenilirliği gibi konular öne çıkmaktadır. İşleme hassasiyetine olan ihtiyaç modern takım tezgâhı tasarımlarında birçok sınırlama ortaya çıkarmıştır. Diğer bir deyişle mükemmel tezgâh dizaynına rağmen tezgâhın işparçası sistemindeki dış yüklerin etkisinden dolayı (tezgâhın kendi hareketlerinden kaynaklanmayan mekanik ve termal yükler) işleme hataları oluşmaya devam etmektedir. İşleme hatalarının büyüklüğünün, takım tezgâhı boyutlarıyla orantılı olduğu unutulmamalıdır. Aktif hata azaltma sistemleri konusundaki çalışmalar büyük çaptaki takım tezgâhları (eksen hareketleri 5 m'den büyük olan) ile özel olarak ilgilenmektedir [27].

Takım tezgâhlarında oluşan hataların kaynakları göz önüne alındığında hatanın büyük kısmının tezgâhın kendisinden ve bununla ilişkili olan işparçası, kesici takım ve bağlama elemanlarından kaynaklanmaktadır. Bu bahsedilen hatalar toplam hatanın %40-70'ini oluşturmaktadır [14].

Tezgâh hataları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir [27].

1.Geometrik hatalar: Tezgâh bileşenlerinin doğruluğu ve temel dizayn ile ilgilidir.

2.Kinematik hatalar : Tezgâh bileşenlerinin bağıl hareketi ile ilgilidir.

3.Termal hatalar: Termal gradyand ve sıcaklık değişimleri sonucunda tezgâh bileşenlerinde oluşan yapısal deformasyonlarla ilgilidir.

4.Dinamik hatalar: Tezgâh bileşenlerindeki mekanik veya atalet momentinden oluşan hatalarla ilgilidir.

Lei ve Arkadaşları [28] yaptıkları çalışmada beş eksenli CNC tezgâhının işleme hassasiyetini test etmek için yeni bir ölçüm cihazı ve metot kullanmışlardır. 3D prob içeren prob-ball isimli cihaz ile standart sivrilikte ve üç serbestlik dereceli yer değiştirmeler ölçülebilmektedir. Uzama çubuğunun sonunda serbest halde bir soket bulunmaktadır. Soket içerisine yerleştirilen kalıcı mıknatıs ile uzama çubuğu ve ölçüm topu manyetik kuvvet ile birbirine bağlanmıştır. Prope-ball cihazının kurulumu tamamlandıktan sonra beş eksenli tezgâhın kinematik zinciri kapatılmıştır. Bu tezgâhın işleme hassasiyetini ölçmek için, takım yolu olarak küresel test yüzeyindeki eğriler tanımlanmıştır. Takım hareketi ise yüzeye dik doğrultuda tanımlanmıştır. Küresel test yüzeyinin merkezi, ölçme probunun merkezine denk gelmektedir. Bağıl hareketle

oluşan ayrıntılı pozisyonlama hataları, 3D prop ile ölçülmüş ve beş eksenli tezgâhın hacimsel doğruluğunu belirlemeye çalışmışlardır.

Tiana ve Arkadaşları [29] tarafından yapılan çalışmada takım tezgâhlarında üretim ve montajdan kaynaklanan geometrik hatalar genel ve sistematik bir yöntemle modellenmiştir. Bu yöntem üç adımdan oluşmaktadır.

1. Homojen dönüşüm matris metodu kullanarak takım tezgâhı kinematik zinciri dahilinde hata kaynakları ve pozisyonlama hatası arasındaki lineer haritanın geliştirilmesi
2. Pozisyonlama hatası ile hata yoğunluğu arasındaki lineer hatanın formüle edilmesi
3. Hata azaltma için bu iki metodun birleştirilmesi

Bu metotla takım tezgâhında indirgenebilen ve indirgenemeyen pozisyonlama hataları açık bir şekilde ayrılabilir. Böylece dizayncılara hata azaltma, üretim ve montaj işlemleri ve takım tezgâhı bileşenlerinin tolerans dizaynında büyük kolaylıklar sağlanmıştır. İki tip çok eksenli takım tezgâhı kullanılarak bu yaklaşımın genellenebilirliği ve etkinliği gösterilmiştir.

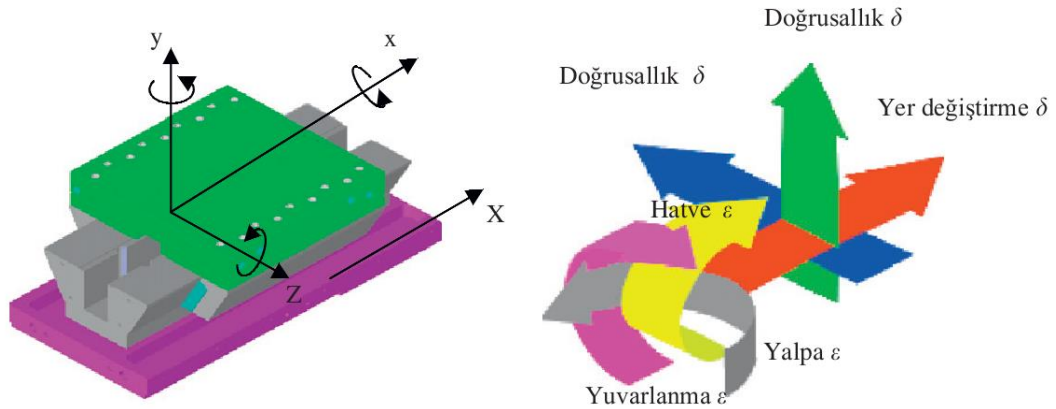
Geometrik doğruluk takım tezgâhı performansını sergilemede kritik öneme sahip bir faktördür. Takım tezgâhlarının geometrik doğruluğunu geliştirmek için iki yol vardır. 1. Hassasiyet için dizayn ve üretim yolu, 2. Hata azaltma yolu. Her iki yöntemde de iş parçası ile takım arasında ortaya çıkan pozisyonlama hatalarının parametrik olarak modellenmesi gereklidir. Teorik olarak 3, 4 ve 5 eksenli takım tezgâhlarında pozisyonlama doğruluğuna etki eden hata kaynakları yazılım ile tamamen ortadan kaldırılamaz, sadece toleranslar dahilinde azaltılabilir. Bu yüzden de indirgenebilen ve indirgenemeyen hataları birbirinden ayırt etmek için kapsamlı bir hata modelinin oluşturulması gereklidir [29].

Kiridena ve Arkadaşları [30] beş eksenli takım tezgâhında Denavit–Hartenberg(D–H) transformation matrix dönüşümünü kullanarak üç farklı tipte takım tezgâhı için kinematik model geliştirmiştir. Ancak oluşturulan model sadece 5 parametrik hatayı (herbir eksen için tek pozisyonlama hatası) içermektedir. Srivastava [4] tezgâh yapısının kinematik analizi tabanlı, sistematik bir geometrik ve termal hata modeli geliştirmiştir. Fakat çalışmalarında sadece özel (spesifik) bir takım tezgâhı üzerine yöneldikleri için

kapsamlı bir çalışma olmamıştır. Jha ve Arkadaşları [31] beş eksenli takım tezgâhında, geometrik hataları azaltmak için D-H metodu tabanlı genelleştirilmiş hata modeli kullanmış, ancak bu model CAM profili üretme çalışmalarının geliştirilebilmesini engellemiştir. Lei ve Arkadaşları [32] geliştirdiği prob toplu ölçüm cihazıyla beş eksenli takım tezgâhında pozisyonlama hatalarını doğrudan ölçmüştür. Hacimsel hata modeli, homojen dönüşüm matrisi (HTM) tabanlı teorik bir metottur. Takım tezgâhının kinematik zinciri, hata modelleme sırasında iş parçasını işleyen kesici takım yerine prob topu ile kapatılmıştır.

Lin ve Arkadaşları [33] önerdiği yeni bir matris toplama metodu ile, 6 bileşen için fiziksel anlamı olan kinematik eşitlikleri dönüştürmüştür. Fakat fiziksel anlamı olan geometrik hata kaynağı yeterince açık değildir. Bir çok araştırmacı [34-39] takım tezgâhı hacimsel hata modelini yukarıda belirtilen yöntemi baz alarak analiz etmiş ve etkinliğini farklı şekillerde göstermeye çalışmışlardır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda çoğunlukla hatayı azaltma amacıyla hata modeli üzerinde çalışılmış olup, telafi edilebilen ve telafi edilemeyen pozisyonlama doğruluğu üzerinde yeteri kadar çalışma yapılmamıştır [29].

Yüksek doğrulukta talaşlı imalat yapmada hata indirgeme yöntemlerinin geliştirilmesi önemli rol oynamaktadır. Hassas işlemede yüzey oluşumu üzerinde kinematik hataların analizi konusunda büyük eksiklikler vardır [40]. Kong ve Arkadaşları[40] hassas işleme tezgâhını çoklu cisim sistemi (multi-body system) olarak tanımlamışlar ve bilgisayarlı hata indirgeme metodu kullanarak, ideal takım yolu elde etmek için NC program geliştirmesi yapmışlardır. Geliştirilen NC programla iş parçası yüzeyindeki kinematik hataları indirgeyerek gerçek takım yolunu oluşturmaya çalışmışlardır. Kızak hareketleri sonucu oluşan hata bileşenlerini incelemişlerdir (Şekil 1.6). Teorik kinematik model ve hata indirgeme metodu bir dizi işleme deneyleri ile desteklenerek, deneysel sonuçlardan önerilen indirgeme metodunun uygulanması ile en iyi yüzey kalitesi elde etmek üzere işlemler yapmışlardır. Takım tezgâhı doğruluğunu geliştirmek, tezgâhın termal davranışının kapsamlı bir şekilde bilinmesine bağlıdır. Takım tezgâhının termal simülasyonunu yapabilmek için tezgâhın tamamının sıcaklık dağılımını ve termal deformasyon modelini oluşturmak gerekir.



Şekil 1.5. Kızak hareketleri sonucu oluşan 6 hata bileşeni [40]

Zhang ve Arkadaşları [17] tarafından yapılan çalışmada sonlu eleman analizi ile takım tezgâhının tamamının termal modeli ve sıcaklık deformasyon mekanizması incelenmiştir. Simülasyon verileri ve deneysel veriler karşılaştırıldıktan sonra, sonlu eleman modeli simülasyonunun etkinliği %10' dan az hata ile doğrulanmıştır.

Termal deformasyondan kaynaklanan hatalar takım tezgâhı doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Termal deformasyonları azaltarak takım tezgâhının termal performansını geliştirmek ve bunun sonucunda takım tezgâhının doğruluğunu artırmak, takım tezgâhı dizaynı ve performans optimizasyonu analizlerinde en önemli araştırma konuları olmuştur. Yapılan çalışmalar üç bölümden oluşmaktadır. İlki termal performans testleridir. Lee [41], Yang [42] ve Ramesh [43, 44] termal performans, termal hata belirleme ve modelleme üzerine deneysel olarak modeller sunmuşlardır. İkincisi termal performansın optimize edilmesi ve hata indirgeme işlemleridir. Ramesh [45] son zamanlarda yapılan hata indirgeme çalışmalarını detaylı bir şekilde incelemiştir.

Wu ve arkadaşları [46] takım tezgâhının termal performansını optimize etmek için, termal performans analizi tabanlı hata indirgeme konusunda çalışmışlar ve eş zamanlı indirgeme metodu kullanmışlardır. Yang ve arkadaşları [47, 48] verileri işlemede ANN ve Gray Model avantajlarını birleştirerek yeni bir metot kullanmışlardır. Üçüncüsü ise termal performans simülasyonudur.

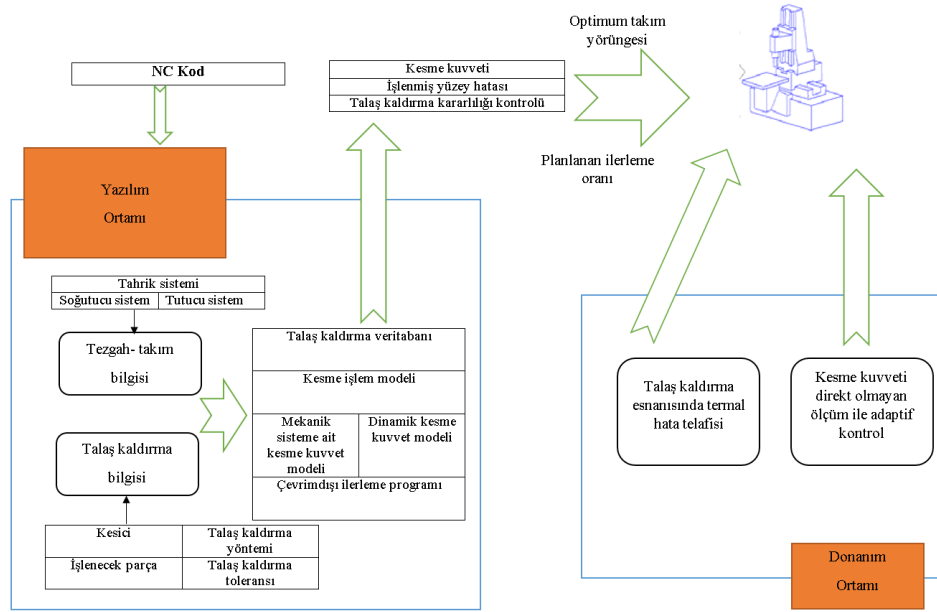
Genel olarak takım tezgâhının kalitesi onun dizayn ve üretimine bağlıdır. Güvenilir bir tezgâh dizaynının oluşturulamamasından dolayı analiz sonuçları ile gerçek değerler arasında büyük farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bunun sonucunda dizayn hatalarının elemine edildiği, deneysel prototipin dizaynı ve geliştirilmesiyle geleneksel yöntemler

olan dizayn-geliştirme-test-düzeltilme işlemleri sıklıkla kullanılmıştır. Bahsedilen bu yöntemlerde mükemmel bir model ve metot oluşturulamaması, takım tezgâhının yapısının karmaşık olması ve termal deformasyon sürecinin belirlenememesi gibi sebeplerden dolayı bu yöntemler hem yüksek maliyetlidir hem de uzun işlem zamanı gerektirir. Yapılan çalışmaların çoğunda iş mili sistemi parçalarının termal deformasyonu üzerine yoğunlaşmış, tüm tezgâhın dijital simülasyon modelini oluşturmak daha karmaşık olduğu için bu konuya fazla değinilememiştir. Ayrıca yapılan çalışmalarda termal sınırlar, farklı devirlerdeki takım tezgâhı bağlantı elemanlarındaki sıcaklık değişiklikleri termal performans açısından yeterince değerlendirilememiştir. Bahsedilen bu sınırlamalar ve eksiklikler sonucunda simülasyon sonuçları yeterli doğruluğa ulaşamamış ve takım tezgâhının termal deformasyon tahminleri doğruluktan uzaklaşmıştır[40]. Termal simülasyon sınır şartları, ısı iletim katsayıları, temas direnci ve analiz yöntemleri farklı devir sayılarında bütünlük olarak incelenmelidir.

Hata indirgeme üzerine yapılan çalışmaları çoğunda rijit olamayan sistem bileşenleri dikkate alınmadan tüm sistem rijit kabul edildiği için statik ve dinamik yüklemeler sonucu oluşan pozisyon sapmaları kaçınılmaz hale gelmiştir. Tezgâh bileşenlerini ağır malzeme kullanarak imal etmek rijitliği artırmada kullanılan metotlardan biridir ancak her bir bağlantıyla ilişkili olan ağır kütlelerin hareketi, hata indirgemeyi zorlaştırdığı için istenilmeyen bir durumdur [49].

Hata azaltma ve kontrol modülü uyarlanabilir kontrol modeli ve termal davranış modelinin birleşiminden oluşur. Bu modül, takım tezgâhında indirgeme ve kontrol işlemleri yaparak (Şekil 1.6.) takım tezgâhının üretim kalitesini ve doğruluğunu geliştirir.

Takım tezgâhının doğruluğu, ideal iş parçası ile kesici takım arasındaki bağıl hareket hatası olarak tanımlanır. Üç eksenli tezgâhlar için bu bağıl hata sebepleri şunlardır; pozisyonlama hatası, tezgâh montajından kaynaklanan açısal hatalar, zamana bağlı sıcaklık değişiklikleri, kesici takımda meydana gelen aşınma ve deformasyonlardır [50]. Takım tezgâhlarının sürekli kullanımı, hareketli parçalarda ısı açığa çıkarır ve bu ısı takım tezgâhının çeşitli yapısal elemanlarında genleşmeye sebep olur. Genleşme sonucunda takım tezgâhının pozisyonlama kabiliyeti bozulmuş olur.



Şekil 1.6. Takım tezgâhında hata indirgeme şeması [50]

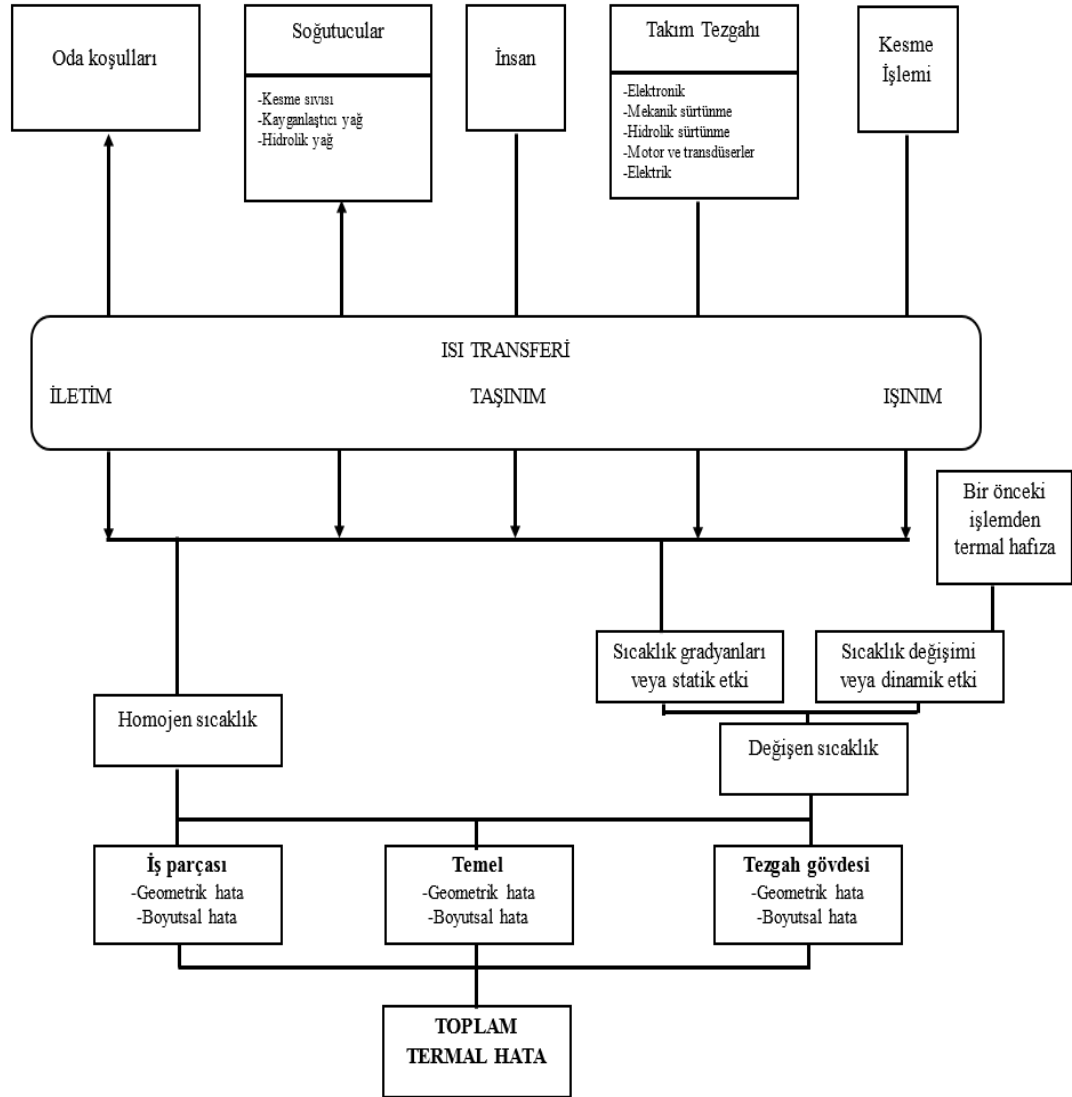
Takım tezgâhlarında meydana gelen hacimsel hatalar, hem montaj ve kinematik yapıdan hem de termal hatalardan kaynaklanır [45].

Takım tezgâhlarının doğruluğunu, iş parçası ile takım arasında planlanan bağıl hareket sapmaları, takım ve takım kaplamasının elastik deformasyonu ve tutucunun elastik deformasyonu büyük ölçüde etkiler. Takım tezgâhı bileşenlerinde şekil değişikliğine sebep olan sıcaklığın etkisi, takım tezgâhının tamamının sıcaklık dağılımının belirlenerek geometrik/kinematik davranışın ölçülmesiyle bir parametre olarak tanımlanabilir [45].

Sıcaklık değişikliklerinden kaynaklanan bu problemi çözmek için birçok araştırmacının başvurduğu tekniklerden biri de tezgâh yapımında beton, fiber takviyeli plastik gibi malzeme kullanımıdır [45]. Sıcaklık değişikliklerinden dolayı oluşan yapısal deformasyonları azaltmak için kullanılan bu teknikler, hata azaltma işlemlerinde oldukça maliyetlidir. Bu yüzden hem verimli hem de ucuz yöntemler aranmalıdır.

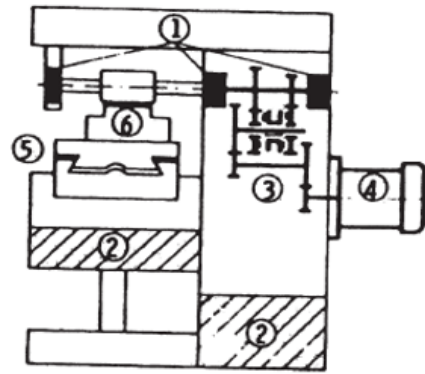
Termal hatalar, takım ile iş parçasının bağıl hareket yapması ile makine elemanlarındaki sıcaklık değişiminden kaynaklanan deformasyon ve genleşme sonucunda ortaya çıkar. Çeşitli makine elemanları arasındaki bağıl hareket temas bölgesinde ısı açığa çıkarır ve bu ısı makine elemanlarının deformasyonuna sebep olur. Isı açığa çıkaran bazı kaynaklar şunlardır [45]; Yataklar, dişliler ve hidrolik yağı, sürücü ve tutucular, pompa

ve motorlar, kızaklar, kesme hareketi ve talaş, dış ısı kaynaklarıdır. Isı kaynaklarının etkileri Şekil 1.7. ve Şekil 1.8. de gösterilmiştir. Sıcaklık değişikliklerinin takım tezgâhı doğruluğu üzerindeki etkileri, tezgâhın geometrik ve kinematik davranışları ölçülerek ve tezgâhın tamamının sıcaklık dağılımı dikkate alınarak belirlenebilir.



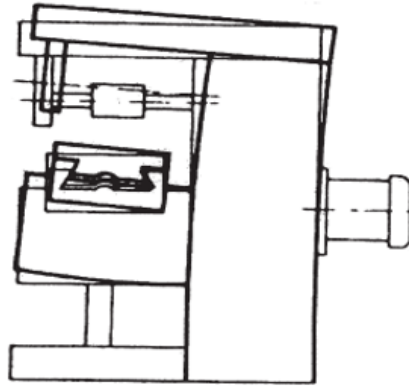
Şekil 1.7. Termal etki diyagramı [45]

Tezgâh yapısındaki homojen olmayan sıcaklık dağılımından dolayı termal hatalar, zamana bağlı lineer olmayan bir karakteristik sergiler. Isı kaynağının yeri, şiddeti, termal genleşme katsayısı ile makine sisteminin konfigürasyonu arasındaki etkileşim karmaşık bir termal davranış ortaya çıkmasına sebep olur. Araştırmacılar termal davranış modellemede sonlu eleman analizi, koordinat dönüşüm metotları, yapay sinir ağları gibi çeşitli teknikler geliştirmişlerdir.

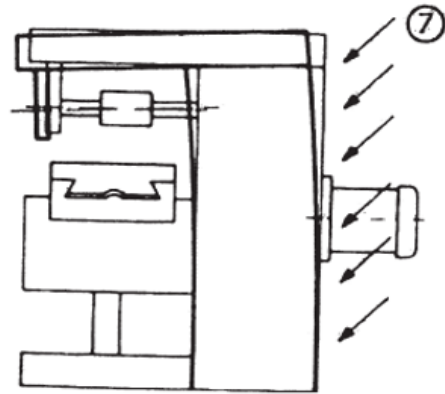


Ana ısı kaynağı

1. Rulmanlar
2. Dişli ve hidrolik yağı
3. Tahrik ve kavramalar
4. Pompa ve motorlar
5. Kızak
6. Kesme işlemi ve talaş
7. Dış ısı kaynakları



İç ısı kaynakları nedeniyle olan bozulma



Dış ısı kaynakları nedeniyle olan bozulma

Şekil 1.8. Bir freze tezgâhında ısıl etkiler sonucu oluşan yer değiştirmeler [45]

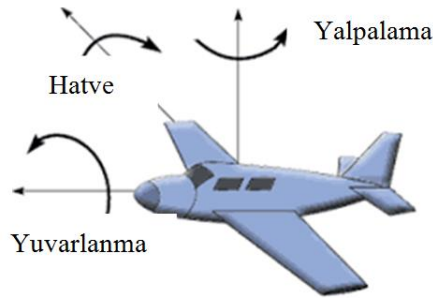
Jedrzejewski ve arkadaşları [51] takım tezgâhının termal davranışını modellemede ısı kaynaklarını, devir sayısı, kesme kuvveti, çevre sıcaklığı, operasyon zamanı gibi operasyon parametrelerini belirleyerek kuvvet indirgeme değerlerini kullanarak termal yer değiştirmeleri belirlemeye çalışmıştır.

Kim ve arkadaşları [52] sonlu eleman metodu ile iki doğrultulu, 4 nodlu eleman kullanarak bir bilyeli yatağın sıcaklık dağılımını analiz etmişlerdir. Bilyeli yatak sistemindeki deformasyonun ana kaynağının, ön yükleme, vidaların yağlanması ve montaj şartlarına bağlı olarak, sürtünme sonucunda ortaya çıkan ısı olduğunu tespit etmişlerdir. Problem, ısımanın olmadığı deformasyonsuz ortamda süreksiz ısı transferi olarak tanımlanmıştır.

Üç eksenli bir tezgâhta 21 tane hata bileşeni vardır. Chen ve arkadaşları [53] geometrik ve termal hataları sentezleyerek 32 hata bileşenli bir çalışma yapmışlardır. İlave 11 hata işleme merkezinin termal etkileri olarak ele alınmıştır. Ancak yapılan çalışmada iş mili ekseninin dönme hataları dikkate alınmamıştır.

Srivastava ve arkadaşları [54] beş eksenli CNC tezgâhta hata modeli oluşturmak için homojen dönüşüm matrisi (HTM) metodu kullanılmıştır. Takım tezgâhı, bileşenleri dönen eksenler ve prizmatik bağlantılar olan kinematik bir zincir olarak modellenmiştir. Zincirin bir ucu tabla iken diğer ucu iş mili kabul edilmiştir. Hata matrisini tamamlamak için tabla koordinat sistemindeki bir nokta iş mili koordinat sisteminde ifade edilmiştir.

Wang ve Arkadaşları [55] her bir eksen için 6 hata bileşeni üzerinde çalışmışlardır. Bunlar bir pozisyonlama hatası, iki doğrusallık hatası, bir hatve (pitch) hatası, bir yuvarlanma (roll) hatası, bir yalpalama (yaw) hatasıdır. Üç eksenli bir takım tezgâhı incelendiğinde 21 hata bileşeni ortaya çıkar. Takım tezgâhı rijit cisim kabul edilerek hacimsel hareket analizi HTM yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 1.9. Hatve, yuvarlanma ve yalpalama hatalarının gösterimi

Mou ve arkadaşları [56] CNC tezgâhların doğruluğunu geliştirmek için şekil tabanlı analiz tekniği kullanmışlardır. Rijit cisim kinematiği yaklaşımı yardımıyla geometrik-termal hata modeli geliştirmişlerdir. Her bir hata bileşeni, istatistiksel dönüşüm metotları kullanılarak kesici takım pozisyonu ve takım tezgâhının sıcaklık profilinin fonksiyonu olarak karakterize edilmiştir. İlk aşamada genelleştirilmiş hata modeli, pozisyonlama hataları ile yapısal ve kinematik hataları ele alan HTM kullanılarak türetilmiştir. Tahmin edilen tezgâh hatası indirgeme sinyalini üretmede kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri ölçülen pozisyonlama hataları ile eşleştirilmiştir. YSA modelinin çıkışı, hata modeli katsayısının tekrarlı hesabında kullanılmıştır. Araştırmalar zamana bağlı termal etkilerin takım tezgâhı hassasiyetine etkilerini araştırmak için dikey işleme merkezi üzerinde çeşitli noktalara 40 adet ısıtılabilir eleman yerleştirmişlerdir. İlk olarak standart bir parça (NAS979) CMM’de ölçülmüş ve bu veriler referans alınmıştır. Parça tezgâh tablasına bağlanmış ve takım tezgâhının kendi ölçüm sistemiyle ölçülmüştür. Takım tezgâhındaki bu prob, zamana

bağlı termal etkilerin tezgâh doğruluna etkisini farklı sıcaklıklarda tekrarlı bir şekilde ölçmüştür. Hata tahmin sistemini oluşturmak için sıcaklık değişimleri ve pozisyonlama hataları YSA da eğitilmiştir. Ters kinematik prensibiyle tespit edilen hatalardan indirgeme değerleri elde edilmiştir.

Yuan ve arkadaşları [10] geometrik, termal ve kesme kuvvetleri etkisiyle oluşan hataları indirmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Geometrik ve termal hatalar için küçük hata ve rijit cisim varsayımı yapmışlardır, HTM kullanarak kesici takım koordinat sistemi parça koordinat sistemine çevrilmiştir. Hata bileşenleri ters kinematik algoritma kullanarak tahmin edilmiştir. Herhangi bir pozisyon için hacimsel hata vektörü hata sentez modeli kullanılarak formüle edilmiştir. Sensor yerleri optimize edildiğinde, termal hata modelinin doğrusallaşma eğiliminde olduğu ve ara değer (interpolation) ve dış değer (extrapolation) bulma kabiliyetinde iyileşme görülmüştür.

Krulewich ve arkadaşları [57] polinomlar yardımıyla sıcaklık dağılımını tahmin edebilmek için bir dizi çalışma yapmışlardır. Kullandıkları yöntemde sıcaklık dağılımını bulmak için yaklaşık 100 sensor kullanılmıştır. Gaussian integrasyon metodu kullanılarak minimum sayıdaki nokta için çözüm elde edilmiştir. Bu metot sadece pozisyonla bağımsız hatalara uygulanabilmiştir.

Balsamo ve Arkadaşları [58] nokta koordinatlarının fonksiyonu olarak tezgâhın her bir noktasındaki sıcaklıkla ilgili matematiksel eşitlikler ile üç eksenli, ikinci dereceden polinom kullanarak termal model oluşturmuşlardır.

Yang ve arkadaşları [59] Takım tezgâhında belirlenen belirli noktaların sıcaklık değişiminden kaynaklanan sayısal ve hacimsel termal hataları tahmin etmek için genelleştirilmiş delta modelini kullanmışlardır. İki katmanlı bir YSA modeli, sıcaklık sensorlerine bağlı 8 girişli ve 6 çıkışlı termal hata ölçümünden oluşmaktadır.

Veldhuis ve arkadaşları [60] beş eksenli takım tezgâhında YSA tabanlı hata indirgeme yöntemi kullanmışlardır. Simülasyon verileri ile 20.000 iterasyon YSA modeli ile eğitilmiştir. Z eksenli pozisyon hatası ve açısal hatalar için iki ağ kullanılmıştır. Her bir ağ, ilkinde 30, ikincisinde 15 ve üçüncüsünde 7 nod dan oluşan 3 gizli katmandan oluşmaktadır. YSA tarafından optimize edilen ölçülmüş veriler beş farklı testten geçirilmiştir. Bunlardan dördü 500 iterasyonu eğitmek için, beşincisi ise ayrılan verileri test etmek için kullanılmıştır.

Chen ve arkadaşları [61] sıcaklık ölçümü ile termal hatalar arasındaki ilişkiyi belirlemek için YSA tabanlı bir model kullanmışlardır. Sigmoid fonksiyon kullandıkları YSA modeli ileri beslemeli ve üç katmanlıdır. YSA ile çeşitli kesme şartlarında eğitilmiş 540 çift çıkış vektörü (termal hata) ve giriş vektörü (sıcaklık) tekrar eğitilmiştir.

Takım tezgâhındaki hataları modellemede homojen dönüşüm matrisleri yaygın olarak kullanılır. Geometrik hatalarda olduğu gibi takım tezgâhının kinematik bağlantı zinciri, eksenler ile takım arasındadır. Sonlu eleman analiz teknikleri, sistemdeki ısı akısını, tezgâh ve çevresindeki ısı kaynaklarının üç boyutlu modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu model ile yapıdaki sıcaklık dağılımı ve termoelastik deformasyon ölçülebilmelidir. Bu işlem doğrultusunda hem ısı üreten kaynaklar hem de tezgâh yapısı dikkatli incelenmelidir.

Öncelikle takım tezgâhı üzerindeki kritik noktaların sıcaklığı detaylı bir şekilde belirlenmelidir. Sıcaklık ölçümünde, çevre şartları gibi dış faktörler ve sürtünmeden dolayı açığa çıkan ısı, pompalar, motorlar gibi iç faktörler incelenmelidir [53]. Sıcaklık ve hata bileşenlerini ölçmek, takım tezgâhı doğruluğunu geliştirmede ilk adımdır. Diğer önemli adım ise doğruluğu etkileyen hataları en aza indirmek için yapılan düzeltme işlemleridir.

Sıcaklık ölçümü genelde ısıtıcı elemanlarla (thermocouples) yapılır. Bunlar genelde T veya J tipinde folyo şeklindeki ısıtıcı elemanlardır. Bu sensorler ısı kaynağı üzerine yapıştırılır ve periyodik olarak veriler gözlemlenir. Kim ve arkadaşları [52] bilyalı vida sistem üzerindeki sıcaklık dağılımını belirlemeye çalışmışlardır. Belirli noktalardaki sıcaklık ölçümlerini tepki süresi 0.1 sn olan 6 adet T tipi ısıtıcı eleman kullanarak yapmışlardır.

Tseng ve arkadaşları [8] dikey işleme merkezinde her bir eksenin yataklarındaki ve işleme ortamındaki sıcaklık dağılımını ölçmüşlerdir. Yapılan bir dizi kesme işlemi sonrası, en önemli ısı kaynağının kayan yüzeyler olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun sonucunda 13 ana sıcaklık ölçüm noktası belirlemişlerdir. Bu işlemlerde oda sıcaklığı referans alınmıştır. Daha sonra kesici takım optik probun yanına getirilmiş ve termal yer değiştirmeler ölçülmüştür. Genel kesme işlemi için hata 4µm'ye düşürülmüştür.

Takım tezgâhının termal deformasyon tepkisini belirlemek için sıcaklık ölçümü büyük öneme sahiptir. Attia ve arkadaşları [62] ısııl eleman ile ısı kaynağı arasındaki uzaklık, ısııl eleman tellerindeki ısı akısının etkisi gibi faktörlerin sıcaklık ölçümünde etkili olduğunu savunmuşlardır. Yüzeylerin sıcaklık ölçümlerinin doğruluğunu aşağıdaki faktörler etkilemektedir.

- a. yüzey alanında meydana gelen düzensiz sıcaklık dağılımı
- b. termal bariyer yapabilecek yüzey kaplama ve boya varlığı
- c. yüzey ile ısııl eleman arasındaki mükemmel olmayan birleşim
- d. ısııl elemanların doğru yere yerleştirilmemesi

Takım tezgâhında oluşan termal hataları ölçmek ve indirmek yukarıda açıklandığı gibi oldukça ayrıntılı ve zor bir işittir. Termal çarpılmaları simüle etmek için farklı hız ve ilerleme değerlerinde sürekli veri toplanmalıdır. Kesme şartlarını mükemmel olarak simüle etmek mümkün olmayacağından gerçek değerlerle, elde edilen (ölçülen) değerler farklılık gösterecektir. Ölçümlerde ilk yapılacak aşama tezgâh yapısındaki kritik noktaların sıcaklığını ölçmektir. Bu iş için genelde ısııl elemanlar kullanılır. Sensorlerden alınan veri ileriki aşamalar için bilgisayar yardımıyla istenilen formata dönüştürülür. Buna ek olarak tezgâhın farklı bileşenlerindeki sıcaklık ölçümleri lazer interferometre kullanılarak ölçülebilir. Bazı durumlarda temassız kapasitans sensörler kullanarak, tezgâh yapı elemanlarının özellikle de kesici takımın termal deformasyonu ölçülebilir. Termal hata verisi, gerçek işleme sırasında ölçülen sıcaklığa bağlı olan hatayı tahmin ederek genelleştirilmiş hata modeline ulaşmak için ölçülen sıcaklık değerleriyle karşılaştırılır. Tahmin edilen bu hata değerleri tezgâh eksen sayısına bağlı olarak, HTM yardımıyla ilgili hata bileşenine dönüştürülür. Sıcaklık verilerini toplama, takım tezgâhından gelen geri besleme kodlarının toplanması, sıcaklık-termal hata haritasının oluşturulması, tezgâhtan alınan verilerin her bir eksen için değerlendirilmesi gibi işlemlerin hepsi bilgisayar yardımıyla gerçekleştirilir. İndirgenmiş veri, gerçek indirgemenin yapılabilmesi için CNC kontrolörüne gönderilir [62].

Eş zamanlı hata indirgeme işlemleri genelde modelleme, ölçüm ve indirgeme aşamalarında yanlış sonuçlar verebilmektedir [45]. Bitirme işlemlerinde takım tezgâhı hatasını en aza indirmek için öncelikle TEM teknikleri (termoelastik modelleme) ve deneysel modeller kullanarak tezgâh yapısı modellenmelidir. Tezgâh üzerindeki kritik elemanların sıcaklık değişiminin ölçümü çeşitli sensorlar kullanılarak yapılmalıdır. İlgili

hata bileşenleri genelde lazer interferometre veya çeşitli ölçme problemleriyle direkt olarak ölçülür. İlk olarak sıcaklık ve hata verisi elde edilir, sonra sistemdeki tüm hata ile sıcaklık değişimi ilişkilendirilir. Böyle bir sistem gerçek çalışma koşulları altında tezgâhın tepkisini kontrol eder.

Kullanılan tüm bu yöntemlere rağmen geliştirilen birçok modelde, tezgâh bileşenlerindeki hataları doğru tespit edebilmek ve oluşan hataları sürekli test edip doğruluğunu ölçmek hem zaman alıcı bir işlemdir hem de yüksek maliyetlidir. Yapılan geometrik ve işleme parçası testleri zaman alıcıdır ve işlenecek yeni bir parçayı herhangi bir analitik metotla modellemek oldukça zordur [45].

Buna ek olarak hata indirgeme sistemlerinin çoğunda, veri elde etmek, hata modelini oluşturmak, indirgeme yapmak ve CNC sisteminden geri besleme yapmak için dışarıdan kontrollü bilgisayarlar kullanılır. Bu metotla yapılan birçok araştırmaya rağmen hata indirgeme sistemlerinin endüstriyel uygulamalarında ticari sistemlerin olmayışı bu konuda başarıya ulaşma önünde engel teşkil etmektedir. Hızlı gelişen bilgisayar teknolojileri ile birlikte hata indirgeme sistemlerini kendi içinde barındıran takım tezgâhlarının geliştirilmesi beklenmektedir.

Takım tezgâhı doğruluğunu etkileyen birçok hata azaltma metodu vardır. Bu metotlar hatadan kaçınma ve hatayı indirgeme başlıkları altında toplanabilir. Hata indirgeme işlemleri ise iki şekilde yapılır: İlki hatanın önceden tahmin edilmesidir ki bu yöntemde parça işlemeden önce veya sonra ölçümler yapılır daha sonra kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilir. İkincisi ise eş zamanlı hata azaltma yöntemidir. Bu yolla işleme sırasında hatalar gözlemlenir ve düzeltilmeye çalışılır. Günümüz endüstrisinin ihtiyacı bu işlemleri yüksek doğrulukta, düşük maliyetli ve yüksek üretim hızlarında yapabilen sistemlerdir.

Hata türüne bağlı beş farklı hata belirleme metodu vardır;

- a. Izgara (grid) kalibrasyon metodu: Takım pozisyonunun ve çalışma alanındaki farklı noktaların hatasının kalibrasyonunda tercih edilebilir. Genelde geometrik hata modellemede kullanılır.
- b. Hata sentez metodu: genelde geometrik ve termal hata modellemede kullanılır, bu model hata bileşenleriyle ilgili toplam hatanın belirlenmesinde kullanılır.
- c. Özel ölçüm sistemi metodu: Bölgesel geometrik ve termal hataları modellemede

kullanılır, bu metotla hata direkt ölçülmek yerine özel dizayn edilmiş ekipmanlarla ölçülür.

d. Çerçeve ölçüm metodu: Termal hataları ve kısmen geometrik hataları takım tezgâhı üzerine yerleştirilmiş optik sistemlerle eş zamanlı ölçüm yapabilen bir metottur.

e. Sonlu eleman metodu: Bu metot termoelastik deformasyon sonucu oluşan termal hataları tahmin etmede ve tezgâh yapısındaki ısı transferi analizlerinde kullanılır [43].

Hata azaltma üzerine birçok çalışma yapılmasına rağmen üzerinde yoğunlaşılması gereken bir çok konu vardır [43].

- 1- Ölçü tamlığının sağlanmasında daha etkili, basit ve ucuz yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden yeni araştırmalar ve yaklaşımlar desteklenmelidir.
- 2- Çalışmalarda tezgâh yapısındaki bileşenlerin elastik deformasyon değişikliklerine ve bu değişikliklerin iş parçası üzerindeki etkilerine dikkat edilmelidir.
- 3- Tezgâh kalibrasyonu için toplanan çok sayıda verinin indirgenmesi için yeni metotlar ve yazılımlar gereklidir.
- 4- Standart bir ölçüm sistemi geliştirilerek uygulama deney yapılan takım tezgâhı haricindeki diğer tezgâhlara da uygulanabilmelidir.

Hata indirgemedede en önemli adımlardan biri tezgâh hatalarını hızlı ve doğru bir şekilde modellemektir. Wang ve arkadaşları [63] tarafından yapılan çalışmada geometrik ve termal hataları eş zamanlı indirgenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneylerde farklı sıcaklıklar altında üç eksenli işleme merkezindeki pozisyonlama hatalarını Newton interpolasyon metoduyla incelenmiştir. Bu metotla farklı sıcaklıklardaki hata eğrilerini düzeltmeye yönelik formüller için katsayılar elde edilmiştir.

Birçok farklı bakış açısıyla yapılan hata indirgeme işlemlerine rağmen çalışmalar genelde özel çalışma şartları için tasarlanmıştır. Pratik matematiksel ifadelerle yüksek ölçü tamlığını sağlamak gerçek işleme şartlarında çok zordur [63].

Takım tezgâhındaki iç ve dış ısıtma/soğutma kaynakları ve tezgâh yapısını oluşturan elemanların farklı termal genleşme katsayısına sahip olması termal çarpımalara sebep olur [64].

Zhu ve arkadaşları [34] yaptıkları çalışmada takım tezgâhını çoklu rijit sistem (rigit multi-body) kabul ederek beş eksenli takım tezgâhında geometrik hata modeli

oluşturmuşlardır. Takım tezgâhının doğrusal hareket yapan eksenleri için 21, dönen eksenler için 6 geometrik hata parametresi üzerinde çalışmışlardır. Elde ettikleri hata modeli ile ilgili NC kodlarını düzenleyerek işleme hatalarını azaltmaya çalışmışlardır. Termal hata azaltmadaki zorluğun temel nedeni termal hataların lineer olmaması ve karmaşık olmasıdır [65].

Geometrik hatalar tezgâh yapısında bulunan taşıyıcılar, kızaklar ve tabla gibi elemanların istenmeyen hareketleri sonucunda ortaya çıkar. Termal hatalar ise motorlar, yataklar, hidrolik sistem ve ortam sıcaklığı gibi iç ve dış ısı kaynaklarının tezgâh elemanlarında termal çarpılmaya sebep olması sonucunda ortaya çıkar [14]. Takım tezgâhı hassasiyetini geometrik hatalardan çok termal hatalar etkiler. İş milinde meydana gelen termal hatalar, takım tezgâhı eksenlerinde meydana gelen hatalardan daha büyüktür. Lazer interferometre yöntemi ile takım pozisyonunun doğrusal, açısal ve karesel hataları ölçmek için iyi bir yöntemdir ancak bu yöntemle hata analizi ve ölçümü yapmak uzun zaman alır [14].

Termal hata indirgeme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan çevrim dışı modelde, termal deformasyonla, deneysel olarak tespit edilen birkaç noktanın sıcaklığı arasındaki ilişki esas alınır. Sıcaklık dağılımı ve işleme koşullarının değişmesi ile termal deformasyonlarda büyük ölçüde farklılıklar gösterir. Doğru ve sağlam bir termal hata tahmin modelini oluşturabilmek indirgeme sisteminin en önemli kısmıdır [66].

Eskandari ve arkadaşları [67] yaptıkları çalışmada termal hataları lineer gerileme, YSA ve Bulanık mantık yöntemleriyle modellemiştir. Gerekli veriler, lazer interferometre yardımıyla elde edilmiştir. Hacimsel hatalar rijit cisim kinematiği ve G kodlarının tekrar düzenlenmesi ile hesaplanmıştır. Kullandıkları yöntemlerle serbest yüzeyli deney numunelerinde oluşan hataları %41 oranında azaltmayı başarmışlardır.

Talaşlı imalatda dahili ve harici ısı kaynakları etkisi ile oluşan hatalar termal hata olarak isimlendirilir. Termal hatalar, takım tezgâhı işleme hatalarına sebebiyet veren ana etkindir [46]. Bu yüzden bu hatalar uygun bir şekilde modellenip indirgenmelidirler. Geometrik ve pozisyonlamadan kaynaklanan hatalar genellikle kinematik modelleme ve dönüşüm matris yöntemleri ile modellenir ancak termal hataları modellemek oldukça zordur [67].

Takım tezgâhı yapısını modellemede kullanılan Sonlu eleman modeli (SEM), mekanik davranışları analiz etmek için kullanılan yaygın bir metottur. Tezgâh yapısının karmaşıklığı ve takım tezgâhı üzerinde bulunan ısı kaynakları SEM ile termal hata modellenmesini oldukça zorlaştırmıştır. Bu zorlukların en önemli sebebi sınır şartlarının doğru olarak belirlenememesidir. Birçok araştırmacı işleme sırasında eş zamanlı hata indirgeme üzerine çalışmışlardır. Bu yöntemin en büyük iki zorluğu şunlardır; ilki, işleme sırasında birçok noktadan sıcaklık değeri alma ve ısı hataları belirleme işleminin çok zor olması, ikincisi ise, ısı çiftlerin (thermocouples) tellerinin işleme operasyonlarından etkilenip hatalı sonuçlar vermesidir. Yani eş zamanlı hata indirgeme metodu birçok takım tezgâhı için uygun değildir [67].

Diğer bir hata indirgeme yaklaşımı olan G kodlarının düzenlenmesi ile çevrim dışı hata tespiti ile yukarıda belirtilen çevrim içi hata modeli problemlerinin üstesinden gelinebilir. Çevrim içi metoda göre çevrim dışı metodun birçok avantajı olması rağmen termal hatalar için çok az araştırmacı bu metodu kullanmıştır. Bunun sebebi, çevrim dışı metotta imalat işlemleri hakkında yeterli bilgiye sahip olunamaması ve bu eksikliğin hata tahmini güçleştirmesidir [67].

Uzun süreli kesme operasyonlarında kızak kayıt sistemlerindeki temas eden yüzeylerde aşınmalar ve buna bağlı pozisyonlama sapmaları oluşabilmektedir. Fan ve Arkadaşları [68] yaptıkları çalışmada oluşturdukları matematik model ile kayıt kızak sisteminde belirledikleri parametreler ve oluşan kesme kuvvetlerini incelenmiş ve uzun süreli işlemlerde pozisyonlama hatalarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Kayıt kızak sistemindeki temas yüzeyinde oluşan reaksiyon kuvvetleri elde edilen kesme kuvvetleri ile ilişkilendirilerek ve kayan yüzeylerdeki aşınma değerleri ele alınarak geometrik hatalar azaltılmaya çalışılmıştır.

İşlenen bir parçanın boyutsal doğruluğu onu işleyen takım tezgâhının doğruluğuna bağlıdır. Bir takım tezgâhı ne kadar yeni olursa olsun uzun süreli işlemlerde boyutsal doğruluğun yakalanabileceği garantisini vermez. Pozisyonlama hataları dinamik olarak çalışma şartları, oluşan kesme kuvvetleri, çevre sıcaklığı, takım aşınması, kayıt kızak aşınması, titreşim gibi etkenlere bağlıdır. İşleme süresinin uzaması bu etkenleri değiştirmekte ve işleme operasyonlarını kontrol etmek güçleşmektedir [68].

CNC tezgâhlarda etkili bir termal hata indirgeme işlemi yapabilmek için işleme doğruluğunu iyi tahmin edebilmek ve indirgeme modelini sağlam bir şekilde oluşturmak büyük önem arz etmektedir. Miao ve Arkadaşları [69] yaptıkları çalışmada önemli gördükleri sıcaklık noktalarını belirlemiş ve iş milinin z doğrultusundaki termal hataları ölçmüşlerdir. Sıcaklığa duyarlı noktaları seçmek için Bulanık mantık analizleri ve Gri bağıntı metodu birlikte kullanılmış daha sonra çoklu doğrusal gerileme ve minimum mutlak tahmin metotlarıyla termal hata ile önemli etkiye sahip sıcaklık noktaları arasındaki ilişki yardımıyla işleme modeli tahmini yapılmıştır. Duyarlı noktaların sıcaklık değerleri ile termal hata, farklı ortam sıcaklıkları ve devir sayılarında deneysel olarak ölçülmüştür.

CNC tezgâhlarda termal hata modelini oluşturmak için yapılan teorik analizlere doğru bir matematik model kurmak, işleme sırasındaki etken faktörlerin fazlalığı ve sürekli değişim içerisinde olmalarından dolayı oldukça zordur. Jianguo ve Arkadaşları [18] CNC paket optimizasyon modeli kullanarak sıcaklıkları değişen ve birleştiren sıcaklıklar olarak ikiye ayırarak hata modellemede sıcaklığa duyarlı noktaları tespit ederek ısı hata indirgeme çalışmaları yapmışlardır.

İşleme sırasında oluşan hataların birbirleriyle etkileşimli olması (ısı kaynağı, termal genleşme katsayısı, tezgâh sisteminin şekli ve değişen ortam şartları) takım tezgâhını karmaşık hale getirir ve bunun sonucunda matematik modellerle hata tahmini yapmak oldukça zorlaşır [70].

Yapılan literatür araştırmalarından anlaşılaacağı üzere araştırmacılar değişken sayısını mümkün olduğunca azaltmaya çalışmışlardır. Parametre sayısı arttıkça çözülmesi gereken sayısal problemlerde (çözülecek polinomların derecesi ve türü) o ölçüde artmaktadır. Direkt ölçüm metodlarında tezgâhın içine ve dışına yerleştirilen lazer interferometre veya küresel çubuk (ball bar) kullanılmaktadır. 5 eksenli tezgâhlarda interferometre ile 39 bileşen tespit edilebilmekle birlikte dönen eksenlerdeki hatalarını tespit etmek oldukça zordur. Tablo 1.6'da araştırmacıların kullandıkları yöntemler ve ihmal ettikleri bileşenler gösterilmektedir [71].

Tablo 1.6 Beş eksenli cnc takım tezgâhlarındaki işleme hatalarını azaltmak için kullanılan yöntemler [71]

Araştırmacı	Doğrusal hata	Dönel hata	Karesel hata	Bağımsız parametre	Metod	Derece	Deney	Parametre azaltma
[1] [*] Bohez	17	15	7	39/32	LSQ	3	Sim/holes	Lineer , 1. derece
[7] Soons	15	15	0	$f(\text{typ})$	LSQ	2	Rectangular grid	Maliyet/çözüm kolaylığı
[8] Srivastava	15	15	0	30	Doğrudan	1	Sim	Düşük derece
[9] Florussen	9	3	0	12	LSQ	2	Sim/laser	İlgili parametreler
[10] Lin	15	15	7	37	-	-	-	Çözülemeyecek parametreler
[18,17] Lei	34	21	7	61/59/13	LSQ	0	Laser/probe ball	Ölçilemeyen hatalar
[22] Abbaszadeh	21	21	0	42/20/8	Doğrudan	0	Sim/ball bar	Matris derecesi
[23] Mahbubur	4	4	0	8	Doğrudan	0	Ball bar	Sadece iki dönel eksen
[24] Tsutsumi	5	8	0	8	Doğrudan	0	Ball bar	Sadece iki dönel eksen

Jakstas ve Arkadaşları [72] yaptıkları çalışmada sonlu eleman modeli, lazer interferometre, 21 sensörlü CCD mikroskop ve doğrusal ölçekli komperatör kullanarak sismik yükler altında, düzenli olmayan sıcaklık dağılımlarında, elektro-manyetik gürültü ve diğer bozucu etkenler sonucunda yani ideal olmayan ortam şartlarında uzunluk ölçümü yapmışlardır.

Termal davranışı modellemede yaygın olarak sonlu eleman analizi, koordinat dönüşüm metotları ve YSA gibi yöntemler kullanılmaktadır. Hata indirgeme metotları ne kadar geliştirilmeye çalışılsa da tam olarak çözülemeyen birçok problem vardır. Tezgâh doğruluk sistemlerinin çok karmaşık ve birbirinden farklı olmasından dolayı yeni eleman ve sistemler tezgâha uyarlanamamaktadır [72].

Xu ve Arkadaşları [73] yaptıkları çalışmada termal hataları indirgeme için bilyeli vida sisteminden kaynaklanan pozisyonlama hatalarını incelemişler ve termal denge şartlarına gelme süresini azaltmak için hava soğumalı sistemin performansını artırmaya çalışmışlardır. Termal hataları modellemek için sonlu eleman metodu kullanmışlardır. Uyguladıkları yöntemle ısı kaynaklarını kontrol etmeye çalışarak pozisyonlama doğruluğunda iyileştirme yapmışlardır. Sonlu eleman modelini oluştururken vida milini içi boş silindir, mil yatağı ile somun arasındaki ısı üretimini ve ısı yayılım katsayısını sabit kabul etmişlerdir.

Sürekli işleme yapılması sonucunda makine elemanlarında ortaya çıkan sıcaklık artışı, pozisyonlama hatalarının da önemli derecede artmasına sebep olmaktadır. Aynı işleme şartlarında yapılan deneylerde makine elemanlarının uzun süreli çalışmasının, kısa süreli çalışmasına göre daha farklı hatalar ortaya çıkarmıştır. Ramesh ve Arkadaşlarının

[74] yaptığı çalışmada, üç eksenli dik işleme merkezinin termal davranışı farklı işleme şartlarında tespit edilmeye çalışılmış ve elde edilen deneysel sonuçlar doğrultusunda farklı parametrelerin pozisyonlama hatalarına etkileri araştırılmıştır.

Temelde genleşme ve eğilme olarak iki termal hata modu bulunmasına rağmen takım tezgâhında birçok farklı yapısal elemanın bulunması ve bu elemanların farklı davranış göstermeleri sistemin termal hata modunu belirleme işlemini zorlaştırmaktadır. Termal hata indirgeme işlemlerinde karşılaşılan en önemli problemler; en uygun sıcaklık sensörü konumunun tespit edilmesi ve işleme şartlarının değişmesi sonucu termal hata modelinin doğruluğunu koruyabilmesidir [75].

Chen ve Arkadaşları [76] yaptıkları çalışmada hidrostatik iş milinin termal-mekanik hata modelini oluşturmaya çalışmışlardır. İş milinde oluşan sıcaklık dağılımı ve deformasyon termo elastik model yardımıyla sonlu eleman modeli kullanarak incelemişler, deneysel verilerle teorik değerlerin birbiriyle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Hao ve Arkadaşları [77] yaptıkları çalışmada genetik algoritma-geri yayılım algoritması kullanarak belirledikleri 5 önemli sıcaklık noktasına bağlı termal hata analizi yapmışlardır. Eş zamanlı indirgeme sistemi ile yeni model önerisi oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda tornalama işleminde çap hatasını $27\mu\text{m}$ 'den $10\mu\text{m}$ 'ye düşürmüşlerdir.

Hata indirgeme çalışmalarında çoğunlukla takım tezgâhı bileşenlerindeki yer değiştirmeler incelenir. Bu işlemin doğruluğunu etkileyen faktörler şunlardır; ilgili tüm geometrik hata parametrelerinin ölçülmesi, çalışma süresinin dikkate alınması, ölçümlerin yeterince hassas alınması, kısa zaman zarfı içerisinde gerçekleşen sıcaklık değişikliklerinin etkisinin tespiti [78].

Termal hatalar sıcaklık farklılıklarından oluşur ve bu farklılıklar tezgâhta güç kaybı ve gerilmelere sebep olur. Ortam sıcaklığına bağlı oluşan termal hataları azaltmak için tezgâh elemanlarının ve iş parçasının termal genleşme katsayısı iyi bilinmelidir. Hata kaynağına uygun bir ölçüm sistemi seçilmesi önemlidir. Dış etkenlerden takım tezgâhının bulunduğu ortam sıcaklığı yavaş değişir fakat bu değişim hacimsel performansı tamamen etkiler. Tezgâh yapısında bulunan kızaklar ve yatakların sebep oldukları bölgesel deformasyonlar hacimsel performansı kısmen etkiler. İç ısı

kaynakları sonucunda oluşan yer değiştirmeleri tahmin etmek zordur ve çevresel şartlara göre çok daha hızlı değişim gösterirler [78].

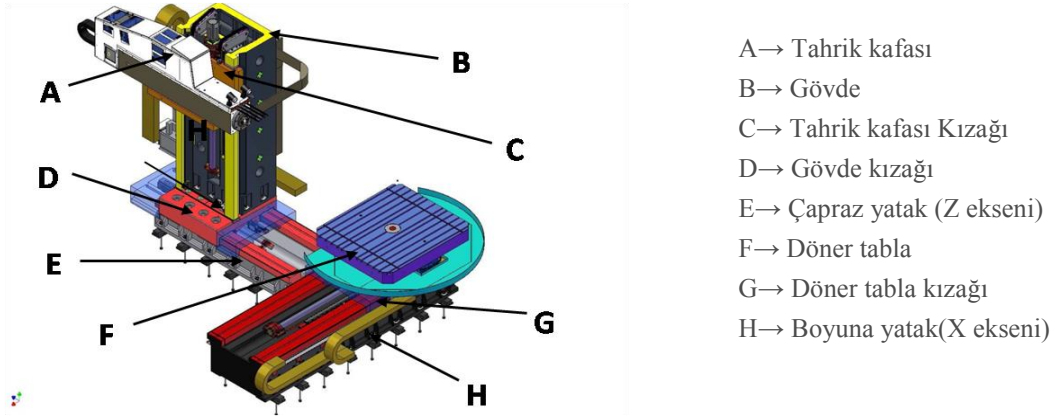
Takım tezgâhının termal performansını iyileştirmek için üç yol kullanılır; ilki termal karakteristik için yapısal iyileştirilmelerin yapılmasıdır. Bu işlemde karmaşık yapılardan uzak durularak termal genleşme katsayısı birbirine yalın olan simetrik yapılar oluşturulmalıdır [79].

İkincisi ise sıcaklık kontrolüdür. Belirli noktaların sıcaklık değerleri ve dağılımlarının kontrolü ile iş parçası ile etkileşim sonucu ortaya çıkan iş milindeki termal deformasyon azaltılmış olur. Sıcaklık kontrolü ise takım tezgâhına ısıtma veya soğutma sistemi kurularak yapılabilir. Her iki sistemin de amacı takım tezgâhındaki termal deformasyonu azaltmak ve sıcaklık dağılımını dengelemektir. Yaygın olarak kullanılan metot ise çeşitli soğutma sıvıları ile iş mili tarafından üretilen ısıyı uzaklaştırmaktır.

Üçüncüsü ise termal deformasyonun modellenmesi ve indirgeme işlemleridir. Bu metot takım tezgâhı dizaynı ve üretimi tamamlandıktan sonra işleme sırasında tezgâh doğruluğunu artırmak için kullanılır. Başlangıç aşamasında takım tezgâhının sıcaklık dağılımı ve termal deformasyonları matematik metotlar ve termal deformasyon modelinin oluşturulmasıyla deneysel çalışmalar sonucunda elde edilir. En çok kullanılan modelleme metotları, doğrusal geri yayılım, çoklu cisim teorisi, yapay sinir ağı ve gri sistem teorisidir. Eş zamanlı indirgeme metotları takım tezgâhı performansını artırmada yaygın olarak kullanılır [79].

Zhang ve Arkadaşları [79] yaptıkları çalışmada dik işleme merkezi iş milinin doğruluğunu artırmak için SEM simülasyonları ile deneysel ölçümleri karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında iş mili (headstock) soğutma sistemini ısı transferi analizleriyle kontrol ederek takım tezgâhının tamamında meydana gelen termal çarpılmaları azaltmışlardır.

Liu ve Arkadaşları [80] yaptıkları çalışmada iş mili termal özelliklerini SEM ile modelleyerek iş milinin z eksenini doğrultusundaki pozisyonlama hatalarını kritik bağlantı elemanlarının sıcaklığına bağlı olarak z doğrultusundaki termal çarpılmaları azaltmak için deneyler yapmışlar ve z eksenini pozisyonlama hatalarını % 80 oranında azaltmışlardır.



Şekil 1.10. Freze tezgâhının ısıl değişimlerden en çok etkilenen kısımları [79]

Abdulshahed ve Arkadaşları [81] yaptıkları çalışmada deneysel araştırma için özel olarak üretilen CNC freze tezgâhında uyarlanabilir bulanık mantık sonuçlanma sistemi (ANFIS) kullanarak iki farklı termal model oluşturmuş ve tezgâh gövdesine yerleştirdikleri sensorlardan alınan verileri kullanarak tezgâh doğruluğunu artırmaya çalışmışlardır.

Termal hatalar iç ve dış ısı kaynakların etkisiyle ortaya çıkar. İç ısı kaynakları tezgâh yapısında bulunan makine elemanları, motorlar, aktarma elemanları arasındaki sürtünme ve işleme sırasında takım iş parçası etkileşiminden oluşur. Dış ısı kaynakları ise tezgâhın bulunduğu ortamdan kaynaklanan mevsimsel veya gece gündüz arasındaki sıcaklık değişimleri, tezgâhın bulunduğu ortamın dış ortam bağlantısı ve tezgâh çevresinde bulunan diğer tezgâhların oraya çıkardığı sıcaklık değişikliklerinden oluşur. Takım tezgâhlarının termal davranışlarının karmaşık olmasının sebebi yukarıda belirtilen farklı ısı kaynakları arasındaki etkileşimdir [81]. Çevrim içi (doğrudan) hata indirgeme sistemlerin dezavantajı ani sıcaklık değişimlerini yakalayabilmek için hızlı ve sık ölçüm alınması ve değerlendirilmesinin zorluğudur. Sisteme yapılacak müdahaledeki gecikme hatanın takibi ve düzeltilmesi işlemlerinin doğruluğunu azaltmaktadır [81].

Hata indirgeme işlemlerinde doğru sonuç alabilmek için uygun yerlere uygun sensorlerin yeteri sayıda yerleştirilmesi gerekir. Sensor sayısının artması doğruluğu artırırken hata indirgeme maliyetlerinin artmasına ve veri kirliliğine sebep olduğu unutulmamalıdır.

Feng ve Arkadaşları [82] yaptıkları çalışmada dik işleme merkezi bilyeli vida sisteminin sürtünme ısı etkisi altında ki termal genişmesini tespit etmek için zamana bağlı bir matematik model kullanmışlardır. Bilyeli şaftın termal uzamasını doğrusal kabul ederek katı bir silindir olarak modellemişler, sürtünme ısını aynı ilerleme değerleri için sabit kabul etmişlerdir. Hata indirgeme işlemleri sonucunda işleme hatalarını %50 oranında azaltmışlardır.

Hata indirgeme işlemleri aşağıdaki sıralama ile yapılır [83].

1-Hatanın ölçümü

2-Hatanın modellenmesi

3-Hatanın indirgenmesi

Hatanın ölçümü lazer interferometre veya farklı ölçüm aygıtlarıyla yapılabilir ancak ölçülen hatanın doğruluğunu iyi tespit etmek gerekir. Ölçülen hatayı modellemede sonlu eleman modeli, homojen dönüşüm matris metodu, çoklu gerileme, çoklu cisim sistem teorisi, en küçük kare metodu ve genetik algoritma gibi yöntemler kullanılır. Başarılı bir hata modeli oluşturmak için bahsedilen bu metodların farklı tezgâh ve farklı iş parçalarına uygulanabilir olması gerekmektedir. Hata indirgeme işlemleri ise G kodlarının yeniden düzenlenmesiyle gerçekleştirilir [83].

Farklı birçok türde CNC tezgâhının bulunması ve bu sayının gelişen teknoloji ile birlikte sürekli artması çok fazla sayıda hata modeli oluşmasına ve bunun sonucunda hata indirgeme işlemlerinin karmaşık ve maliyetli olmasına sebep olmuştur [83].

1.5. İşleme Hataları ve Düzeltme Teknikleri

İşleme doğruluğu, istenilen boyutsal ve geometrik doğruluk ile işlenmiş parça arasındaki uyum olarak adlandırılır. Hata ise üretilecek iş parçası toleransı ile üretilen parça ölçüleri arasındaki sapmadır. İşleme sırasında meydana gelen hatanın boyutu o tezgâhın doğruluğunu verir. Hatalar karakteristikleri bakımından, yarı durgun-statik hatalar ve dinamik hatalar olmak üzere iki kategoride sınıflandırılabilir. Yarı durgun-statik hatalar, takım ile işparçası arasındaki hareket sonucu zamana bağlı yavaş değişen ve takım tezgâhının kendi yapısıyla ilgili olan hatalardır. Dinamik hatalar ise iş milinin hatalı hareketi, tezgâh yapısındaki titreşimler, kontrol ünitesi hataları gibi hatalardır.

Genelde bir işleme merkezi gövde, yatak, kolon, iş mili, kızak, çizgisel ve dönel hareket yapan eksenlerden oluşur. Toplam hata üzerinde bu elemanların her birinin etkisi vardır. Hatalar kaynakları bakımından aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir [43];

- Tezgâh yapı ve bileşenlerindeki geometrik hatalar
- Kinematik hatalar
- Termal deformasyon hataları
- Kesme kuvvetlerinden kaynaklanan hatalar (yerçekimi, ivmelenen eksenler, kesme işleminin kendisi)
- Homojen olmayan malzeme hataları
- Bağlama hataları
- Aygıt hataları
- Takım aşınması
- Servo motor hataları

bu belirtilen hatalar, geometrik ve kinematik hatalar, ısı hataları ve kesme kuvvetlerinden kaynaklanan hatalar olmak üzere üç ana grupta toplanır.

Geometrik hataların bileşenleri, çizgisel pozisyonlama hatası, eksen hareketlerinin doğruluğu ve düzgünlüğü, iş mili eğim açısı, boşluk hataları gibi hatalardan oluşur. Kinematik hatalar ise takım tezgâhının hareketli elemanlarının bağıl hareketindeki bozukluktan kaynaklanır.

1.5.1. Isıl Hatalar

Termal hatalar, iş parçasında meydana gelen boyutsal hatalarının %40-70'ini oluşturur [14]. Termal etkiye sahip 6 kaynak vardır.

- i) Kesme işlemi sonucunda açığa çıkan ısı
- ii) tezgâh tarafından üretilen ısı,
- iii) soğutma sistemi tarafından ortaya çıkarılan soğuma ve ısınma,
- iv) ortam sıcaklığındaki değişimler,
- v) insan etkisi,
- vi) bir önceki ortamdan kalan sıcaklık [14].

Takım tezgâhının sürekli çalışması sırasındaki hareketli elemanlardaki sürtünme, motorlar ve pompalar gibi elemanlar ısı üretimine sebep olur. Açığa çıkan bu ısı takım tezgâhının çeşitli elemanlarının genleşmesine sebep olarak pozisyonlama doğruluğunu etkiler.

International Committee of Weights and Measures in Paris (1931) de bir parçanın boyunun ölçüşü o parçanın 22°C'deki boyu olarak kabul edilmiştir. Hata oranı bu sıcaklık değerinden ne kadar uzaklaşıldığına bağlıdır. Takım tezgâhını doğruluğu aşağıdaki yöntemler kullanılarak artırılabilir.

- a) Takım tezgâhının bulunduğu ortamın ısı akışının kontrol edilmesi
- b) Isıl değişimden etkilenmeyi azaltmak için takım tezgâhı sisteminin yeniden dizaynı
- c) Hareket kontrolü yoluyla hata indirgeme

Takım tezgâhının termoelastik davranışı doğruluk kapasitesini belirlemedeki en önemli faktörlerden biridir. Takım tezgâhının davranışlarının belirlenmesinde önemli etkiye sahip olan ısı kaynakları, termal sınır şartları, ısı transfer mekanizması gibi özelliklerin doğru bir şekilde tespit edilememesi takım tezgâhı dizaynını zorlaştırmıştır. Mümkün olan minimum termal şekil değiştirme için düşük genleşme katsayılı malzemeler ile iyi dizayn edilmiş sıcaklık kontrol sistemleri kullanılmıştır [5].

İşleme doğruluğunu etkileyen en önemli faktör kesme operasyonudur. Bu doğruluk kaldırılan talaş oranından etkilenmektedir. Isı üretimi, bitirme işlemlerinde azken, kaba işleme sonucunda yoğun bir ısı üretimi gerçekleşir. Bu faktör, yüksek hacimde talaş kaldırıldığı zaman, ısı üreten diğer tüm kaynaklardan daha etkilidir. Bu problemi çözmek için yüksek hacimli talaş kaldırmada soğutucu kullanımı artırılmalıdır. Son zamanlarda yüksek hızda işleme ve bileme teknikleriyle ısı iş parçası yerine talaşa aktararak uzaklaştırılır. Termal hata problemlerini çözmek için kullanılan yöntemlerden biri de sıcaklık kontrollü odalar kullanmaktır. Ancak bu yöntemle sıcaklığı sabit tutmak hem zor hem de maliyetlidir [45].

1.5.2. Geometrik Hatalar

Takım tezgâhında oluşan geometrik hatalar, tezgâh eksenleri ile bu eksenler arasında oluşan hatalardan kaynaklanır. Hata bileşenleri genelde pozisyonlama hatası, doğrusallık hatası, açısal hatalar ve diklik hataları ile ifade edilir. Rijit cisim kinematikinden her ötelenen ve dönen eksen pozisyona bağlı olarak çizgisel ve açısal hatalar içeren 6 geometrik hata bileşenine sahiptir.

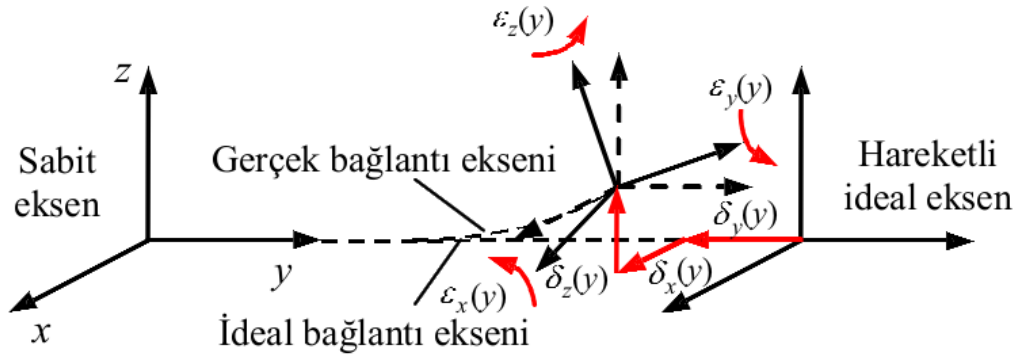
Ötelenen eksenlerdeki 6 hata bileşeni; biri pozisyonlama hatası, ikisi öteleme hatası ve üçü sarsılma ile yuvarlanmadan kaynaklanan hatve hatası adı verilen hatalardan oluşur

(Şekil 1. 11.)

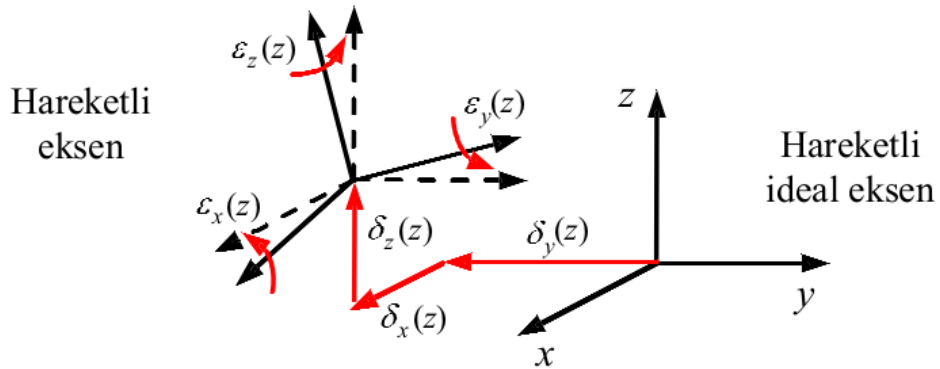
Dönen eksendeki hata bileşenleri, üç doğrusal hata bileşeni; bir eksenel hata, iki radyal hata ve üç açısal hata bileşeninden (bir açısal pozisyonlama hatası ve iki eğim hatası) oluşur. (Şekil 1.11.)

Pozisyona bağlı oluşan muhtemel hata bileşenleri Tablo 1.7' de gösterilmiştir. δ_x , δ_y ve δ_z lineer hataları, ε_x , ε_y ve ε_z dönen eksendeki açısal hataları, α , β ve γ ise sırasıyla A,B ve C eksenindeki dönme açılarını göstermektedir.

a



b



Şekil 1.11. Doğrusal ve açısal hatalar. (a) Öteleme eksenini(y eksenini), (b) Dönme eksenini (z eksenini) [29].

Takım tezgâhlarında pozisyonlamaya bağlı olmayan konum hataları (location error) da vardır. Teorik olarak ötelenen ve dönen eksenlerde 6 tane konumlama hatası oluşur. Fakat konumlama hatalarının çoğu gerçek hata modelinde, koordinat sistemi ve referans pozisyonu seçiminden dolayı ihmal edilebilir [29].

Tablo 1.7 Takım tezgâhında pozisyona bağlı hatalar [29].

Eksenler	Hata Bileşenleri
X	$\delta_x(X), \delta_y(X), \delta_z(X), \varepsilon_x(X), \varepsilon_y(X), \varepsilon_z(X)$
Y	$\delta_x(Y), \delta_y(Y), \delta_z(Y), \varepsilon_x(Y), \varepsilon_y(Y), \varepsilon_z(Y)$
Z	$\delta_x(Z), \delta_y(Z), \delta_z(Z), \varepsilon_x(Z), \varepsilon_y(Z), \varepsilon_z(Z)$
A	$\delta_x(\alpha), \delta_y(\alpha), \delta_z(\alpha), \varepsilon_x(\alpha), \varepsilon_y(\alpha), \varepsilon_z(\alpha)$
B	$\delta_x(\beta), \delta_y(\beta), \delta_z(\beta), \varepsilon_x(\beta), \varepsilon_y(\beta), \varepsilon_z(\beta)$
C	$\delta_x(\gamma), \delta_y(\gamma), \delta_z(\gamma), \varepsilon_x(\gamma), \varepsilon_y(\gamma), \varepsilon_z(\gamma)$

1.5.3. Kesme Kuvvetlerinden Kaynaklanan Hatalar

Talaş kaldırma işlemi zorlu kesme şartları altında gerçekleşir ve yüksek güç gerektirir. Kesme kuvvetleri sonucu takım-iş parçası çiftinin ve tezgâh yapı elemanlarının birbirine göre konumu özellikle de derin pasolarda değişmekte ve işleme hataların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

Takım tezgâhına etkiyen üç tür yük vardır, bunlar;

- İş parçası ağırlığı
- Talaş kaldırma sonucu oluşan kesme kuvvetleri
- Takım tezgâhının kendi elemanlarının ağırlığı

Bu yükler takım tezgâhı yapı elemanlarında elastik gerilmelere ve sonucunda yer değiştirmelere sebep olur. Bu olumsuz etkilerden korunmak için kaliteli takım tezgâhı ve kesici takımlar kullanılmalı ve takım tezgâhı imalatçısının takım tezgâhı kullanım talimatları dikkate alınmalıdır.

1.5.4. Kinematik Hatalar

Kinematik hatalar takım tezgâhının hareketli elemanlarının birbiri üzerinde yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkan hatalardır. Örneğin elektronik olarak koordinatları belirlenen bir noktaya mekanik olarak hatalı gidilmesi (pozisyonlama hatası) veya bir konumlamamanın tekrarı ile önceki konumlama noktası arasındaki fark (tekrarlama hatası) oluşması kinematik hataların başlıca türleridir [84].

1.5.5. Alet Cihaz Hataları

Tezgâh kontrol ünitesi, elektronik donanım (sensörler, anahtarlar vs.), servo ve step (adım) motorlar ve bunları birbirine bağlayan arabirimlerin (I/O kartları, PLC'ler) sinyal üretme ve/veya algılamadaki hatalardır. Ayrıca eksenlerin konik, dairesel vb. hareketlerini sağlayan interpolasyon fonksiyonlarının (modüllerinin) hataları da bu kapsamda değerlendirilir [84]. Bu grup hatalar gerek sistematik oluşu, gerekse farklı disiplinleri ilgilendirmesi nedeniyle imalatçılar tarafından fazlaca incelenmemiştir. Bu hata türünün genel hata toplamındaki oranı da oldukça düşüktür [6].

1.5.6. Aşınma Hataları

Talaşlı imalat işlemlerinin yapılması sırasında zamanla ortaya çıkan hatalardır. Özellikle seri imalat esnasında kesici takım ölçüleri belirli aralıklarla kontrol edilmezse takım aşınması sonucunda iş parçası için istenilen gerekli tolerans değerleri yakalanamayabilir. Uygulanacak takım telafisi veya takım değiştirme işlemleri ile aşınma hataları sonucu ortaya çıkan ölçü hataları azaltılabilir. Takım aşınmasına ilaveten takım tezgâhının sürekli çalışması sonucu kızak ve bilyeli yataklarda da aşınma meydana gelir. Bu durum her işleme operasyonunda kendini gösteren ve zamanla artış kaydeden bir işleme hatası üretir. Ayrıca ortaya çıkan aşınma temas eden eleman çiftlerinin çalışma uyumunu bozarak yeni aşınma mekanizmalarını tetikleyebilir ve mevcut aşınma süreçlerini hızlandırabilir [84, 85].

1.5.7. Diğer Hatalar

İş parçası üretim tekniklerinden(döküm, sıcak-soğuk şekillendirme) kaynaklanan hatalar, işleme operatörünün tezgâh tablasına parça bağlama hataları, tezgâh çevresinde çalışan diğer makinaların oluşturduğu titreşim hataları, takım tezgâhının yere uygun bir şekilde sabitlenmemesinden kaynaklanan gezinme ve titreşim hataları ve tezgâh tasarımından kaynaklanan hatalar diğer hatalar kapsamında değerlendirilebilir.

1.6. Isıl Hata Analizi

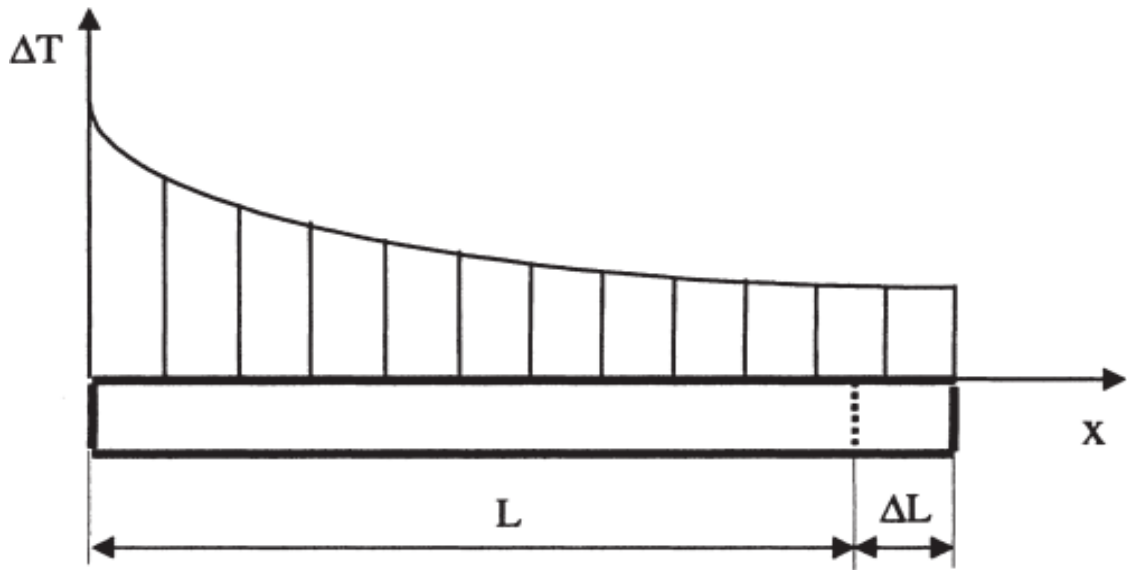
İki temel termal hata modu bulunmaktadır; termal genleşme ve termal eğilme şeklinde,

1.Termal genleşme modu: Eğer bir kırışte Şekil 1.12'deki gibi bir sıcaklık dağılımı varsa, kırışteki toplam termal genleşme değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta L = \int_0^L \alpha(\Delta T) dx \quad (1.1)$$

Burada, ΔL termal genleşme, L çubuğun ilk boyu, ΔT kiriş üzerindeki sıcaklık dağılımı ve α ise termal genleşme katsayısıdır.

Üstteki denklemden de anlaşılacağı üzere, termal genleşme hatası sıcaklık dağılım eğrisi altındaki alanla orantılıdır.

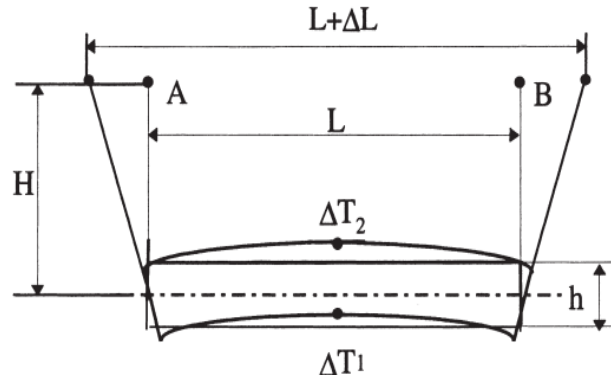


Şekil 1.12. Bir kirişin termal uzama modu

2. termal eğilme modu: Termal eğilme moduna genelde tezgâhın gövde veya kolon elemanlarında (C tipi tezgâh yapılarında) rastlanır. Şekil 1.13 de görüldüğü gibi eğer bir kirişin alt ve üst yüzeyleri farklı sıcaklıkta ise A ve B noktaları arasındaki termal hata aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\Delta L = \alpha(\Delta T_2 - \Delta T_1) LH / h$$

Burada, ΔT_2 ve ΔT_1 üst ve alt yüzeydeki sıcaklıklar, L ve h kirişin uzunluğu ve kalınlığı, H kirişin merkez doğrultusunun A ve B noktasına uzaklığı ve ΔL ise A ve B noktaları arasındaki termal hatadır.



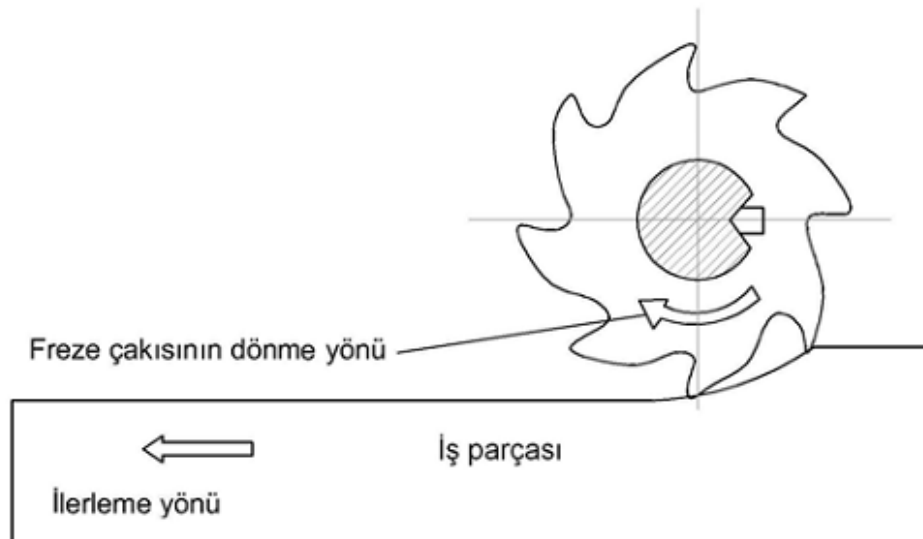
Şekil 1.13. Bir kirişin termal eğilme modu [75]

Burada kiriş yüzeyini kızak olarak kabul edersek termal eğilme hataları sonucunda termal yığılma hataları, vida adım hatası, doğrusal yer değiştirme hatası ve dikey doğruluk hataları ortaya çıkacaktır. Eğer kiriş bir ucundan sabitlenirse paralellik hataları ve karesel hatalar da ortaya çıkacaktır.

Temelde iki termal hata modu bulunmasına rağmen takım tezgâhında birçok farklı yapısal elemanın bulunması ve bu elemanların farklı davranış göstermeleri sistemin termal hata modunu belirleme işlemini zorlaştırmaktadır [75].

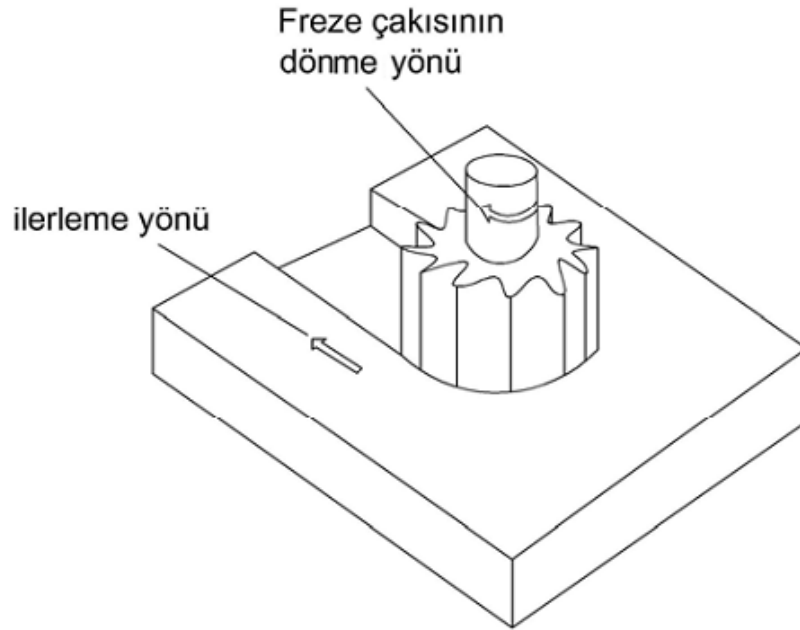
1.7. Kesme İşlemi

Frezeleme düz ve kavisli yüzeylerin, kanalların, helisel kanalların, dişlilerin ve vida dişlerinin imal edilmesi için belirli geometrik kesici takımlarla talaş kaldırma işlemidir. Frezeleme işleminde, çok ağızlı freze çakısı dairesel şekildeki kesme hareketini uygular.



Şekil 1.14. Yatay frezeleme [26]

İlerleme hareketi genellikle işparçası tarafından yerine getirilir, fakat bazı tezgâhlarda işleme başlığı tarafından da yapılabilir. Frezeleme, takım eksenine göre frezelenen yüzeye konumuna göre, yatay frezeleme (Şekil.1.14) ve dikey frezeleme (Şekil 1.15.) olmak üzere iki gruba ayrılır.



Şekil 1.15. Dikey (alın) frezeleme [26]

1.7.1. Talaş Kaldırma Mekanikliği

Belirli boyut, şekil ve yüzey kalitesine sahip bir parça üretmek için keskin uçlu bir takımla güç kullanarak, iş parçasından tabaka şeklinde malzeme kaldırma işlemine talaş kaldırma denir. İş parçası üzerinden mekanik yolla malzeme kaldırılması yoluyla istenen şeklin elde edilmesine talaşlı imalat denir. Talaş kaldırma sırasında meydana gelen kuvvetler Şekil 1.16.'da gösterilmiştir. Burada;

F_z : Bileşke talaş kaldırma kuvveti

F_s : Esas kesme Kuvveti

F_r : Radyal kuvvet

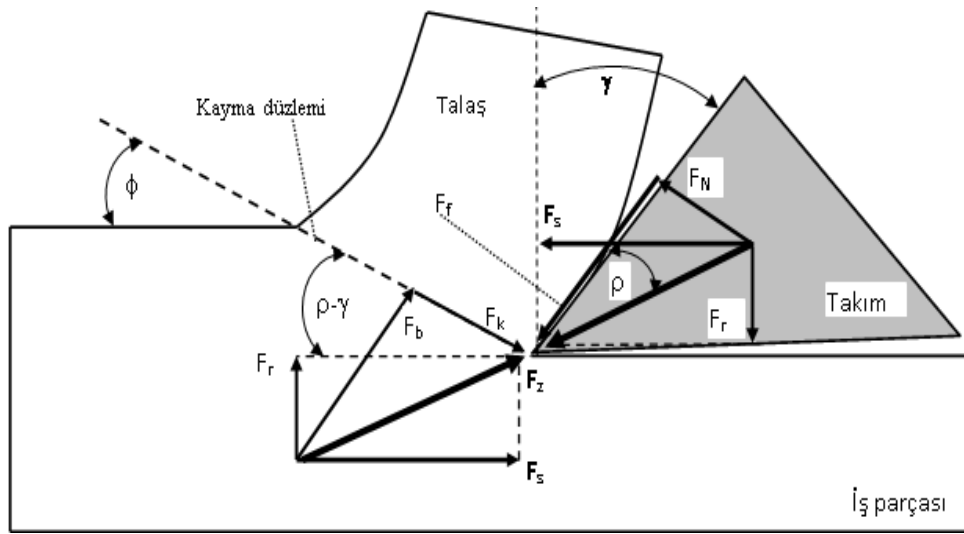
F_b : Kayma düzlemine dik basma kuvveti

F_f : Sürtünme kuvveti

F_N : Talaşın takım yüzeyine etki ettiği dik kuvvet

F_k : Kayma kuvveti

P : Sürtünme açısıdır



Şekil 1.16. Talaş kaldırmada etkili olan kuvvetler

Talaş kaldırma sırasında oluşan bileşke talaş kaldırma kuvveti F_z ne kadar küçük olursa kesme işlemi de o ölçüde kolay ve verimli olur. Bu yüzden işleme sırasındaki talaş kaldırma faktörlerini iyi belirleyerek optimum bileşke talaş kaldırma kuvveti elde edilmelidir. Talaş kaldırma faktörleri şunlardır;

- Takım geometrisi
- Talaş geometrisi
- Kesme hızı
- İlerleme hızı
- Talaş derinliği
- Kesici takım ömrü
- Kesme açıları
- Titreşim durumu
- Soğutma sıvısı kullanımı
- Takım-işparçası çifti

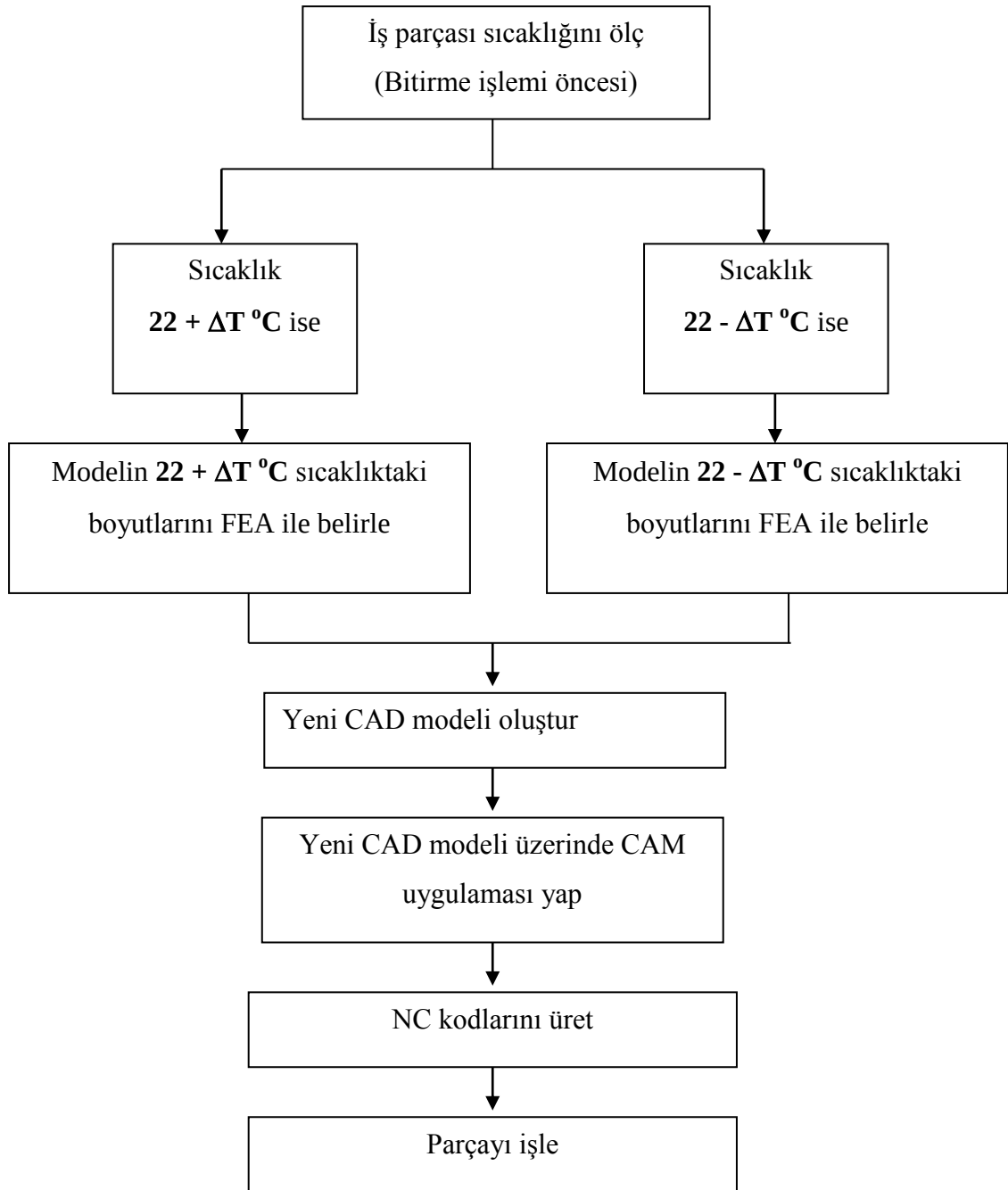
2. BÖLÜM

TEORİK ÇALIŞMA

2.1. Hata Düzeltme Yöntemi

İklimlendirilmiş imalat ortamlarında ideal sıcaklığın altında veya üstünde bir sıcaklıkta imalat gerçekleştirilmektedir. Bunun bir sonucu olarak imalatı yapılan iş parçası olması gereken boyutlardan daha büyük ya da daha küçük olarak elde edilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen hata düzeltme yönteminde, imalat ortam sıcaklığı ne olursa olsun mamul iş parçasının tam boyutlarında imal edilmesini sağlayacak bir strateji izlenmiştir. Bu doğrultuda atılacak ilk adım, iş parçasının CAD modeli üzerinde sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemiyle yapılacak ısı genleşme/büzülme analizidir. Bu analiz sonucunda iş parçasının ortamdaki mevcut sıcaklık koşullarında hangi genleşme/daralma davranışını göstereceği belirlenecektir. İkinci aşamada iş parçasının CAD modeli, FEA analiz sonucuna göre revize edilecektir. Bu revizyon, yeni CAD modeli üzerinde yapılacak CAM uygulaması sonunda işlenen parçanın ideal sıcaklıkta tam istenen boyutlarda olmasını sağlayacak şekilde düzenlenecektir. Yöntem Şekil 2.1.'deki iş akış şeması üzerinde tanıtılmaya çalışılmıştır.

FEA analizleri ideal sıcaklık haricinde ki sekiz farklı ortam sıcaklığında yapılacaktır. Daha sonraki bölümde sunulan ANSYS programında çalıştırılmak üzere hazırlanan malzeme özellikleri ve sıcaklıkların tanımlandığı makro yazılım yardımıyla FEA analizleri yapılacak ve analizler sonucunda nokta bulutu halinde yeni iş parçası modeli elde edilecektir. Nokta bulutu halindeki ısı analizi yapılmış model Solidworks CAD programı yardımı ile katı model haline dönüştürülerek iş parçasının ideal sıcaklıkta istenilen ölçülerinin elde edilmesi için mevcut atölye sıcaklığında işlenmesi gereken ölçüleri elde edilecektir. Örneğin; işleme sıcaklığı oda sıcaklığından 8 °C yüksek ise FEA ortamındaki makrodaki ilgili malzeme satırına +8 yazılacak ve malzemenin o sıcaklıktaki boyutları analiz sonucunda elde edilecektir.



Şekil 2.1. Hata Düzeltme Yöntemi

Hazırlanan makro ile her bir ortam sıcaklığı için malzeme özelliklerini ve analiz aşamalarını tekrarlamaya gerek kalmadan sadece ilgili satıra analiz yapmak istediğimiz ortam sıcaklığını girmek yeterlidir. Bu yöntemde karşılaşılabilecek en büyük problem FEA analizi sonucu ortaya çıkan ısı değişiminin CAD/CAM paket programlarına aktarılamamasıdır. Bu durum CAD modelin revize edilebilmesinin önünde bir engeldir.

Bu sorunu gidermek için ANSYS paket programında ısı genleşme analizi sonucu elde edilen yeni modelin düğüm noktalarının CAD/CAM paket programına nasıl aktarılacağı Bölüm 2.5'te anlatılmıştır. Böylece yeni CAD modeli için ihtiyaç duyulan noktalar kümesi CAD/CAM modülüne aktarılmış olacak ve CAD/CAM/FEA bütünleşmesi tamamlanmış olacaktır.

2.2. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) Uygulaması

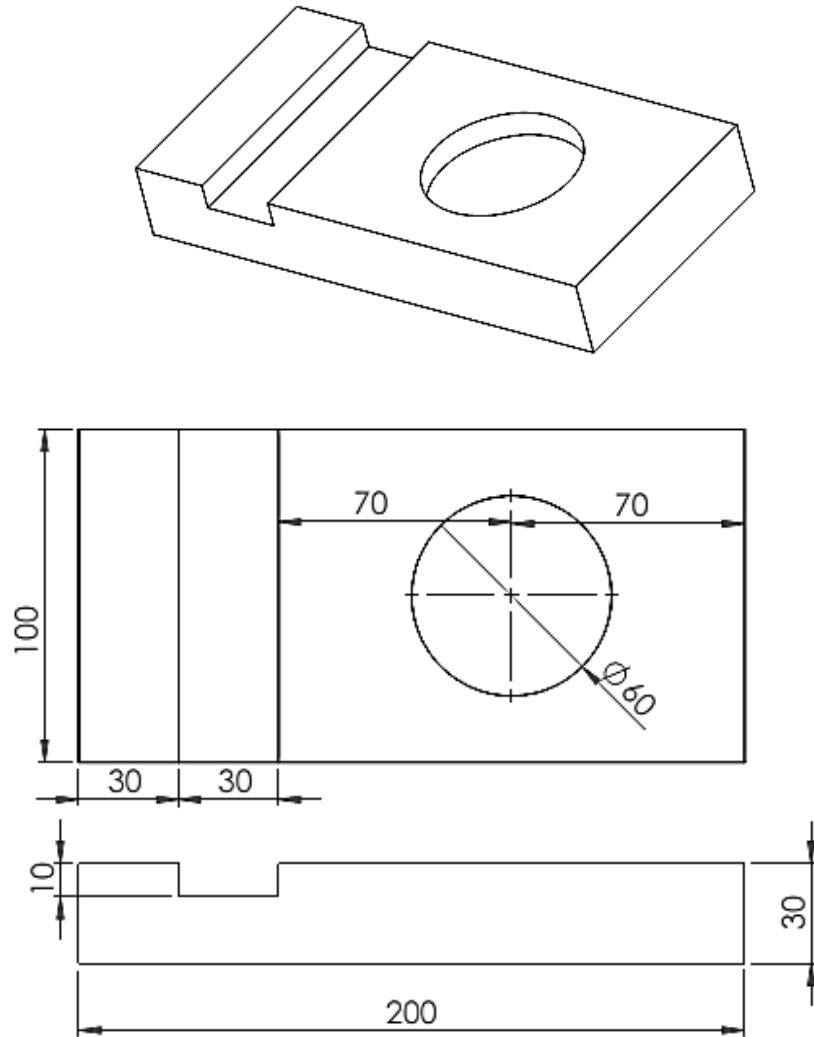
Sonlu elemanlar metodu ile iş parçası modelleme işleminde mikron derecesinde hassas sonuç elde edebilmek için hangi yapı elemanı ile modelleme yapılacağı ve iş parçasına uygulanacak mesh sıklığına karar vermek yapılan çalışmanın doğruluğunu etkileyen önemli etkenlerdir. Modellemede kullanılmak üzere yapı elemanı olarak 8 nodlu Solid 185 ile analizlere başlanmış ve tatminkar sonuçlar elde edilemediği için bu yapı elemanı yârine Solid 186 eleman kullanılmıştır. Bu kapsamda işparçası önce free mesh olarak modellenmiş fakat işparçası üzerindeki dairesel oyuktaki düğüm noktası birleşimleri homojen olmadığı için sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Bu sorunu çözmek için işparçası modelindeki dairesel kısım ve doğrusal kısımlardan ayrı olarak map mesh yöntemi ile modellenmiştir. Modellemede sonraki aşama ise Mesh bağımsızlığına karar vermektir. Mesh sıklığının yeterli olmadığı durumlarda analiz sonuçları da hatalı çıkmaktadır. Bunun yanında mesh sıklığının çok yoğun seçilmesi ise doğru sonuç verirken analiz süresini uzatmaktadır. Bu yüzden doğru sonuç verecek optimum mesh sıklığını belirlemek için farklı mesh yoğunluklarında ön analizler yapılmalıdır.

Yapılan çalışmada teorik olarak ideal sıcaklığın 20 °C üzerinde iş parçasında 88µm genleşme olacağı hesaplanmış ve bu değeri en iyi şekilde sağlayacak mesh sıklığına Tablo 2.1'de yapılan analizler sonucunda karar verilmiştir.

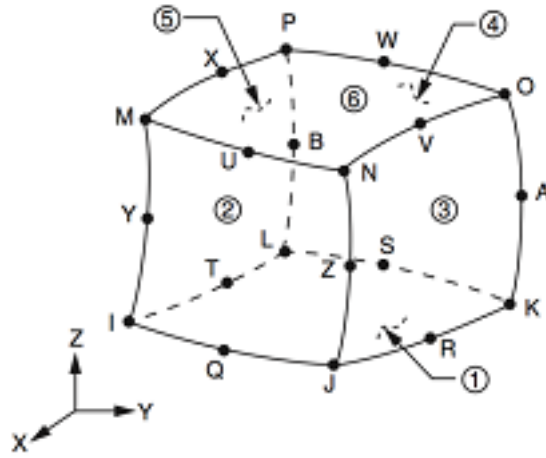
Tablo 2.1 Mesh Bağımsızlığı

Mesh eleman sayısı	x doğrultusu deform.(µm)	y doğrultusu deform.(µm)
10.4356	77/88	39/44
26.089	82/88	41/44
52.178	88/88	44/44
78.267	88/88	44/44
93.9204	88/88	44/44

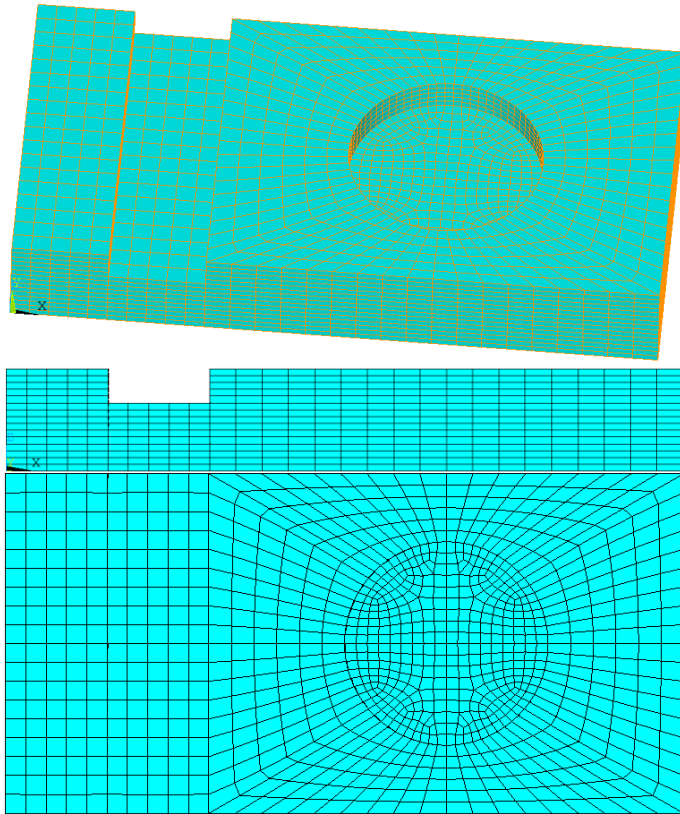
Sonlu elemanlar metodu (SEM) analizleri kullanılarak ANSYS paket programı üzerinde çalışmalara başlanmıştır. Kullanılacak model parça Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Model parça için her bir nodu üç serbestlik dereceli 20 nodlu Solid 186 eleman tipi (Şekil 2.3.) kullanılmıştır ve free mesh yapılarak elde edilen sonuçlar tatminkar olmadığı için map mesh yöntemi tercih edilmiştir. İşlenecek deney numunesi olası karışıklıkları engellemek amacıyla farklı CAD programları yerine ANSYS’te tekrar modellenmiştir. Bunun sonucunda daha düzgün mesh yapısı elde edilmiştir. Mesh yapısı düzeltilen bu modelin termal genleşme analizi yapılmış ve elde edilen düğüm noktası halindeki yeni model Solidworks paket programı yardımıyla nokta bulutundan katı modele dönüştürülmüştür.



Şekil 2.2. Model Parça Teknik Resmi



Şekil 2.3. FEM analizlerinde kullanılan eleman tipi SOLİD186



Şekil 2.4. Model Parça Mesh Yapısı

Şekil 2.4. 'de görüldüğü üzere model parça için düzgün bir mesh yapısı elde edilmiştir. Model parça X doğrultusunda 28, Z doğrultusunda 15 ve Y doğrultusunda 18 parçaya bölünmüştür. Model parça toplamda 12,450 eleman ve 52,178 noddan oluşmaktadır.

2.3. ANSYS Makro Uygulaması

Ek 1’de ayrıntılı bir şekilde sunulan makroda öncelikle Solid 186 eleman ile deney numuneleri geometrisi oluşturulmuş daha sonra uygun mesh işlemi yapılmış ve kullanılacak deney numuneleri için gerekli malzeme özellikleri seçilmiştir.

Tablo 2.2 Makro Uygulaması

SL=1				NSEL,S, , ,52178
! SL=1 AL +20				NSEL,A, , ,51203
! SL=2 AL -20				NSEL,A, , ,27467
! SL=3 ST +20				NSEL,A, , ,27497
! SL=4 ST -20				NSEL,A, , ,19967
				NSEL,A, , ,19877
*IF,SL,EQ,1,THEN	*ELSEIF,SL,EQ,2	*ELSEIF,SL,EQ,3	*ELSEIF,SL,EQ,4	PRNSOL,U,Z
				PRNSOL,U,Y
E=70E9	E=70E9	E=210E9	E=210E9	PRNSOL,U,X
PO=0.33	PO=0.33	PO=0.3	PO=0.3	NLIST,ALL
ALP=22.2E-6	ALP=22.2E-6	ALP=13E-6	ALP=13E-6	SAVE=1
TMP=20	TMP=-20	TMP=20	TMP=-20	

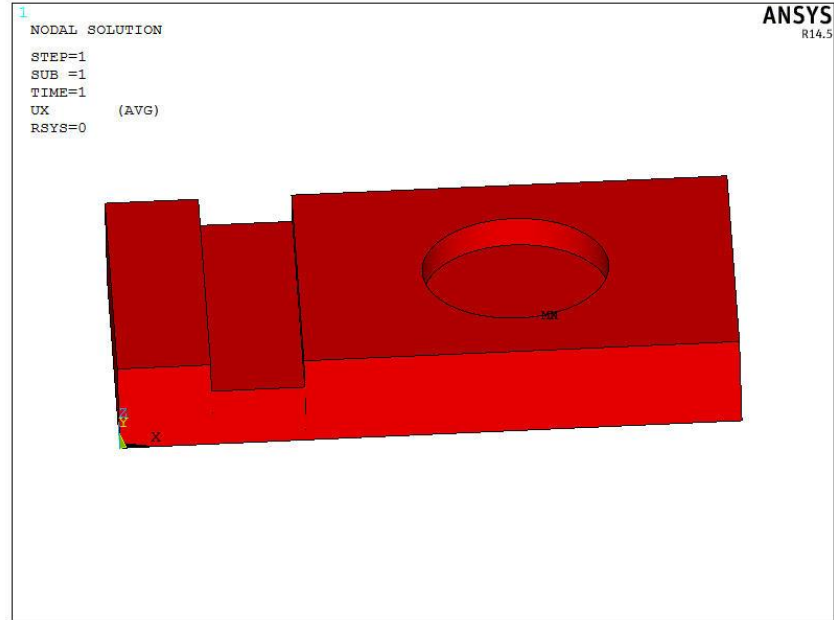
Tablo 2.1’de görülen makro uygulaması ile Al7075 ve St4140 malzemelerin ideal sıcaklığın altındaki ve üstündeki değerlerdeki termal analizleri pratik bir şekilde yapılabilmektedir. Yapılması gereken, analiz edilecek malzeme için Makro Uygulamasının TMP kısmına sıcaklık değerinin girilerek Ansys programının çalıştırılmasıdır. Burada E, Elastiklik modülü, PO poisson oranı, ALP ısı neşretme katsayısıdır. NSEL komutu ile istenilen nodların (düğüm noktalarının) istenilen koordinattaki yer değiştirme değerleri elde edilebilir. SAVE kısmına “1” değeri yazıldığında analiz sonuçları sonrası elde edilen katı model dosyası(.igs formatında) oluşturulur. “0” yazıldığında ise bu dosya oluşturulmaz.

Geliştirilen makro uygulaması ile istenilen farklı sıcaklık değerleri ve malzeme türleri için işlem kalabalığı ortadan kaldırılarak SEM analizleri yapılmıştır.

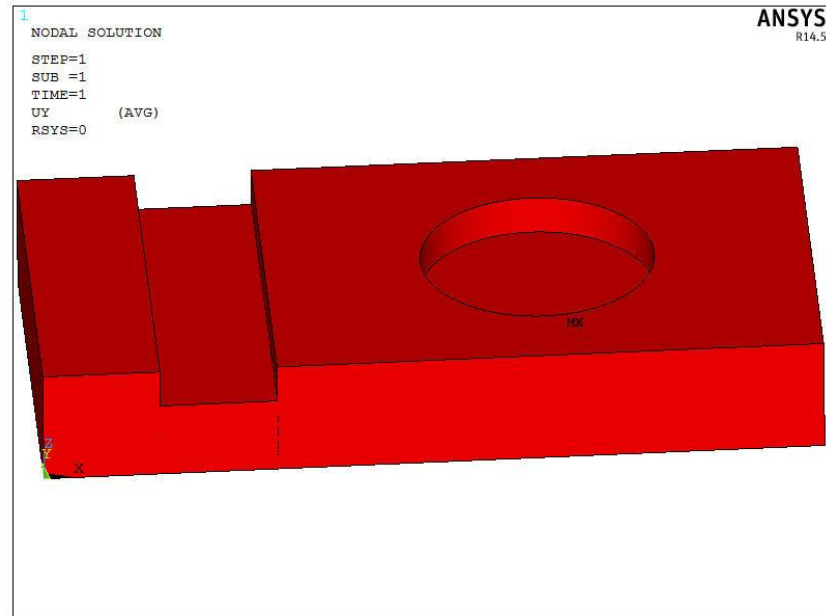
2.4. ANSYS Analizleri

2.4.1. Al 7075 Malzeme Analizleri

2.4.1.1. Al 7075 İdeal Sıcaklık (22°C) Analizleri



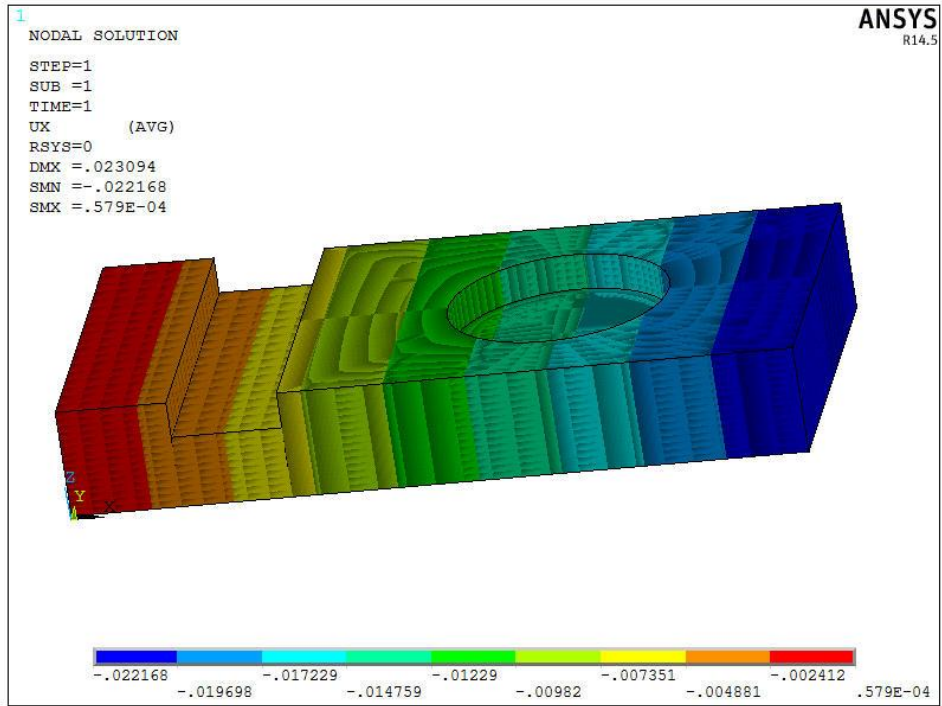
Şekil 2.4. Al7075 İdeal Sıcaklık X Doğrultusu Deformasyonu



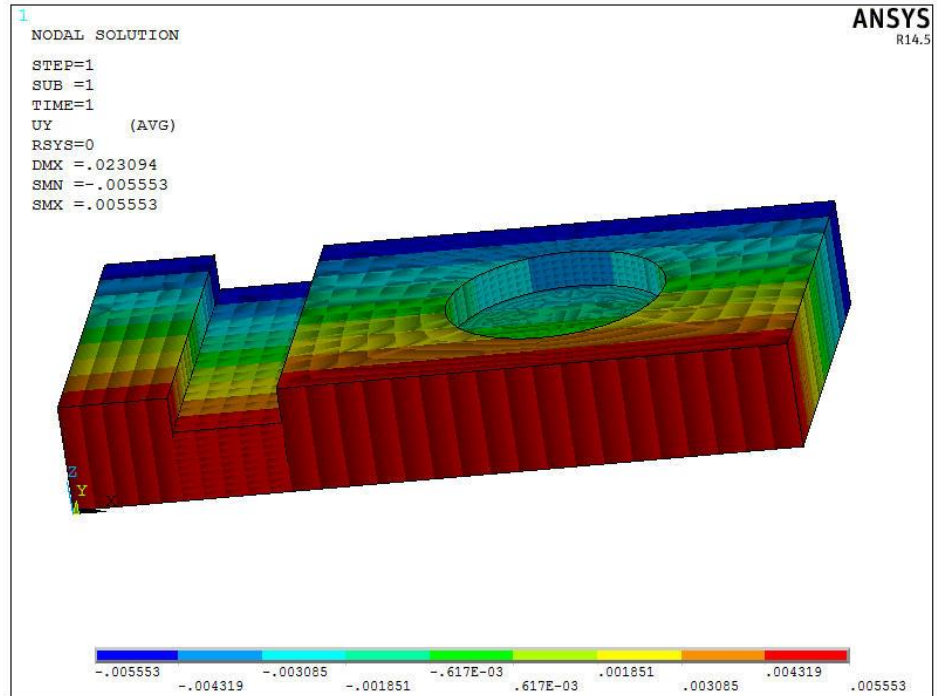
Şekil 2.5. Al7075 İdeal Sıcaklık Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.'te görüldüğü gibi Al7075 malzeme için ideal sıcaklıkta X ve Y doğrultusunda herhangi bir yer değiştirme olmamıştır.

2.4.1.2. Al 7075 (17°C) Analizleri (-5°C fark)



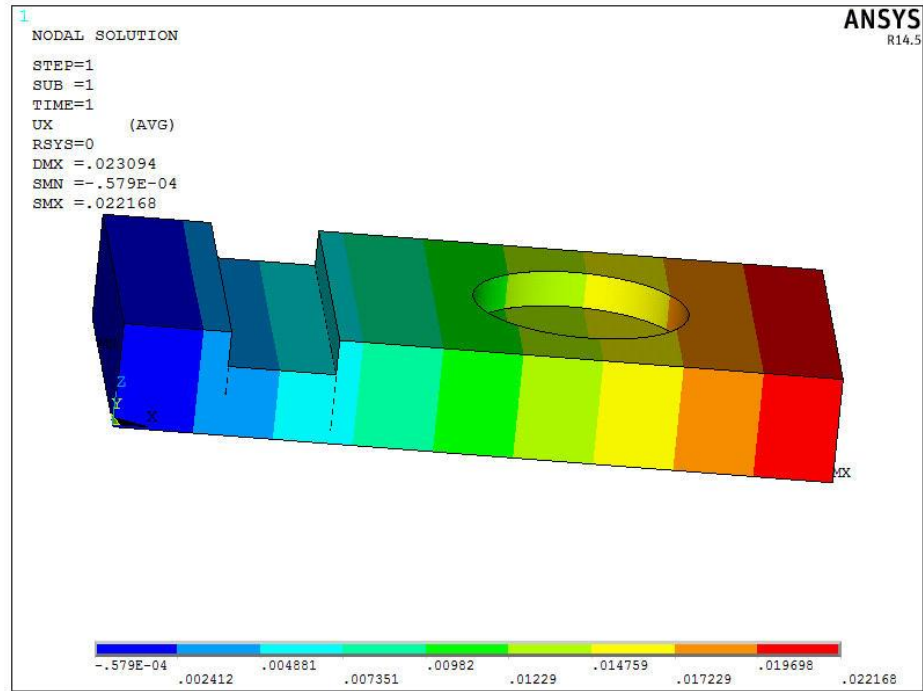
Şekil 2.6. Al7075 17°C X Doğrultusu Deformasyonu



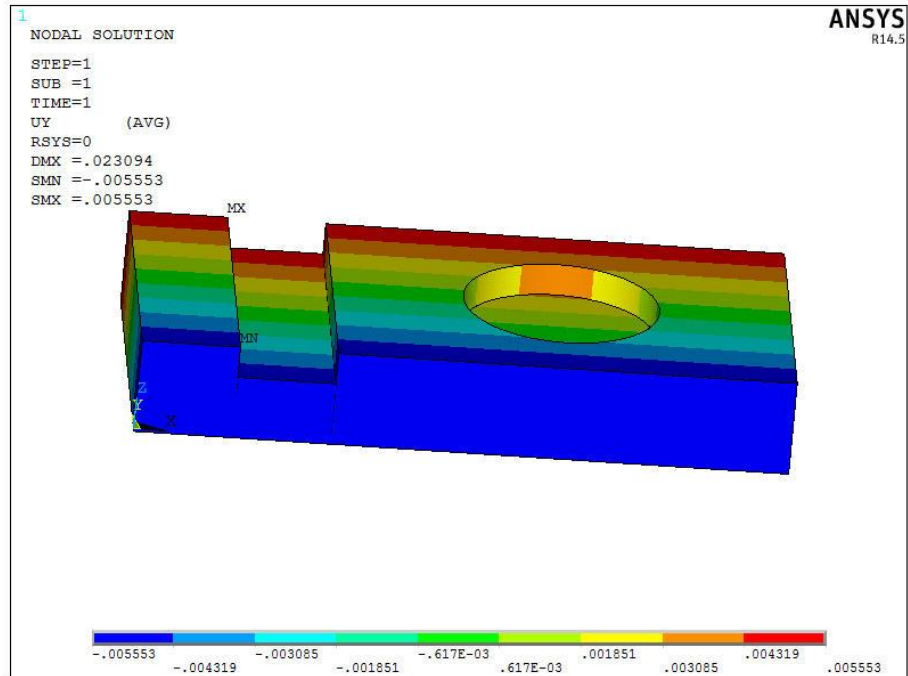
Şekil 2.7. Al7075 17°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.6. ve Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi Al7075 malzeme için 17°C'de X doğrultusunda -22,2 μm ve Y doğrultusunda -11 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.1.3. Al 7075 (27°C) Analizleri (5 °C fark)



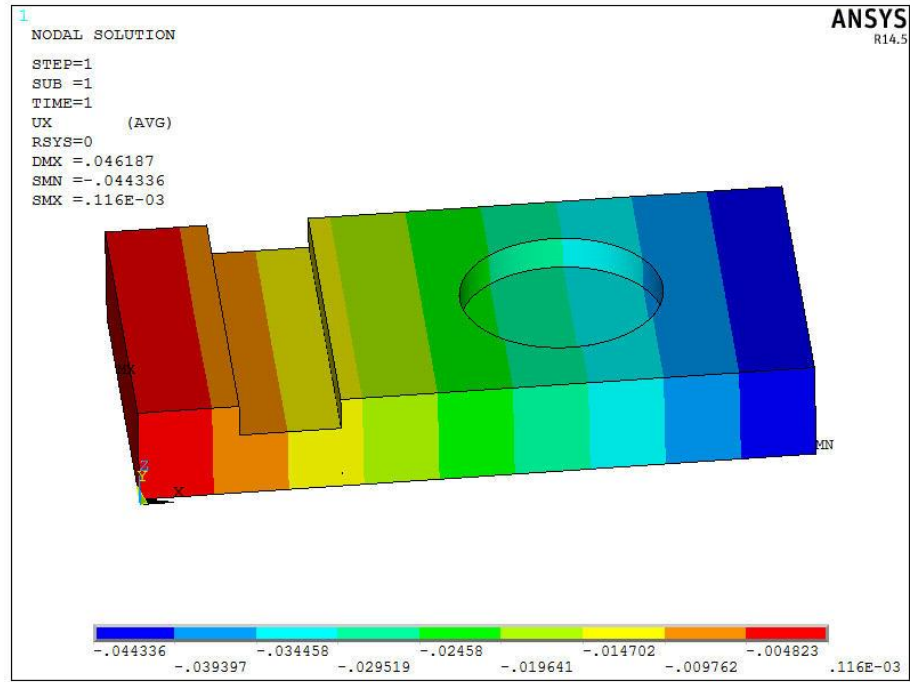
Şekil 2.8. Al7075 27°C X Doğrultusu Deformasyonu



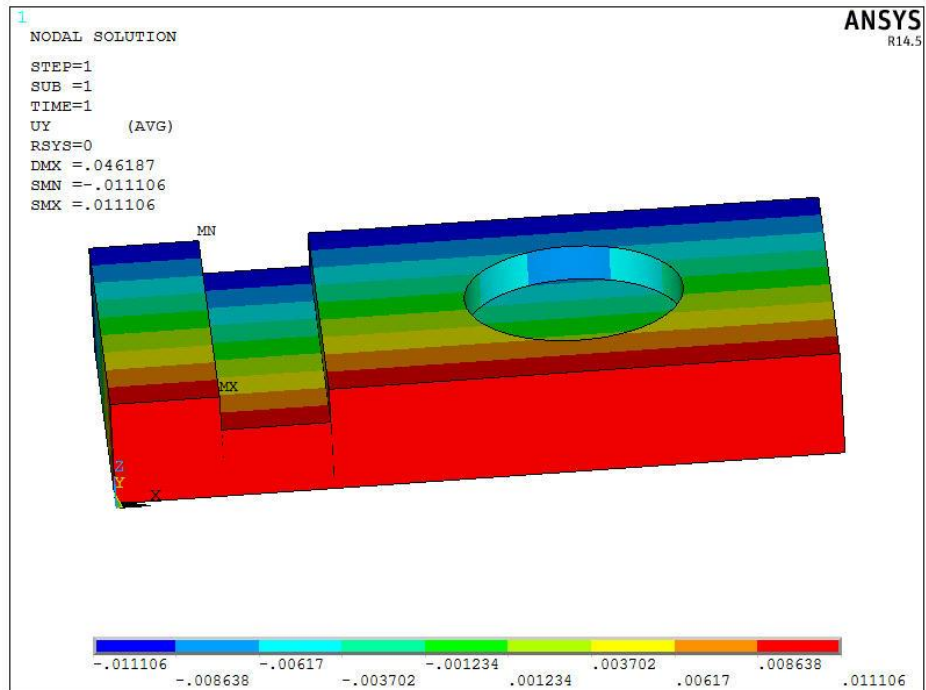
Şekil 2.9. Al7075 27°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.8. ve Şekil 2.9.'da görüldüğü gibi Al7075 malzeme için 27°C'de X doğrultusunda 22.2 μm ve Y doğrultusunda 11.1 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.1.4. Al 7075 (12°C) Analizleri (-10 °C fark)



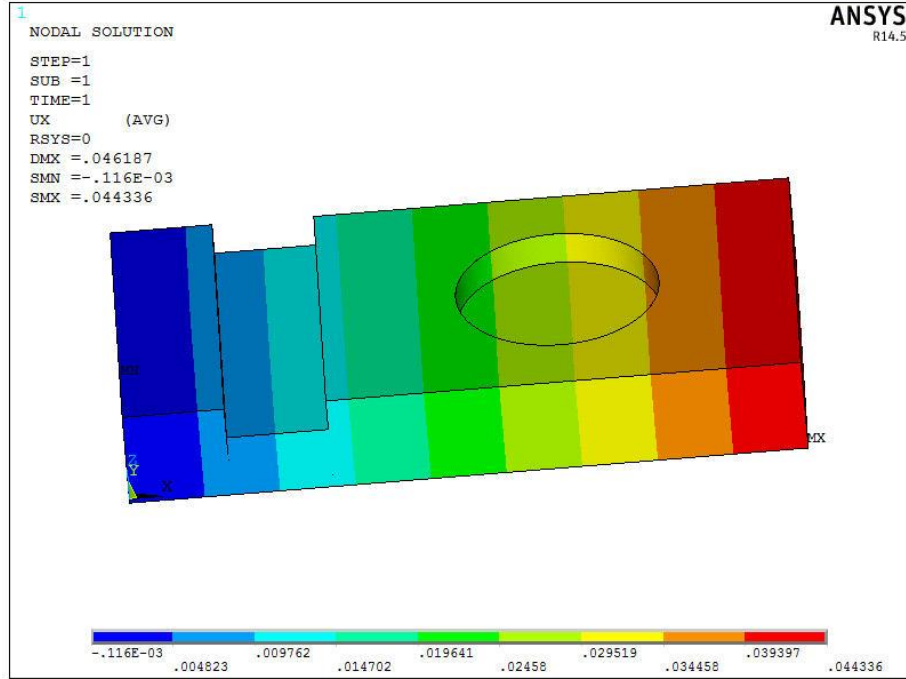
Şekil 2.10. Al7075 12°C X Doğrultusu Deformasyonu



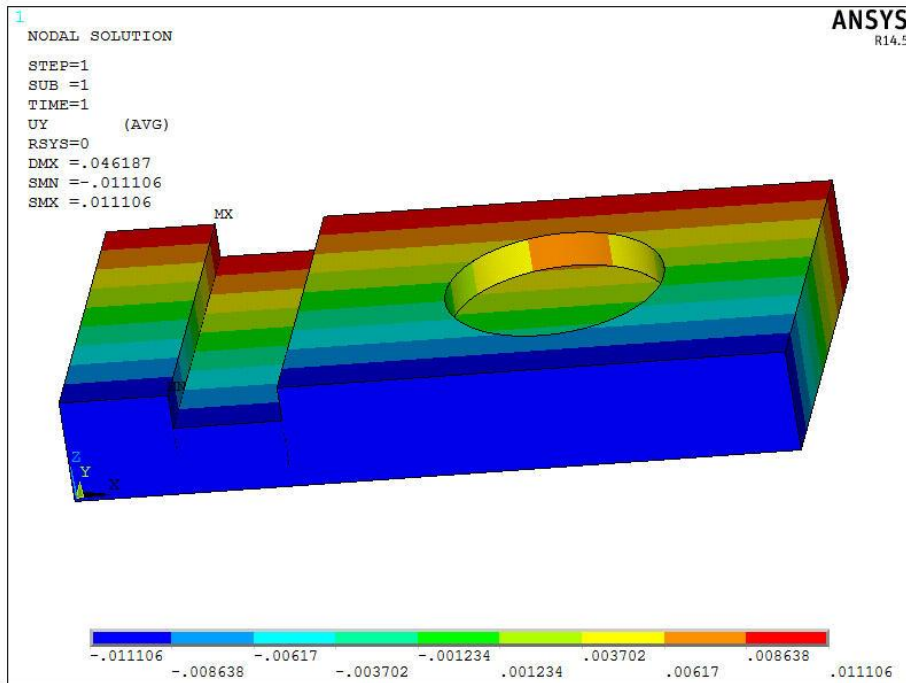
Şekil 2.11. Al7075 12°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.10. ve Şekil 2.11.'de görüldüğü gibi Al7075 malzeme için 12°C'de X doğrultusunda -44.3 μm ve Y doğrultusunda -22.2 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.1.5. Al 7075 (32°C) Analizleri (10 °C fark)



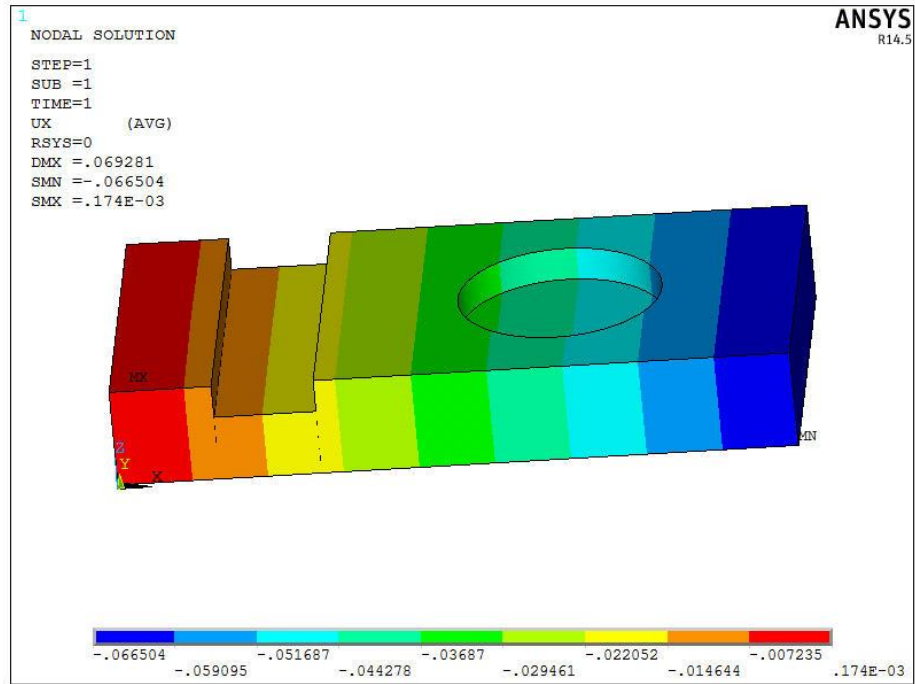
Şekil 2.12. Al7075 32°C X Doğrultusu Deformasyonu



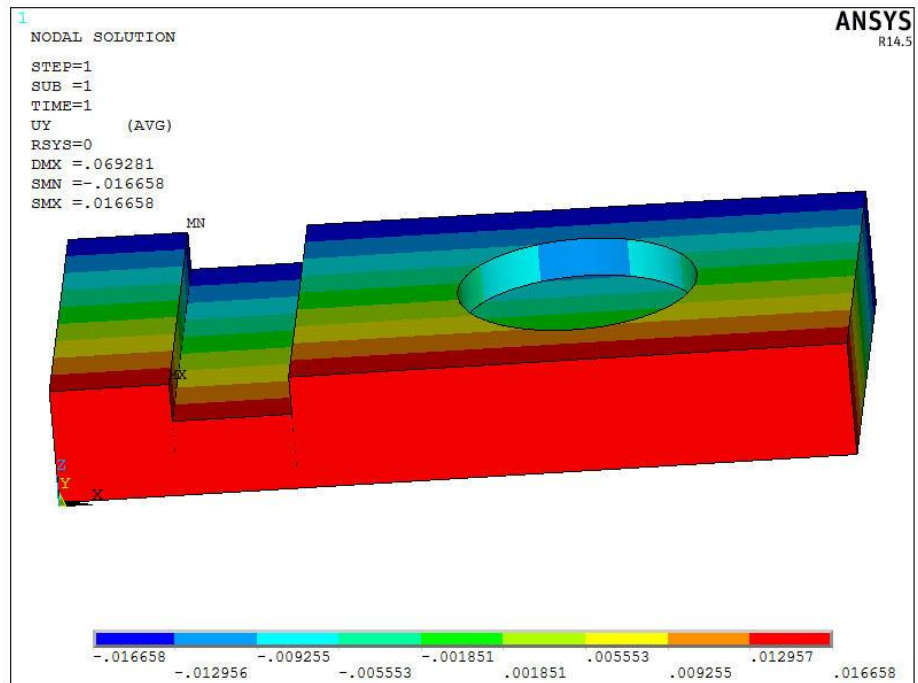
Şekil 2.13. Al7075 32°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.12. ve Şekil 2.13.'de görüldüğü gibi Al7075 malzeme için 32°C'de X doğrultusunda 44,3 μm ve Y doğrultusunda 22,2 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.1.6. Al 7075 (7°C) Analizleri (-15 °C fark)



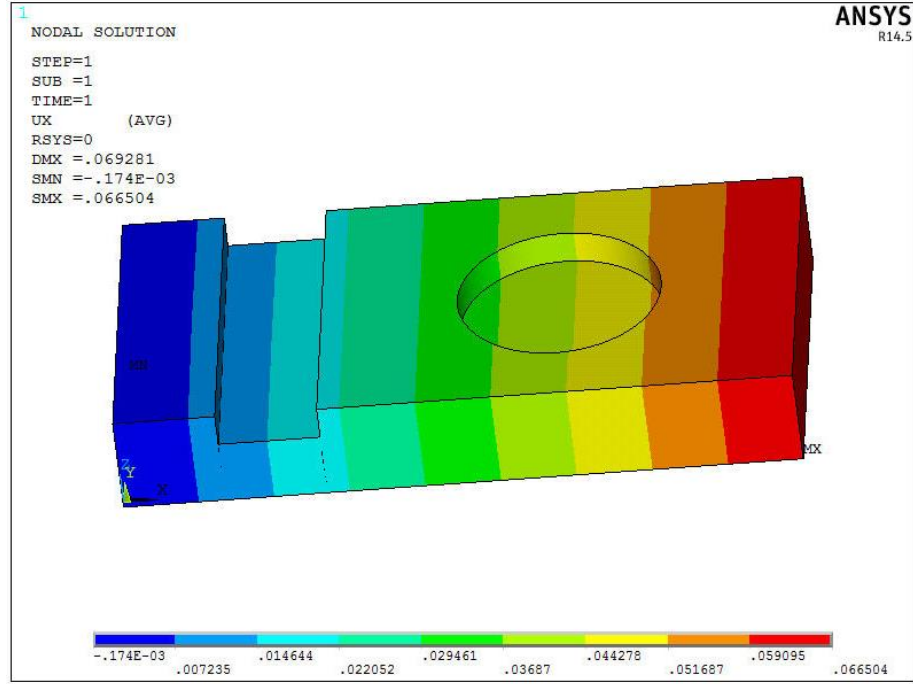
Şekil 2.14. Al7075 7°C X Doğrultusu Deformasyonu



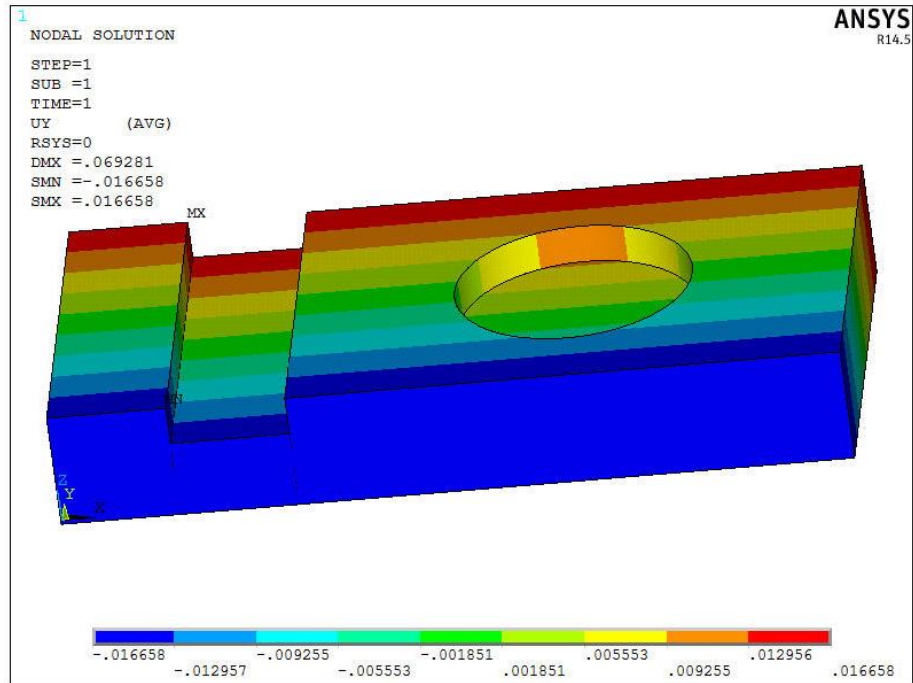
Şekil 2.15. Al7075 7°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.14. ve Şekil 2.15.'te görüldüğü gibi Al7075 malzeme için 7°C'de X doğrultusunda -66.5 μm ve Y doğrultusunda -33.3 μm 'lık bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.1.7. Al 7075 (37°C) Analizleri (15 °C fark)



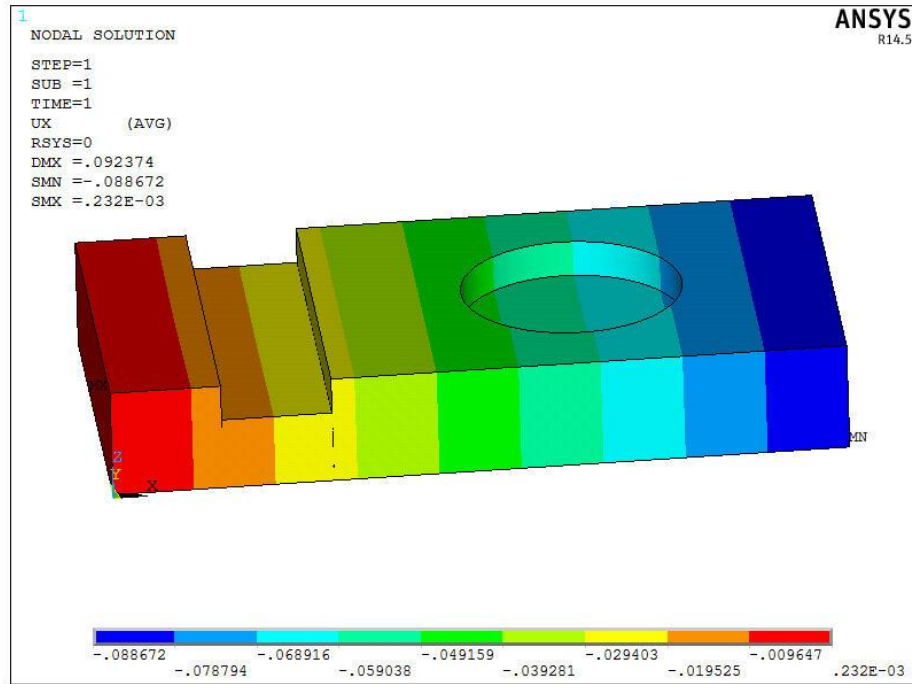
Şekil 2.16. Al7075 37°C X Doğrultusu Deformasyonu



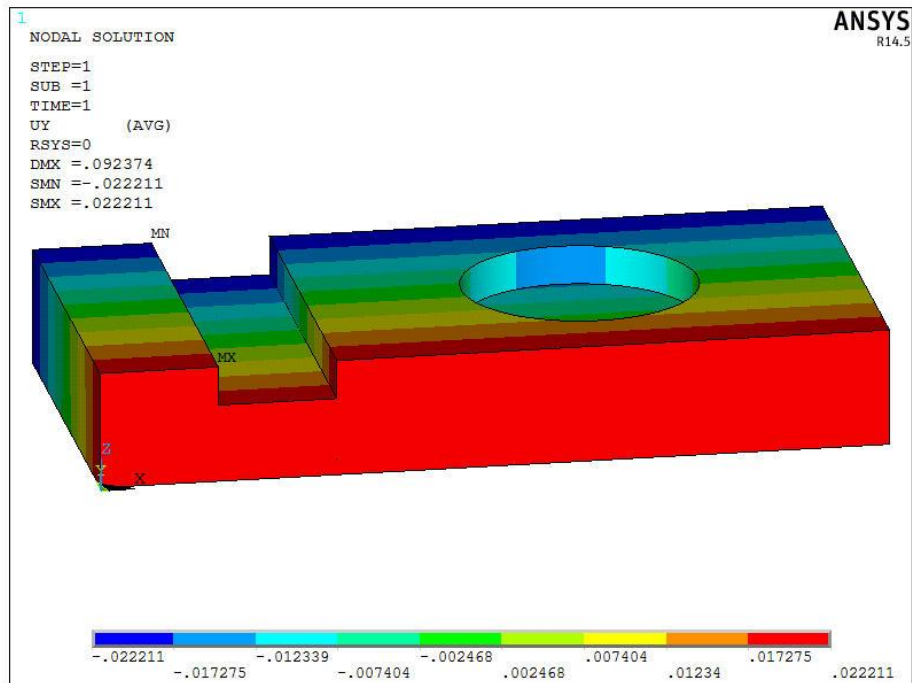
Şekil 2.17. Al7075 37°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.16. ve Şekil 2.17.'de görüldüğü gibi Al7075 malzeme için 37°C'de X doğrultusunda 66.5 μm ve Y doğrultusunda 33.3 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.1.8. Al 7075 (2°C) Analizleri (-20 °C fark)



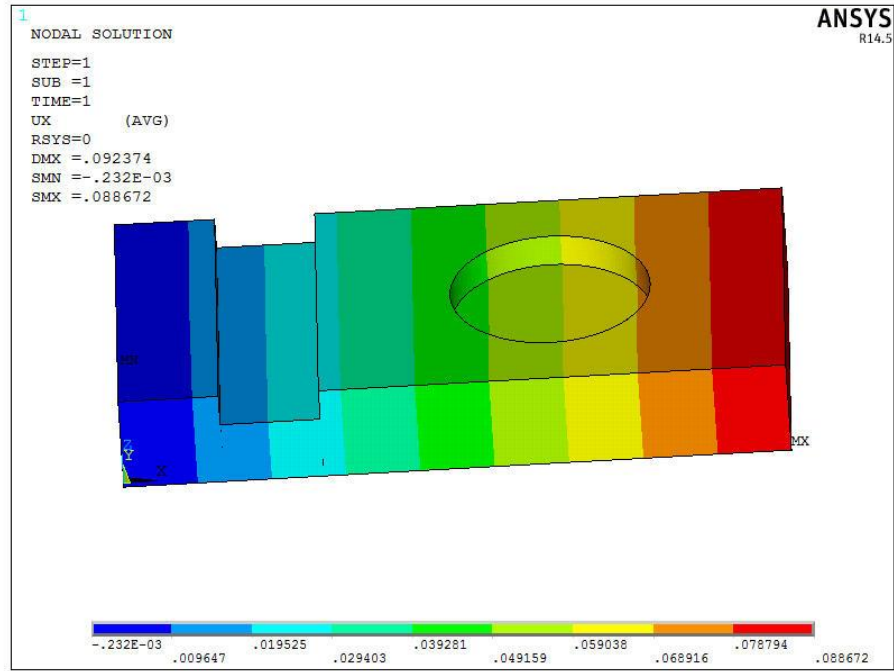
Şekil 2.18. Al7075 2°C X Doğrultusu Deformasyonu



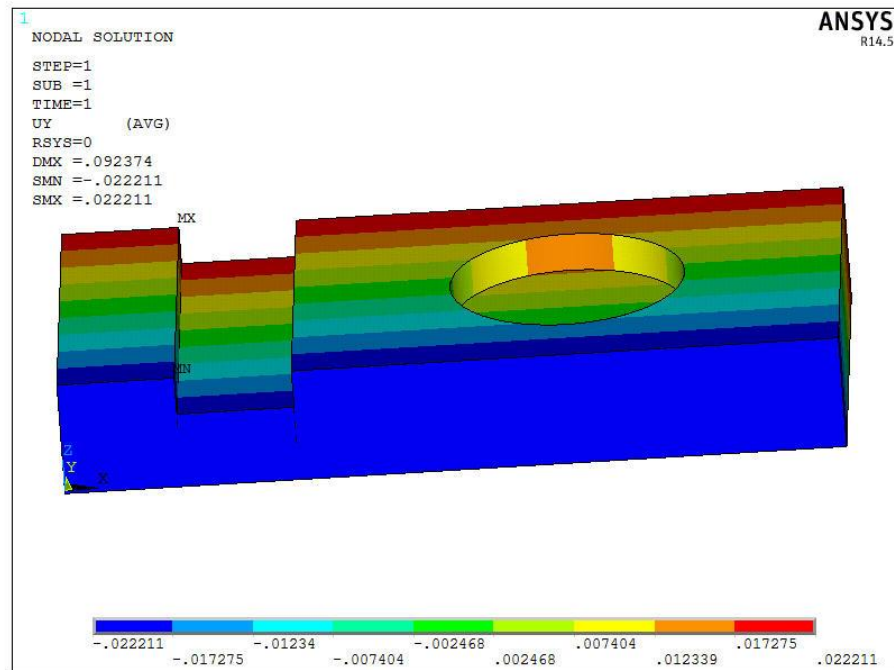
Şekil 2.19. Al7075 2°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.18. ve Şekil 2.19.'da görüldüğü gibi Al7075 malzeme için 2°C'de X doğrultusunda -88.7 μm ve Y doğrultusunda -44.4 μm 'lık bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.1.9. Al 7075 (42°C) Analizleri (20 °C fark)



Şekil 2.20. Al7075 42°C X Doğrultusu Deformasyonu

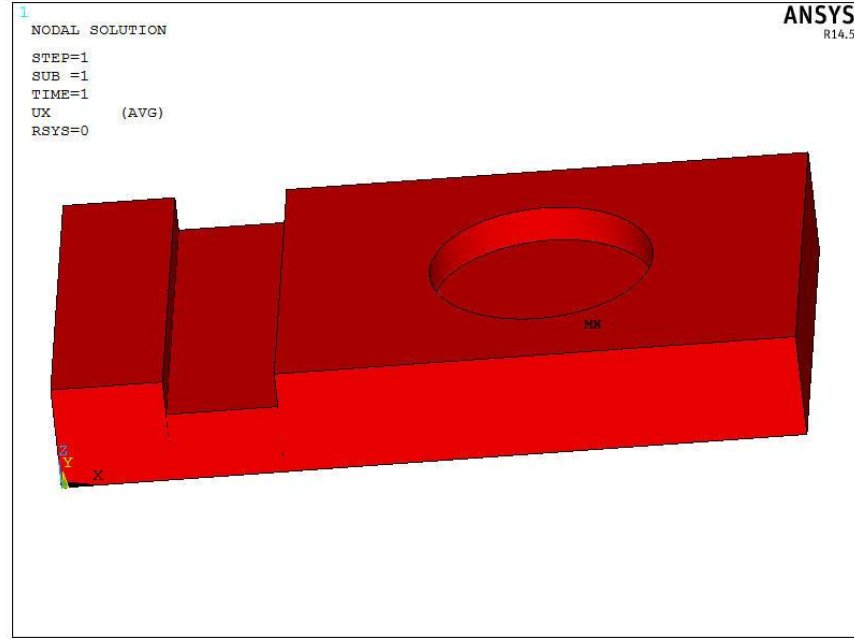


Şekil 2.21. Al7075 42°C Y Doğrultusu Deformasyonu

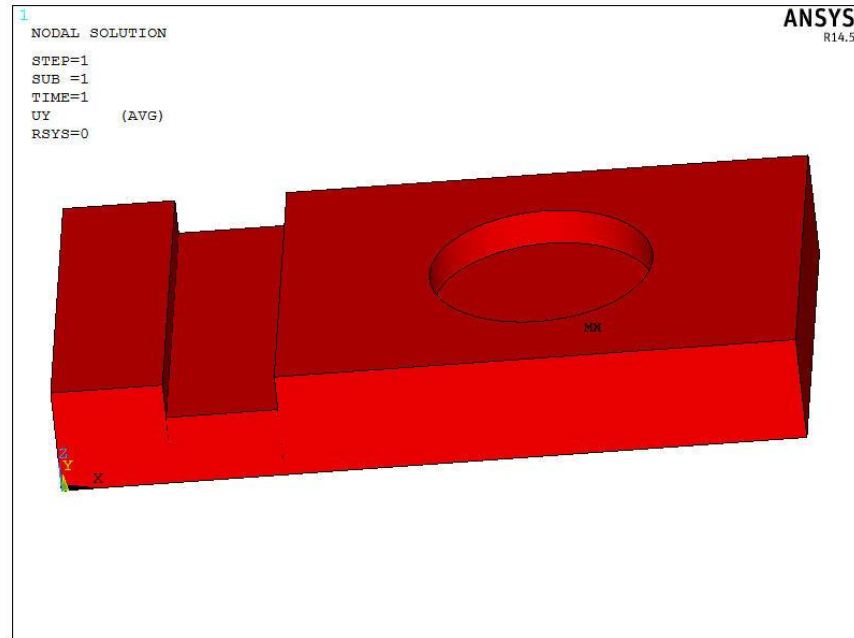
Şekil 2.20. ve Şekil 2.21.'de görüldüğü gibi Al7075 malzeme için 42°C'de X doğrultusunda 88.7 μm ve Y doğrultusunda 44.4 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.2. St 4140 Malzeme Analizleri

2.4.2.1. St4140 İdeal Sıcaklık (22°C) Analizleri



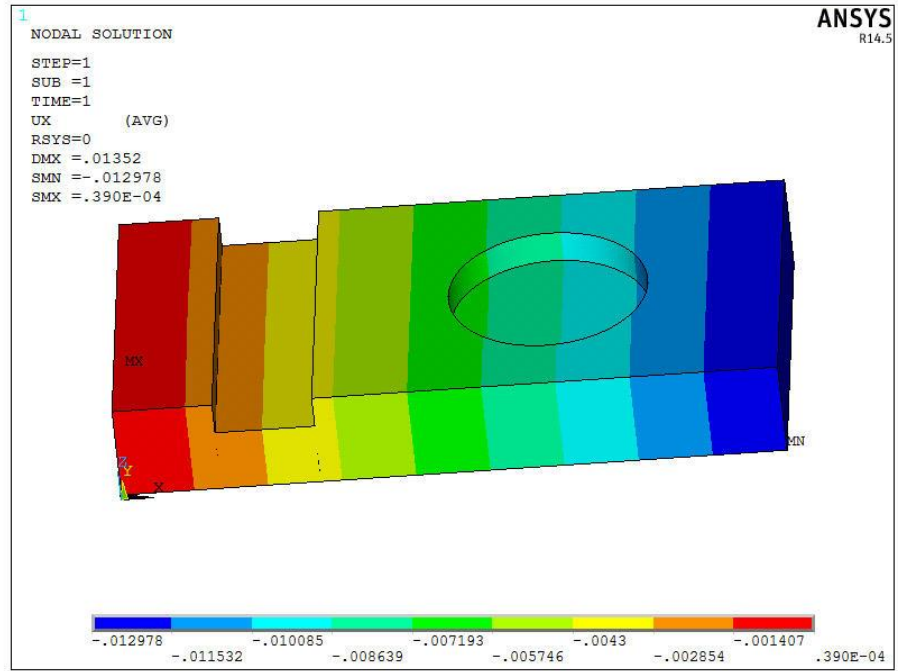
Şekil 2.22. St4140 22°C X Doğrultusu Deformasyonu



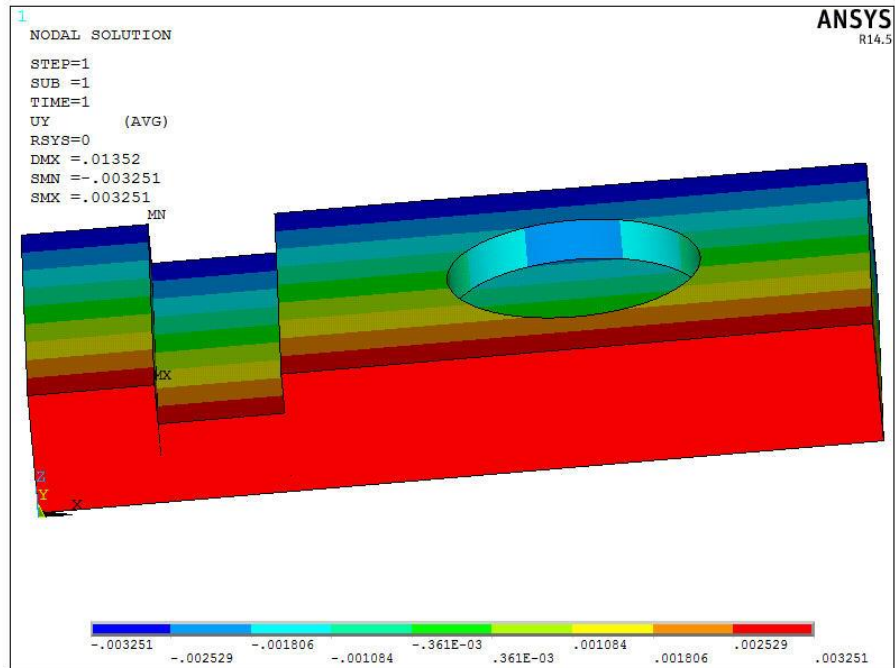
Şekil 2.23. St4140 22°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.22. ve Şekil 2.23.'te görüldüğü gibi St4140 malzeme için ideal sıcaklıkta X ve Y doğrultusunda herhangi bir yer değiştirme olmamıştır.

2.4.2.2. St4140 (17°C) Analizleri (-5 °C fark)



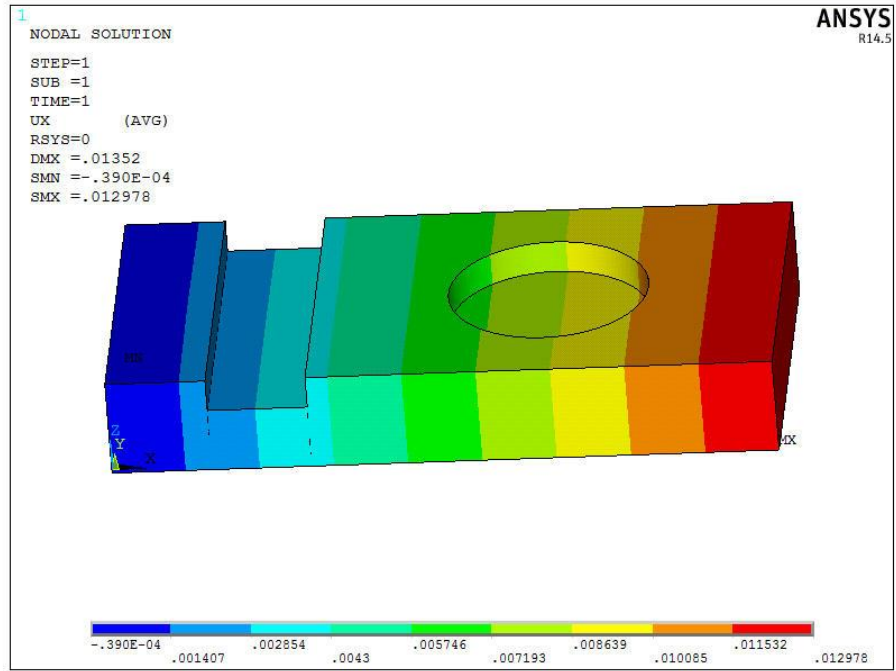
Şekil 2.24. St4140 17°C X Doğrultusu Deformasyonu



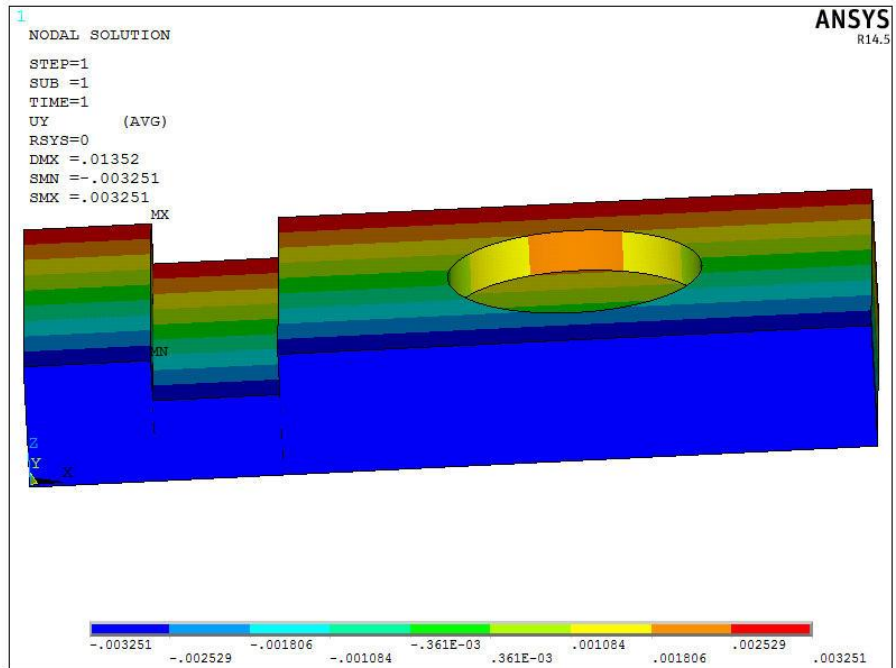
Şekil 2.25. St4140 17°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.24. ve Şekil 2.25.'de görüldüğü gibi St4140 malzeme için 17°C'de X doğrultusunda -13 µm ve Y doğrultusunda -6.5 µm'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.2.3. St4140 (27°C) Analizleri (5 °C fark)



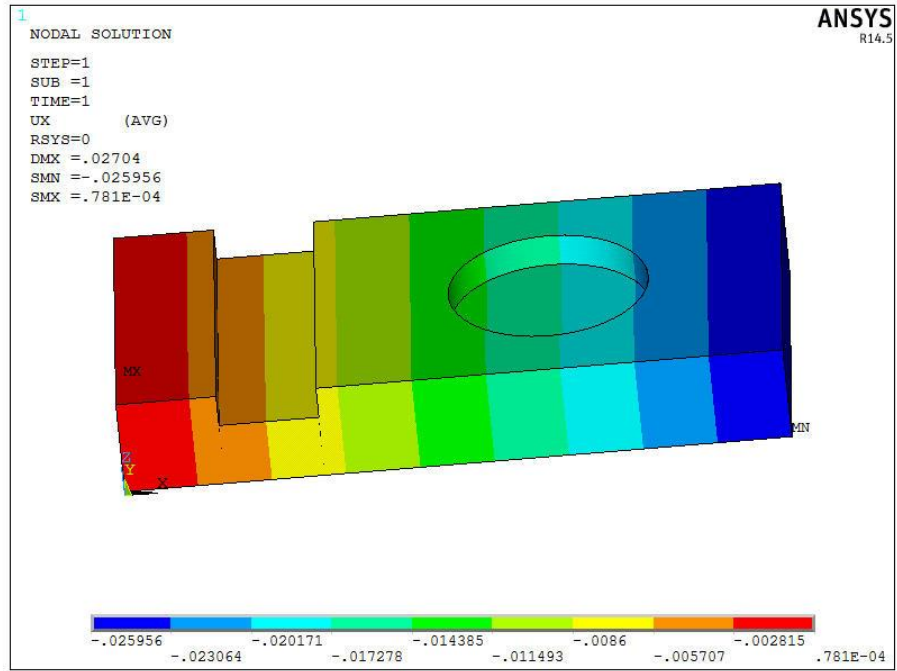
Şekil 2.26. St4140 27°C X Doğrultusu Deformasyonu



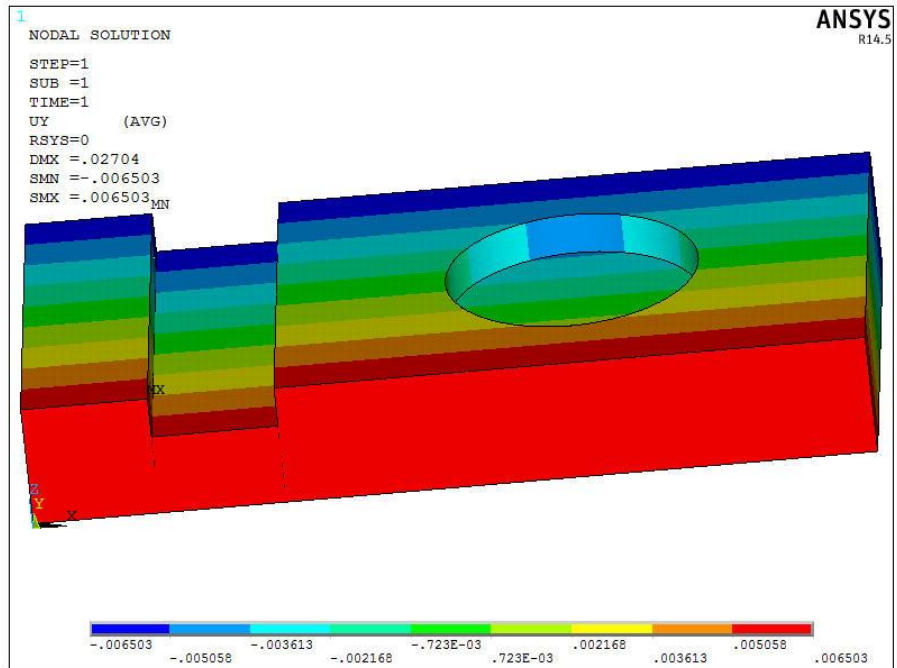
Şekil 2.27. St4140 27°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.26. ve Şekil 2.27.'de görüldüğü gibi St4140 malzeme için 27°C'de X doğrultusunda 13 µm ve Y doğrultusunda 6.5 µm'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.2.4. St4140 (12°C) Analizleri (-10 °C fark)



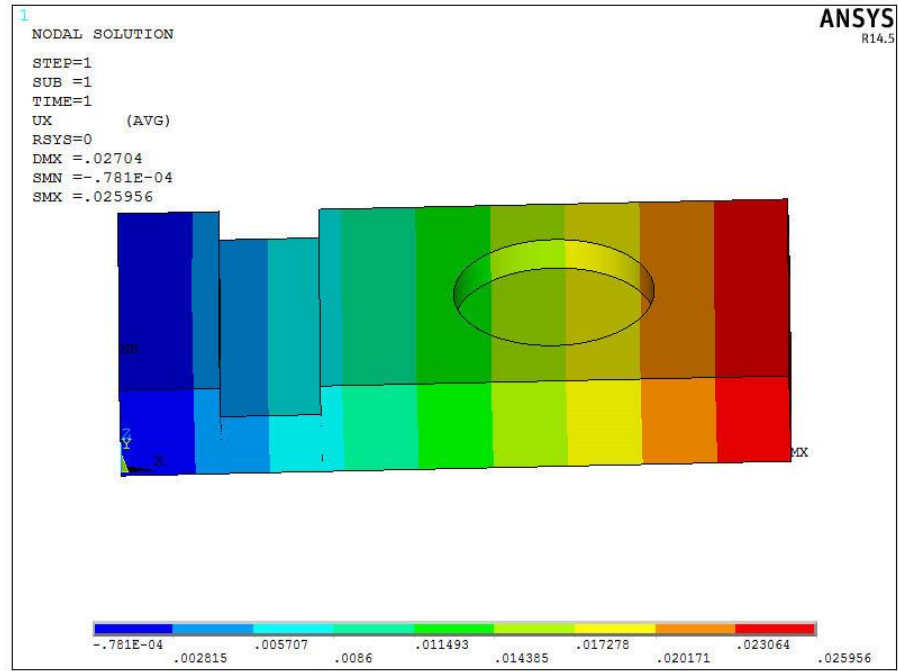
Şekil 2.28. St4140 12°C X Doğrultusu Deformasyonu



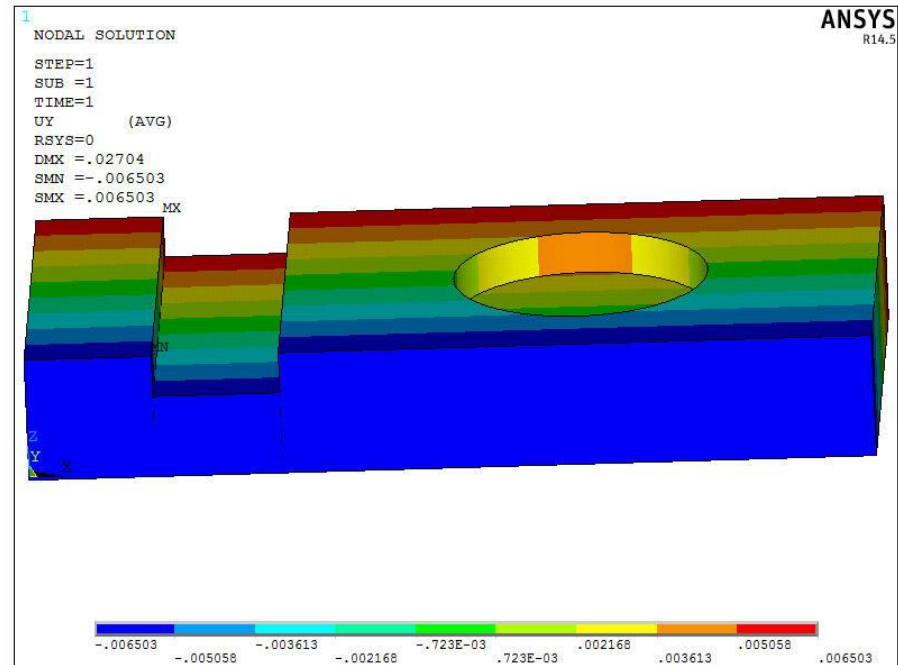
Şekil 2.29. St4140 12°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.28. ve Şekil 2.29.'da görüldüğü gibi St4140 malzeme için 12°C'de X doğrultusunda -26 μm ve Y doğrultusunda -13 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.2.5. St4140 (32°C) Analizleri (10 °C fark)



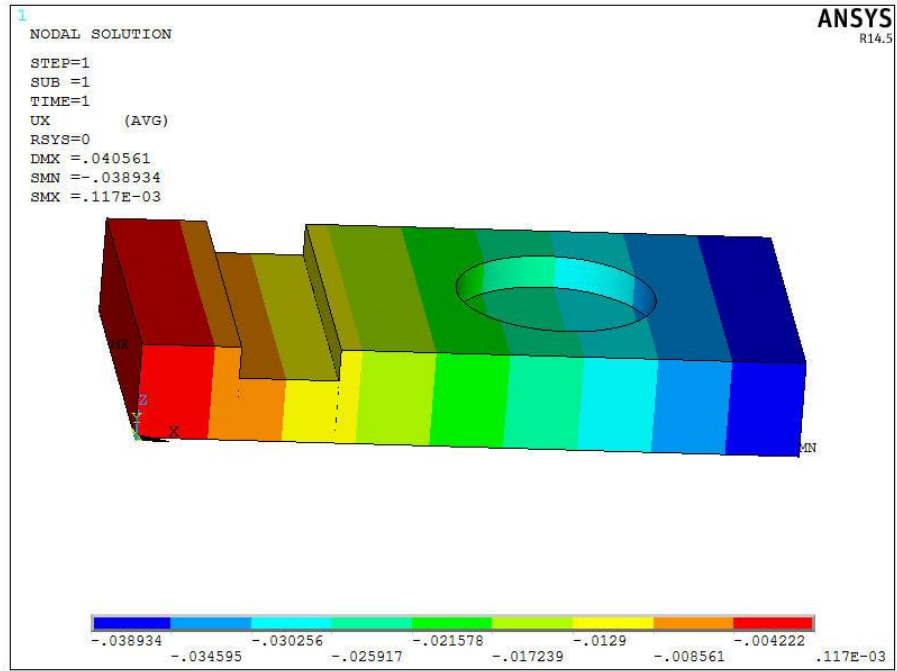
Şekil 2.30. St4140 32°C X Doğrultusu Deformasyonu



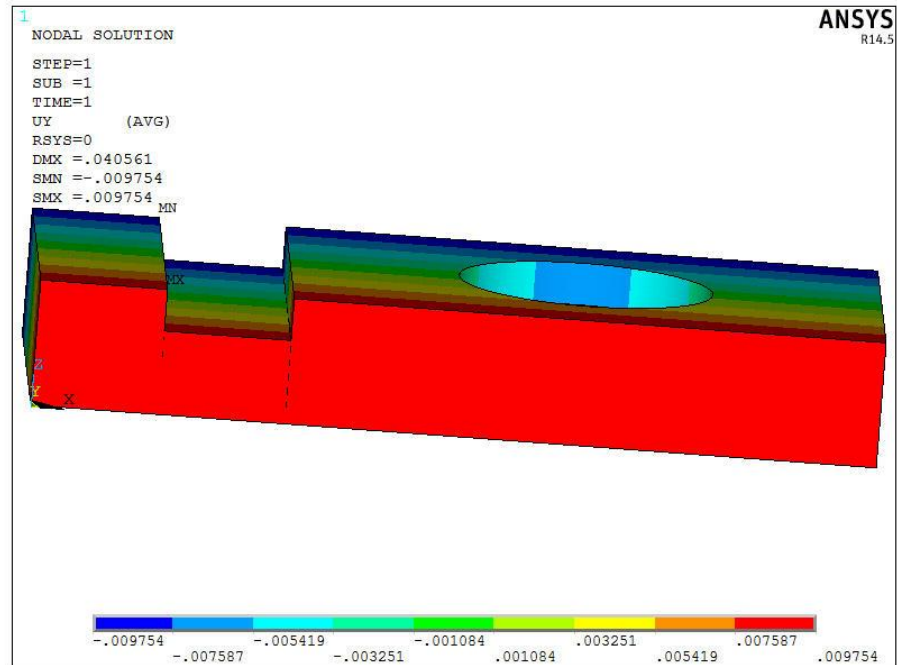
Şekil 2.31. St4140 32°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.30. ve Şekil 2.31.'de görüldüğü gibi St4140 malzeme için 32°C'de X doğrultusunda 26 μm ve Y doğrultusunda 13 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.2.6. St4140 (7°C) Analizleri (-15 °C fark)



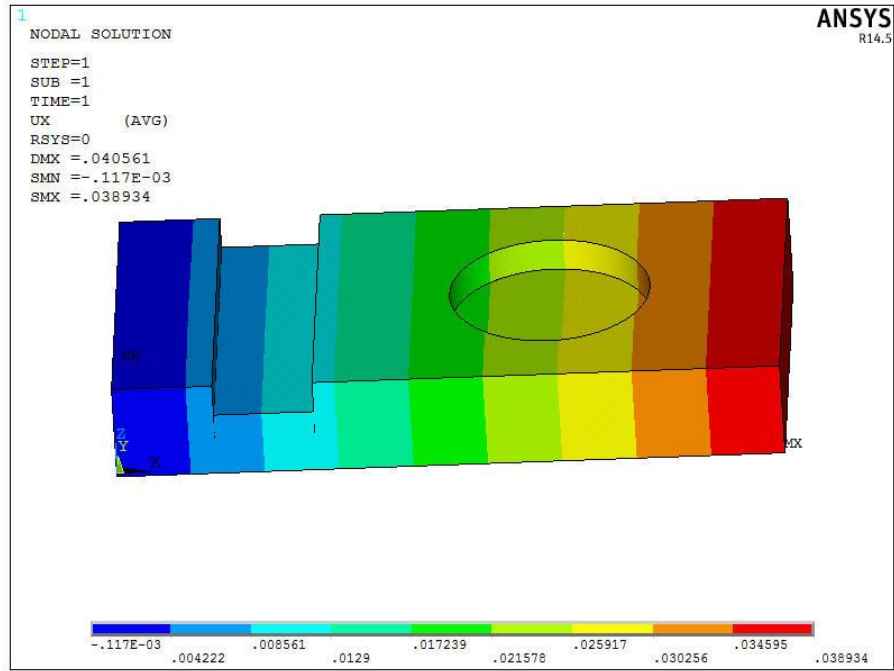
Şekil 2.32. St4140 7°C X Doğrultusu Deformasyonu



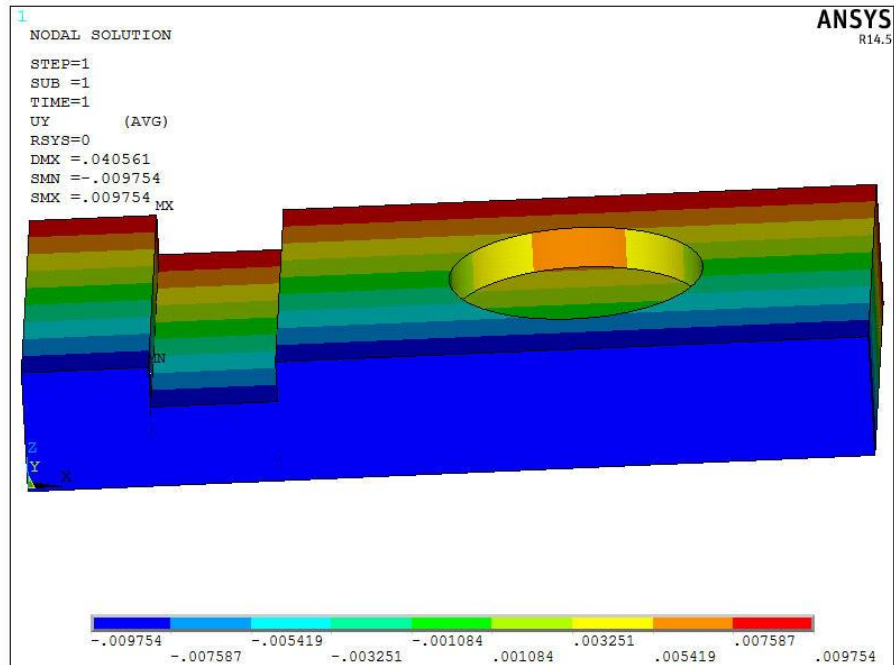
Şekil 2.33. St4140 7°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.32. ve Şekil 2.23.'de görüldüğü gibi St4140 malzeme için 7°C'de X doğrultusunda -38.9 μm ve Y doğrultusunda -19.5 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.2.7. St4140 (37°C) Analizleri (15 °C fark)



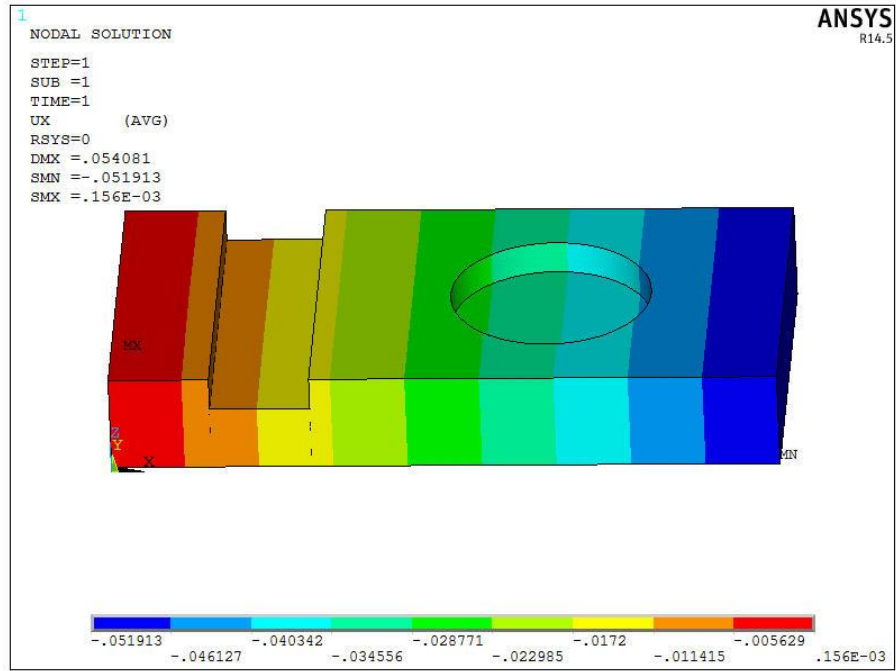
Şekil 2.34. St4140 37°C X Doğrultusu Deformasyonu



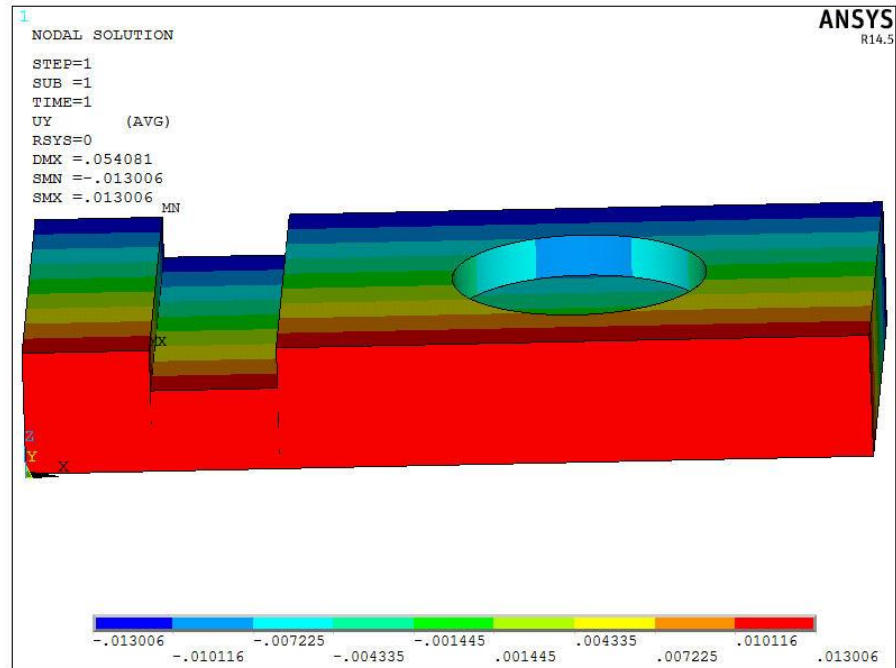
Şekil 2.35. St4140 37°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.34. ve Şekil 2.35.'te görüldüğü gibi St4140 malzeme için 37°C'de X doğrultusunda 38.9 μm ve Y doğrultusunda 19.5 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.2.8. St4140 (2°C) Analizleri (-20 °C fark)



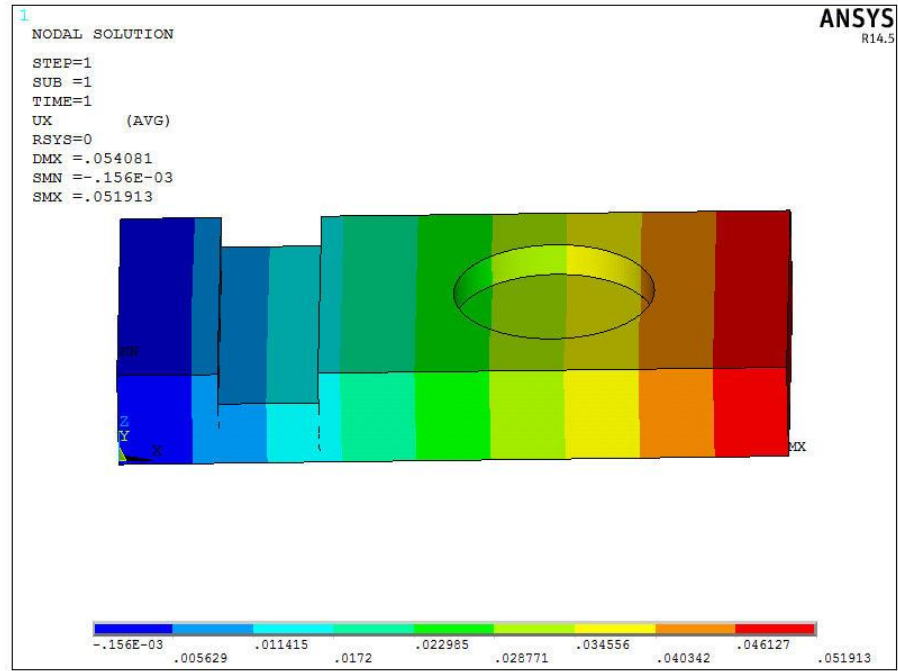
Şekil 2.36. St4140 2°C X Doğrultusu Deformasyonu



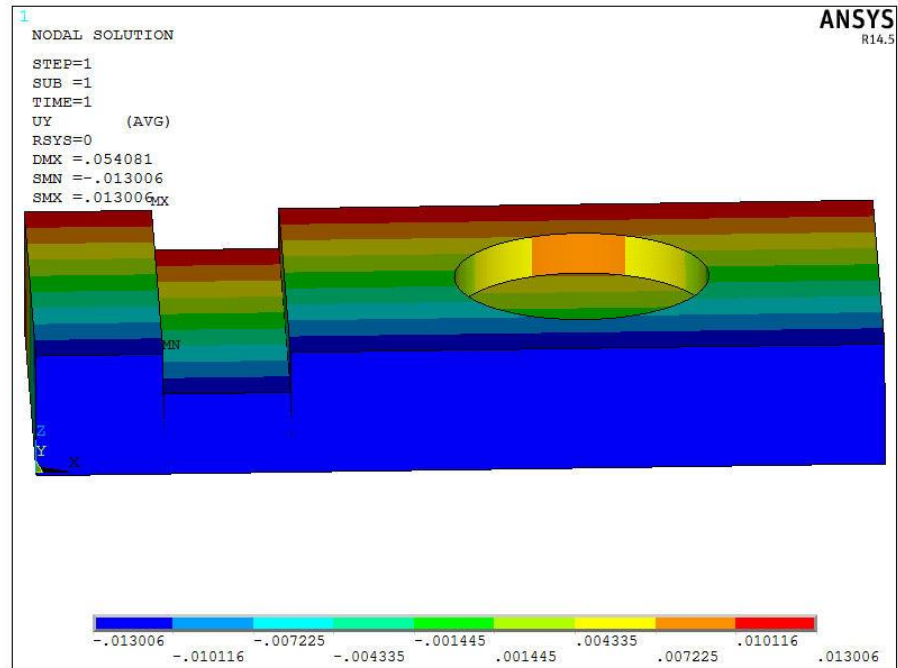
Şekil 2.37. St4140 2°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.36. ve Şekil 2.37.'te görüldüğü gibi St4140 malzeme için 2°C'de X doğrultusunda -52 μm ve Y doğrultusunda -26 μm 'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.4.2.9. St4140 (42°C) Analizleri (20 °C fark)



Şekil 2.38. St4140 42°C X Doğrultusu Deformasyonu



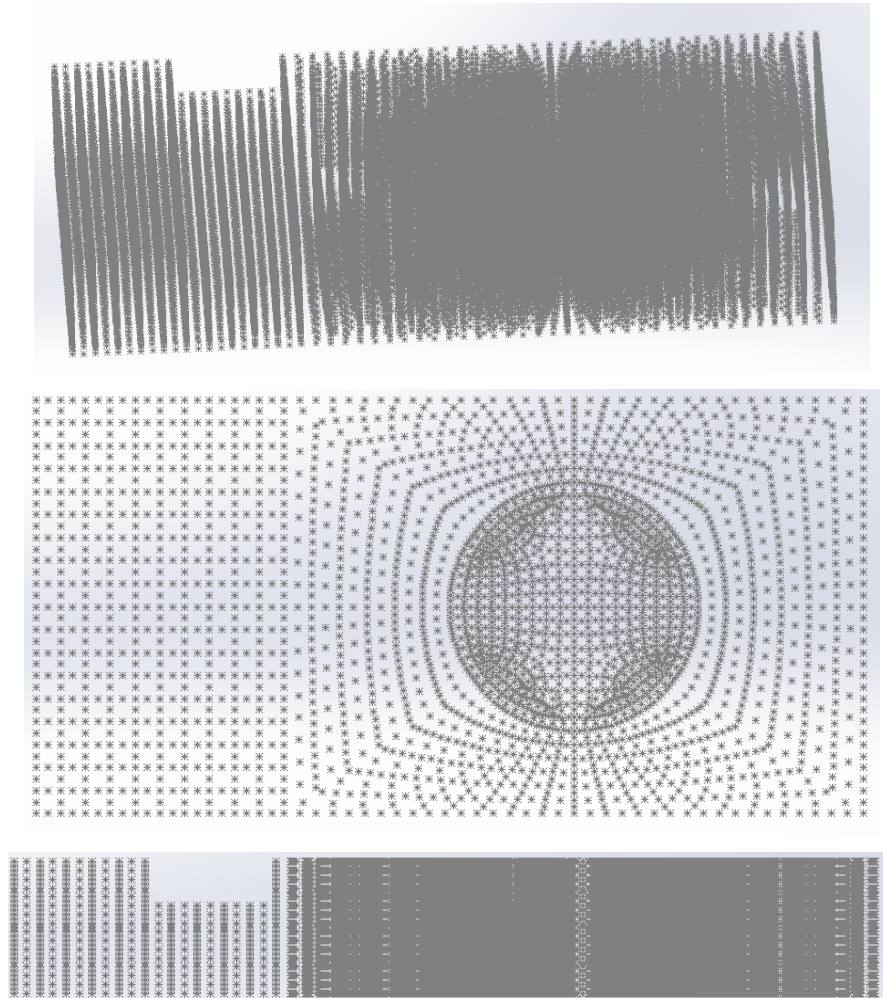
Şekil 2.39. St4140 42°C Y Doğrultusu Deformasyonu

Şekil 2.38. ve Şekil 2.39.'da görüldüğü gibi St4140 malzeme için 42°C'de X doğrultusunda 52 µm ve Y doğrultusunda 26 µm'lik bir yer değiştirme olmuştur.

2.5. Sonlu Eleman Analizinden Katı Modele Geçiş

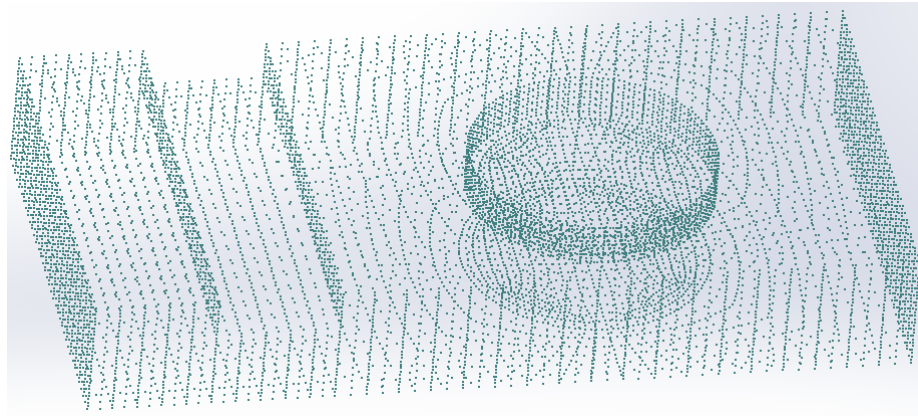
Ansys programında yapılan ısı analizler sonunda ısı etkisi ile deforme olmuş deney numunesi ısı genleşme/büzülme deformasyonu sonuçları Bölüm 2.4.'te gösterilmiştir. Bu aşamadan sonra yapılacak işlem sonlu eleman analizi sonuçlarını Cam kodlarını üretebilmek için katı ya da kabuk modele aktarmaktır. Bu kısım geliştirilen yöntemin en zor aşamasını oluşturmaktadır. Bunun sebebi yaygın olarak kullanılan analiz programlarından (Ansys, Abaqus vb.) hiçbir analiz sonucu olarak dwg, prt, sldprt gibi formatlarda çıktı verememektedir. Bu sorun Solidworks paket programı Scan to 3D ve Prep Mesh Withzard modülleri kullanılarak çözülmüştür.

Ansys programından elde edilen ısı analiz sonuçları ‘‘igs’’ formatında düğüm noktaları (nokta bulutu) şeklinde elde edilmiştir (Şekil 2.40).



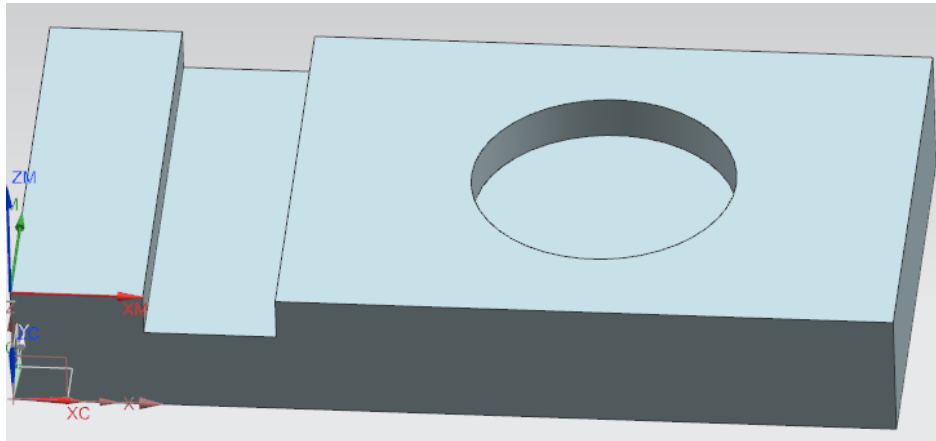
Şekil 2.40. igs formatındaki düğüm noktası ısı analiz çıktısı

Mikron mertebesinde yapılan hata indirgeme işlemi açısından katı modele geçiş yapılırken veri kaybının olmaması büyük önem arz etmektedir. Katı model programları düğüm noktalarını örerken, bir düğüm noktasını kendisine en yakın düğüm noktasıyla birleştirilerek kabuk oluşturmaktadır. Bu yöntem ise boyutsal hassasiyetin önemli olduğu çalışmalarda hatalı sonuçlar vermektedir. (tez çalışmasında konu ile ilgili birçok farklı programda denemeler yapılmış ama iyi bir sonuç alınamamıştır). Yapılan bu çalışmada bahsedilen sorun nokta bulutu kümesinin iç kısmı el ile boşaltılarak giderilmiştir (Şekil 2.41)



Şekil 2.41. Düğüm noktalarından kabuk nokta bulutu elde etme

Sonraki aşama da ise elde edilen kabuk nokta bulutu yüzeylerinden örme işlemi yaparak veri kaybı olmaksızın nihai katı model elde edilmiştir (Şekil 2.42). Bu nihai katı model üzerinde gerçekleştirilen CAM oturumu ile, parçayı tam boyutlarında işleyecek CNC parça programı elde edilmiştir.



Şekil 2.42. Talaşlı imalat yapmaya hazır model

3. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzeme ve Teçhizat

Deneysel çalışmada iş parçalarını işlemek için Fanuc O-M tipi kontrol üniteli Taksan TMC-500V model CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. (Şekil 3.1.)



Şekil 3.1. CNC Dik İşleme Merkezi

Kesici takım ve iş milinin yalpalama yapıp yapmadığı komperatör yardımıyla hassas bir şekilde ölçülmüştür (Şekil 3.2.). Hata miktarı fazlaysa farklı tutucu kullanılır yada kesici takım tekrar tutucuya bağlanır.

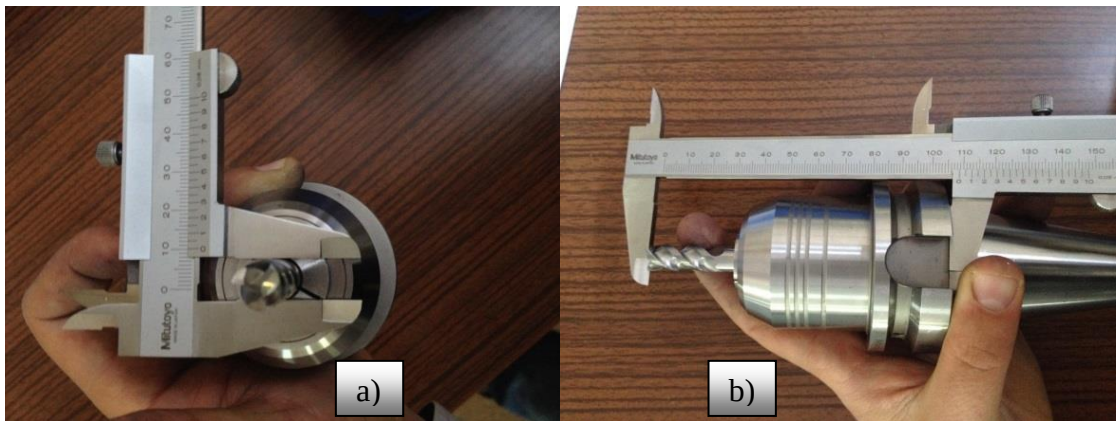
Deneysel çalışmanın verimliliğini artırabilmek için CNC dik işleme merkezi tablasına Renishaw TS27R model takım ölçme probu kurulmuş ve gerekli yazılımlar tezgâh

işletim sistemine yüklenmiştir. Takım lme programı (O7001) yardımıyla tezgâh magazininde bulunan herhangi bir takımın boyu ve çapı, istenilirse aynı anda ya da ayrı ayrı ölçülebilmektedir.

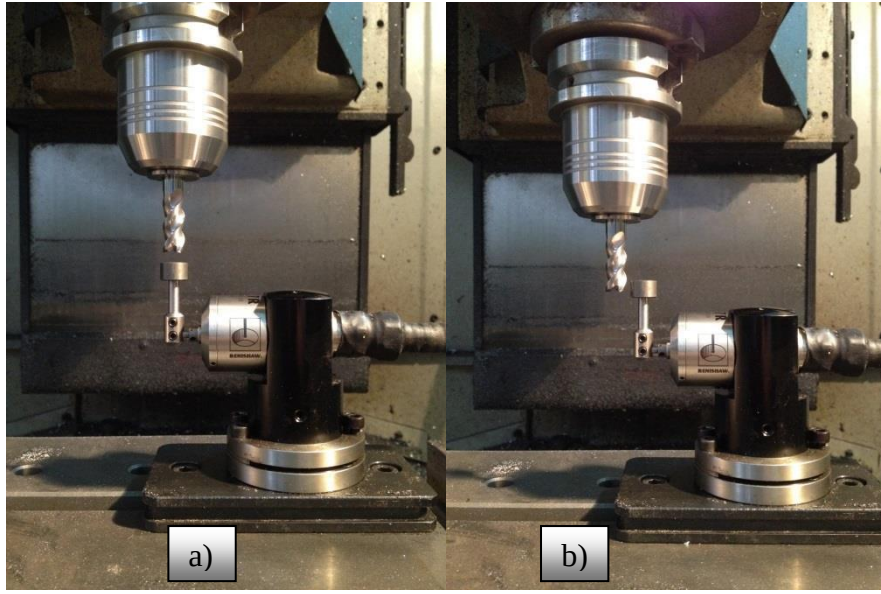


şekil 3.2. Komperatr yardımıyla takım-tutucu hassasiyetinin lm

Tüm takımların çap ve boy değerleri yapılan ön ölçüm (şekil 3.3.) ile tezgâhın ilgili birimine girilmiş ve sonra takım lme probu kullanılarak yüksek tamlıkta takım ölçümü (şekil 3.4.) yapılmıştır. Bu değerler numunelerin CNC parça programlarının CAM desteği ile üretilmesi sırasında kullanılmıştır (şekil 3.5.).



şekil 3.3. Takım lme Probu Ayarı İçin a)ap ve b)Boy lm



Şekil 3.4.Takım Ölçme Probu ile a)Takım Boy ve b)Çap Ölçümü

Bu çalışmada takım ölçme işlemi her takım için birkaç kez yapılmıştır. Buradaki amaç magazinden alınan takımın en az hata ile alındığı değeri yakalamaktır. Şekil 3.5.'deki listede 1-20'ye kadar olan değerler takım boyu değerleri, 21-40'a kadar olan değerler takım yarıçapı değerleridir. Takım ölçme probu ile yapılan ölçüm sonucunda 10mm çaplı takım için çap hatası değeri (5.002) dönme hareketinden dolayı 4µm dir.



Şekil 3.5.Takım Ölçme Probu ile Elde Edilen a)Takım Boy ve b)Çap Değerleri

Bu çalışmada iş parçası olarak kalıp endüstrisinde yaygın olarak kullanılan St4140 ve iyi yüzey kalitesi veren Al7075 malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelerin genel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Deney Numuneleri Malzeme Özellikleri

Malzeme	Al 7075	St4140
Yoğunluk	2.81 g/cm ³	7.85 g/cm ³
Akma Dayanımı	503 MPa	435 Mpa
Poison Oranı	0.33	0.29
Elastiklik Modülü	72 Gpa	210 GPa
Isıl Genleşme Katsayısı	22.2x10 ⁻⁶ /°C	13x10 ⁻⁶ /°C

Deney numunelerin kaba işleme için Ø 18mm iki ağızlı takma uçlu kesici takım kullanılmıştır.(Şekil 3.6.)



Şekil 3.6. Kaba İşleme İçin Kullanılan Kesici Takım

İnce işleme için Al7075 malzeme için takım-talaş yapışmasını ve talaş tahliyesini kolaylaştırmak için 3 ağızlı parmak freze (Şekil 3.7.) kullanılmıştır (ECA-B-3 10-22C10-72 Model).

İnce işlemede takım tutucu olarak dönme hatalarını en aza indirmek için Gewefa marka hidrolik takım tutucu (Şekil 3.7.) tercih edilmiştir. St4140 malzemeyi ince işlemede (Şekil 3.8.) Quanto marka TiAlN 16mm çapında kaplamalı parmak ferze kullanılmıştır.



Şekil 3.7. İnce İşleme İçin Kullanılan Kesici Takım ve Hidrolik Tutucu



Şekil 3.8. İnce İşleme İçin Kullanılan Kesici Takım

Deney numunelerini, ortam sıcaklığını ve takım tezgâhı tabla ve mengene sıcaklığını belirlenen sıcaklık değerlerinde hassas olarak ölçmek için yazılımında farklı malzemelere ait farklı ısı yayılımı (emissivity, ϵ) katsayıları bulunan Fluke marka 568 IR model kızıl ötesi sıcaklık ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.9.). İş parçası işlemede önce kaba işleme yan yüzeylerde 0.1 mm talaş bırakarak yapılmış, uygun sıcaklık değerleri yakalandıktan sonra bitirme işlemi yapılarak nihai parça Al7075 ve St4140 malzeme için elde edilmiştir.(Şekil 3.10.)



Şekil 3.9. Kızıl Ötesi Sıcaklık
Ölçer ile İş parçası
Sıcaklık Ölçümü

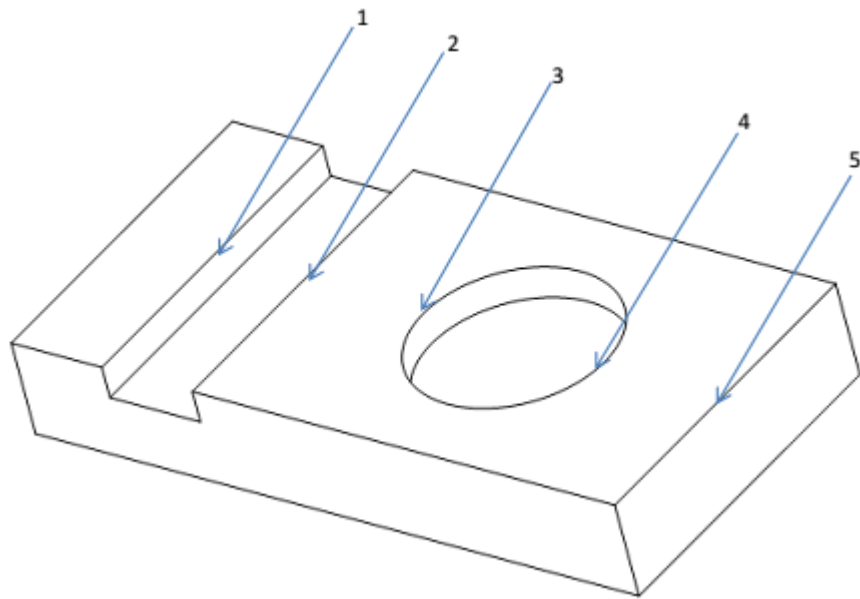


Şekil 3.10. İmalatı Yapılan Numune İş Parçaları

4. BÖLÜM

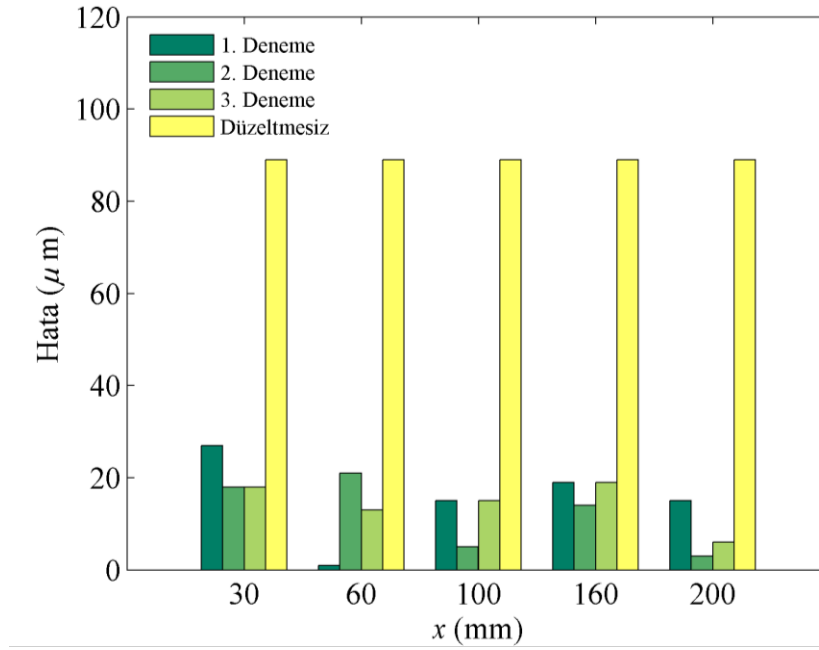
DENEYSEL SONUÇLAR

Yapılan deneylerde iş parçası malzemesi olarak işleme sonrası iyi yüzey kalitesi veren Alüminyum 7075 serisi ve kalıpcılık sektöründe yaygın olarak kullanılan çelik St4140 serisi kullanılmıştır. Numune geometrisi her iki malzeme için de aynıdır. Dokuz farklı sıcaklık değeri için yapılan FEA analizleri sonucu ısı etkisiyle boyutları değişen iş parçası işleme kodları yeniden düzenlenmiş ve ortam sıcaklığına bağlı üretilen bu kodlarla iş parçaları işlenmiştir. İşlenen iş parçalarının boyutları CMM (Coordinate Measuring Machine) ile hassas bir şekilde ölçülmüştür. Şekil 4.1. de görüldüğü gibi seçilen 5 kritik nokta için ölçümler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bölüm 4.1. - 4.4.'de aynı şartlarda işlenen üç ölçümün ortalamasının mutlak değeri alınarak % başarı oranı sunulmuştur.



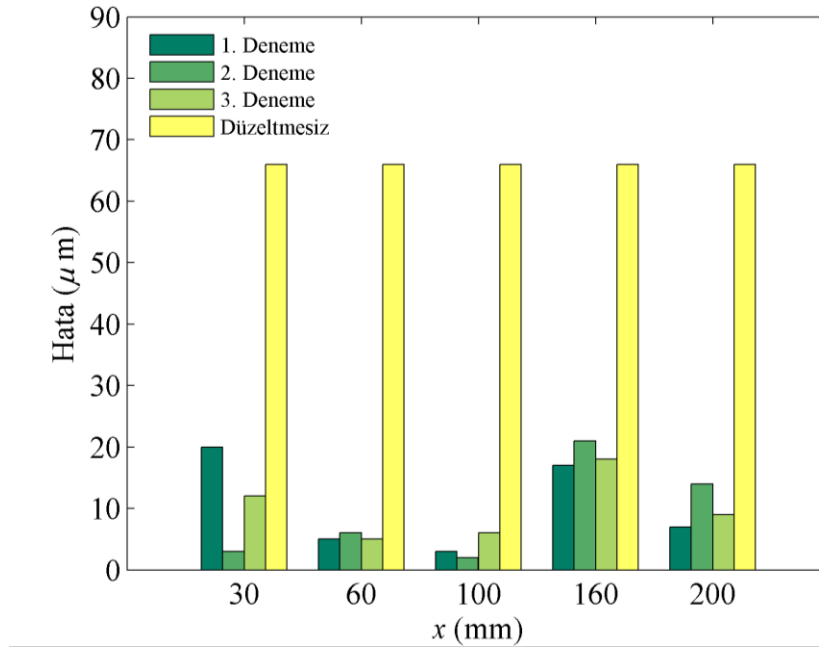
Şekil 4.1. CMM ölçüm Noktaları

4.1. Al7075 Malzeme İçin Deneysel Sonuçlar

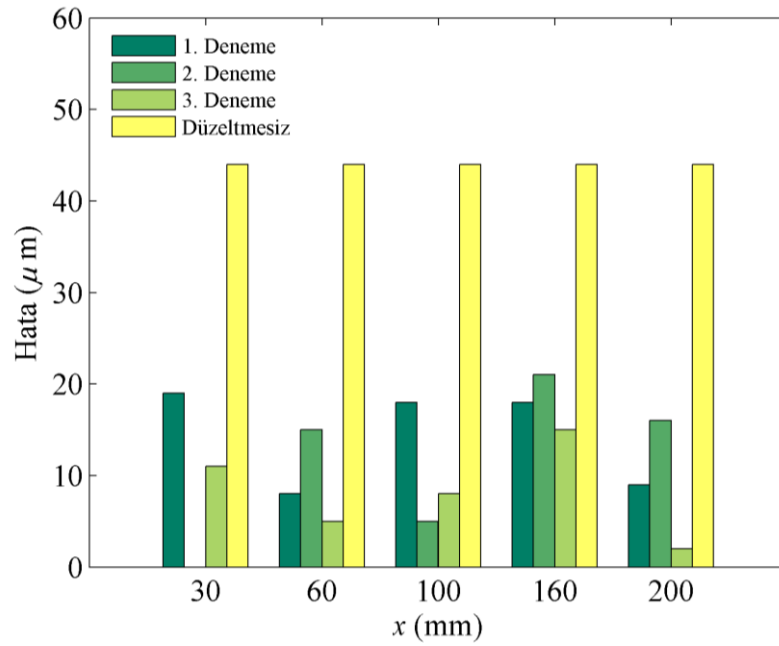


Şekil 4.2. 2°C Al7075 Hata Analizi

Uygulanan hata azaltma yöntemi sonucunda Al7075 malzemede 2°C’de 88μm olan boyutsal hata 14 μm’ye düşürülerek % 84.1 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.2.). Al7075 malzemede ise 7°C’de 66μm olan boyutsal hata 10 μm’ye düşürülerek %84,81 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.3.).

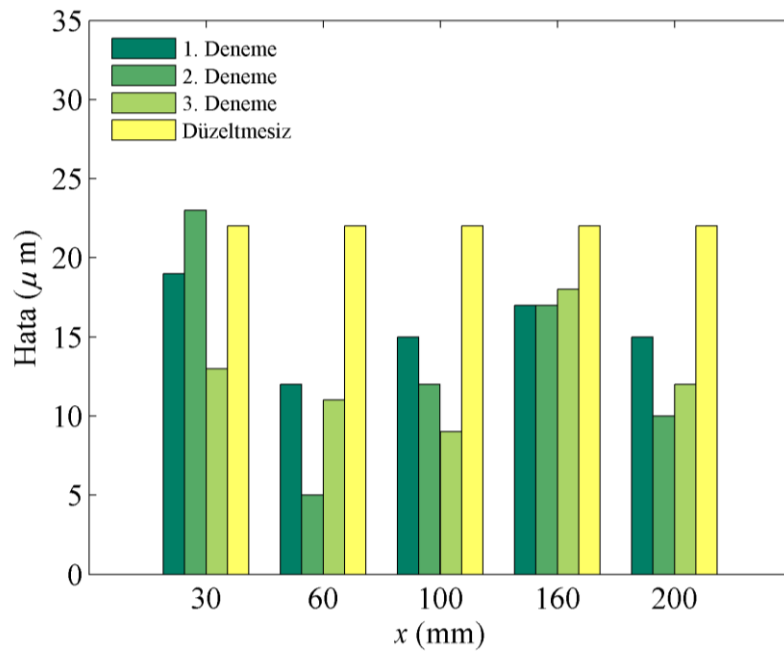


Şekil 4.3. 7°C Al7075 Hata Analizi

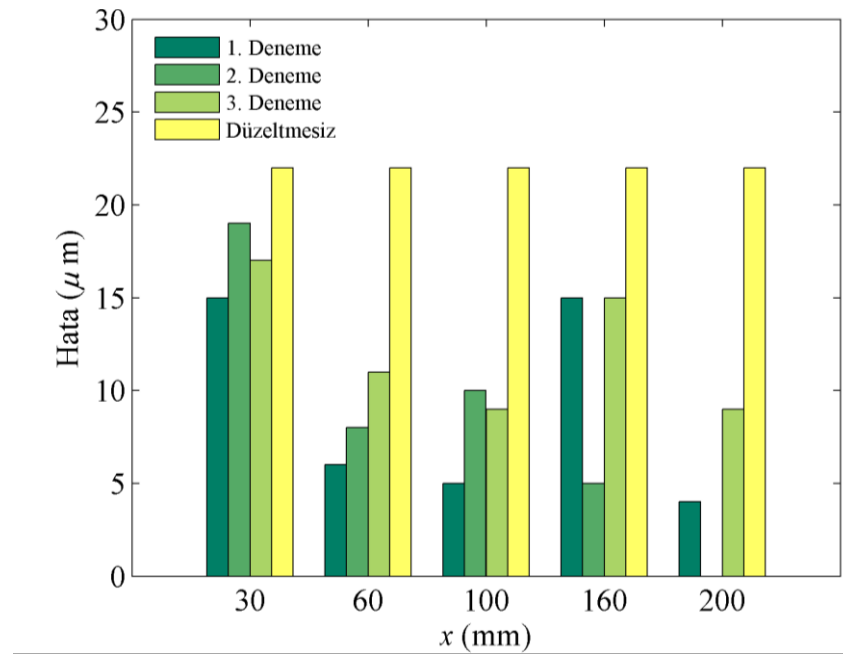


Şekil 4.4. 12°C Al7075 Hata Analizi

Uygulanan hata azaltma yöntemi sonucunda Al7075 malzemede 12°C’de 44μm olan boyutsal hata 11 μm’ye düşürülerek %75 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.4.). Al7075 malzemede ise 17°C’de 22μm olan boyutsal hata 14 μm’ye düşürülerek %36,4 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.5.).

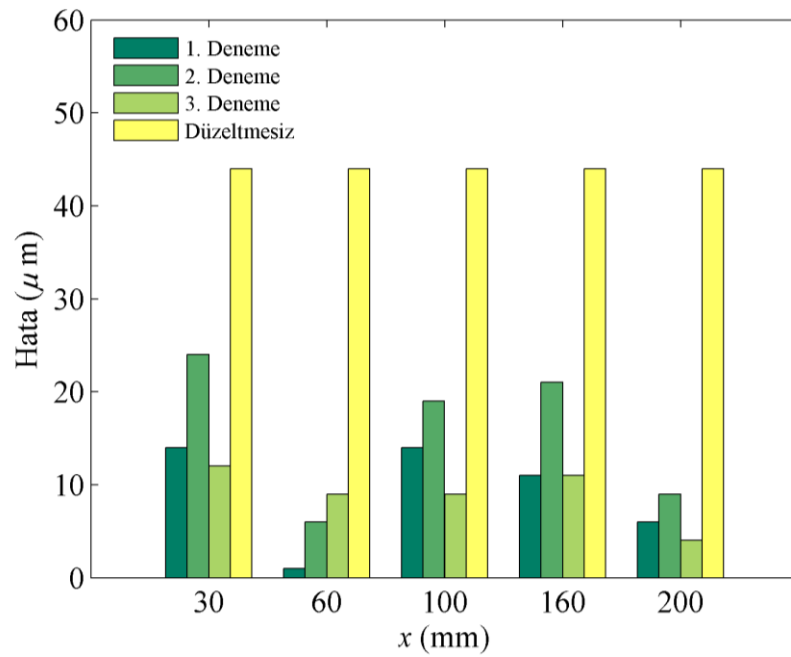


Şekil 4.5. 17°C Al7075 Hata Analizi

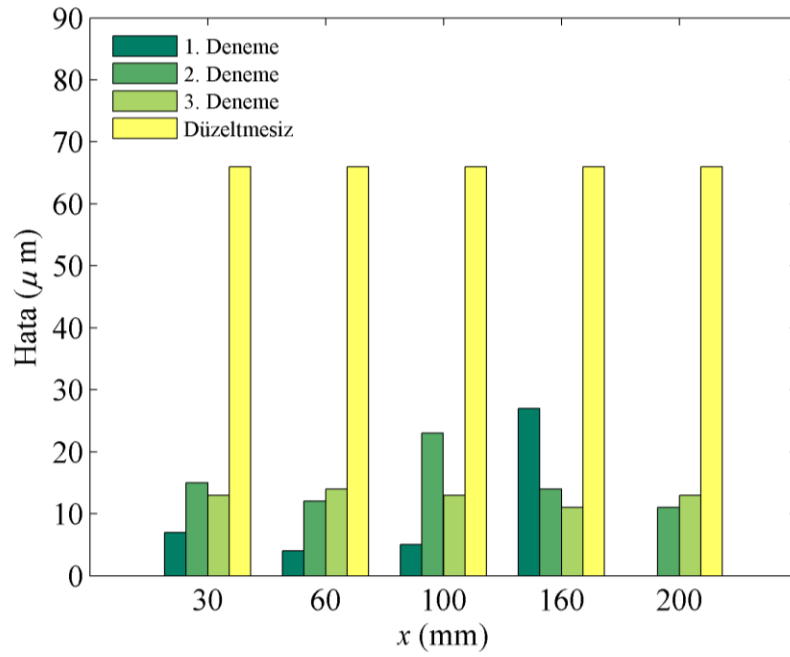


Şekil 4.6. 27°C Al7075 Hata Analizi

Uygulanan hata azaltma yöntemi sonucunda Al7075 malzemede 27°C’de 22μm olan boyutsal hata 10 μm’ye düşürülerek %54.5 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.6.). Al7075 malzemede ise 32°C’de 44μm olan boyutsal hata 11 μm’ye düşürülerek %75 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.7.).

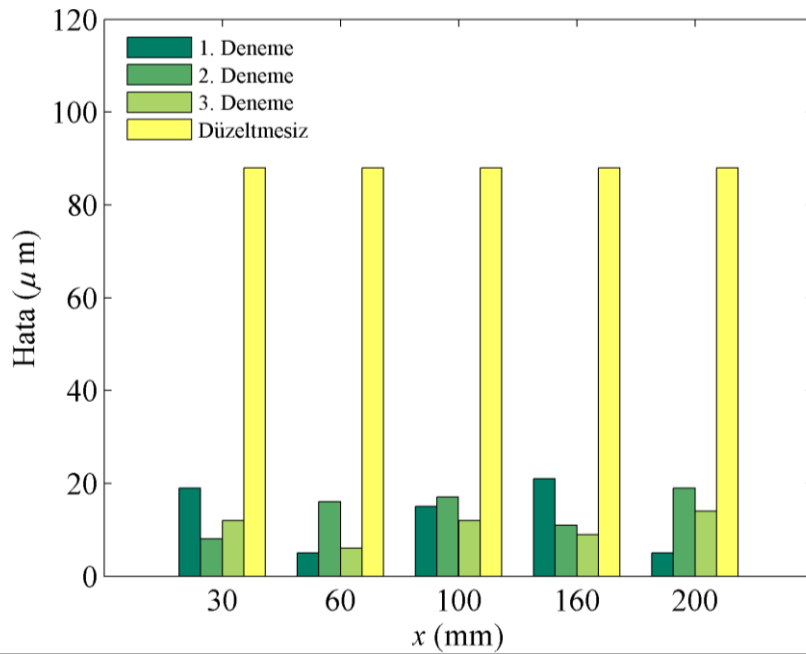


Şekil 4.7. 32°C Al7075 Hata Analizi



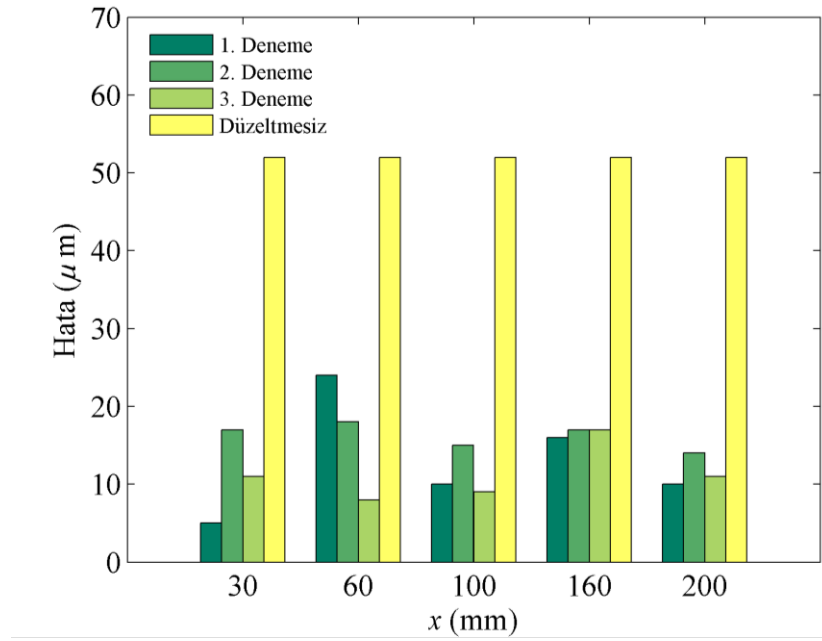
Şekil 4.8. 37°C Al7075 Hata Analizi

Uygulanan hata azaltma yöntemi sonucunda Al7075 malzemedeki 37°C’de 66μm olan boyutsal hata 12 μm’ye düşürülerek %81,8 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.8.). Al7075 malzemedeki ise 42°C’de 88μm olan boyutsal hata 13 μm’ye düşürülerek %85,2 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.9.).



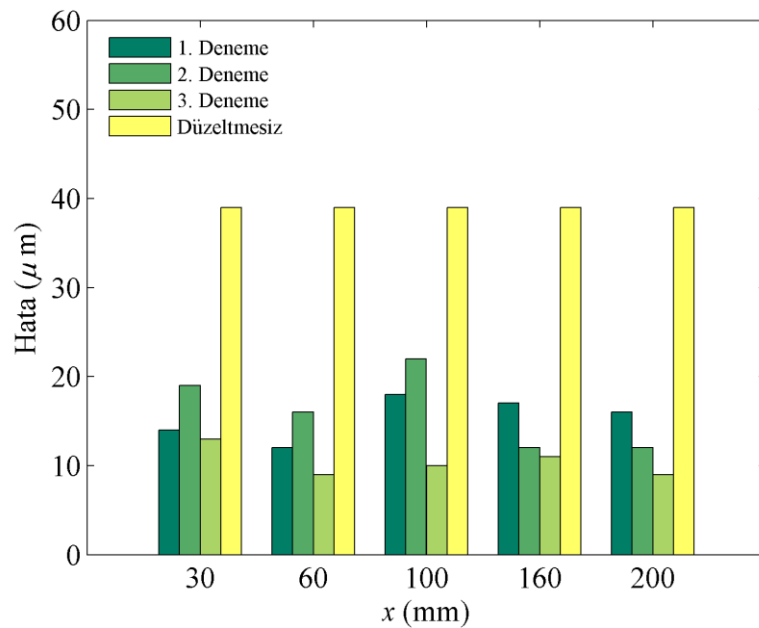
Şekil 4.9. 42°C Al7075 Hata Analizi

4.2. St4140 Malzeme İçin Deneysel Sonuçlar

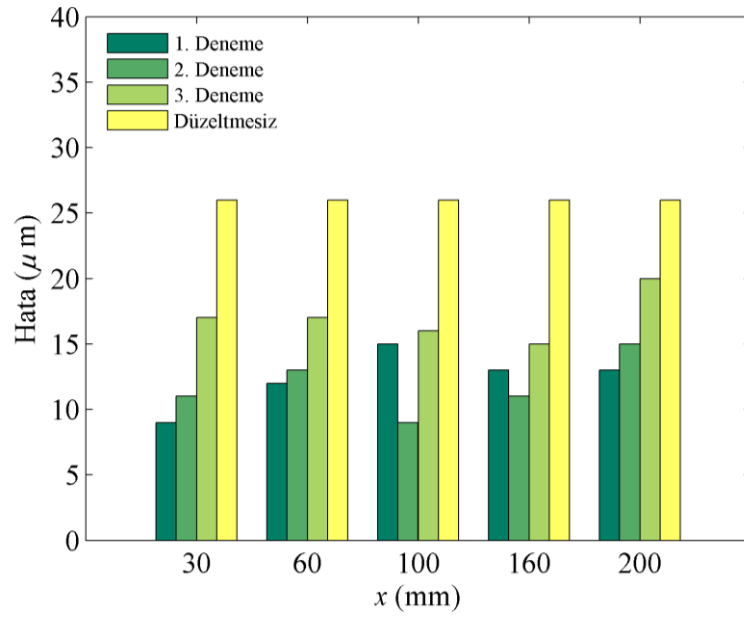


Şekil 4.10. 2°C St4140 Hata Analizi

Uygulanan hata azaltma yöntemi sonucunda St4140 malzemede 2°C’de 52μm olan boyutsal hata 13 μm’ye düşürülerek %75 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.10.). St4140 malzemede ise 7°C’de 39μm olan boyutsal hata 14 μm’ye düşürülerek %64 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.11.).

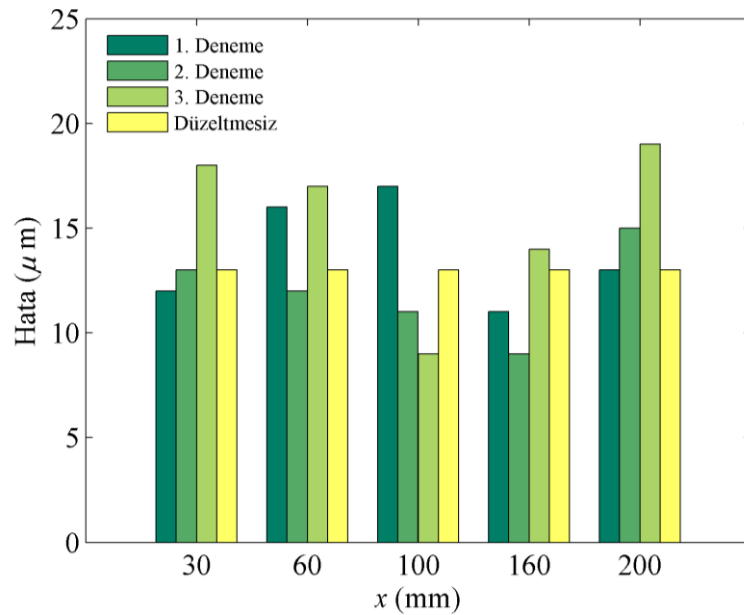


Şekil 4.11. 7°C St4140 Hata Analizi

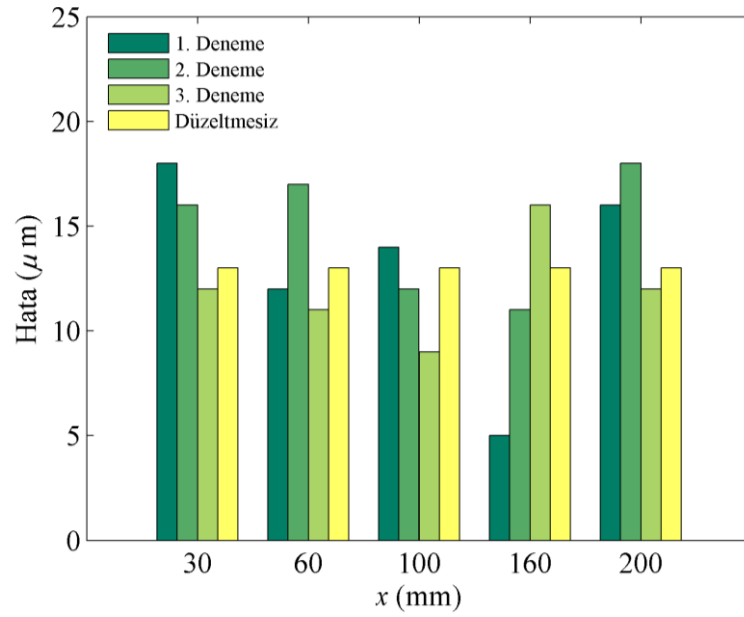


Şekil 4.12. 12°C St4140 Hata Analizi

Uygulanan hata azaltma yöntemi sonucunda St4140 malzemede 12°C’de 26μm olan boyutsal hata 14 μm’ye düşürülerek %46 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.12.). St4140 malzemede ise 17°C’de 13μm olan boyutsal hata 14 μm olarak ölçülmüş ve başarı sağlanamamıştır (Şekil 4.13.). 17°C’de başarı sağlanamamasının nedeni bu sıcaklık değerinin ideal sıcaklığa yakın değerde olması ve tezgah eksenlerinde kontrol edilemeyen 10 μm’ lik sabit bir geometrik hatanın bulunmasıdır.

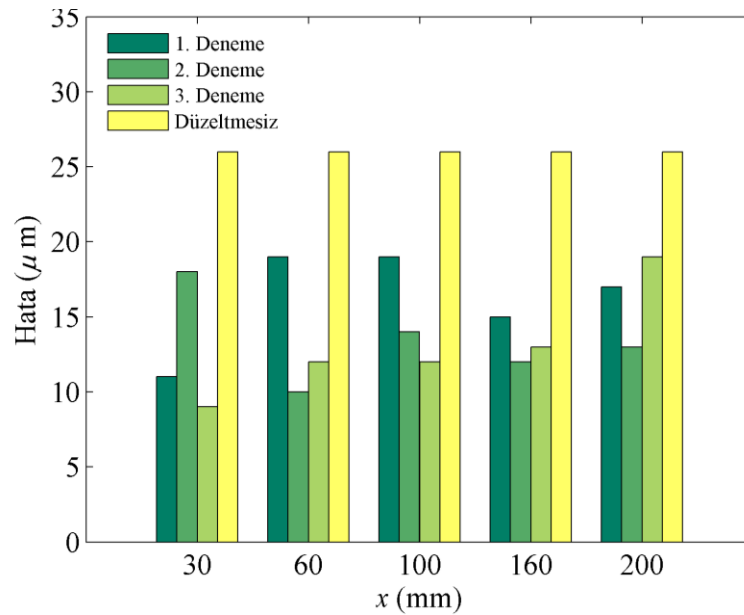


Şekil 4.13. 17°C St4140 Hata Analizi

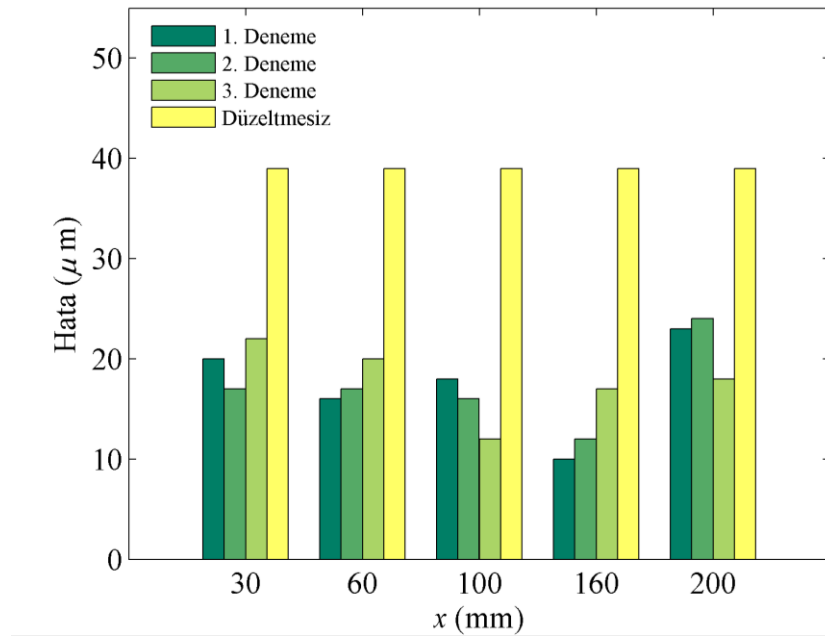


Şekil 4.14. 27°C St4140 Hata Analizi

Uygulanan hata azaltma yöntemi sonucunda St4140 malzemede 27°C’de 13μm olan boyutsal hata 13 μm olarak ölçülmüş ve başarı sağlanamamıştır (Şekil 4.14.). 27°C’de başarı sağlanamamasının nedeni bu sıcaklık değerinin ideal sıcaklığa yakın değerde olması ve tezgah eksenlerinde kontrol edilemeyen 10 μm’ lik sabit bir geometrik hatanın bulunmasıdır.St4140 malzemede ise 32°C’de 26μm olan boyutsal hata 14 μm’ye düşürülerek %46 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.15.).

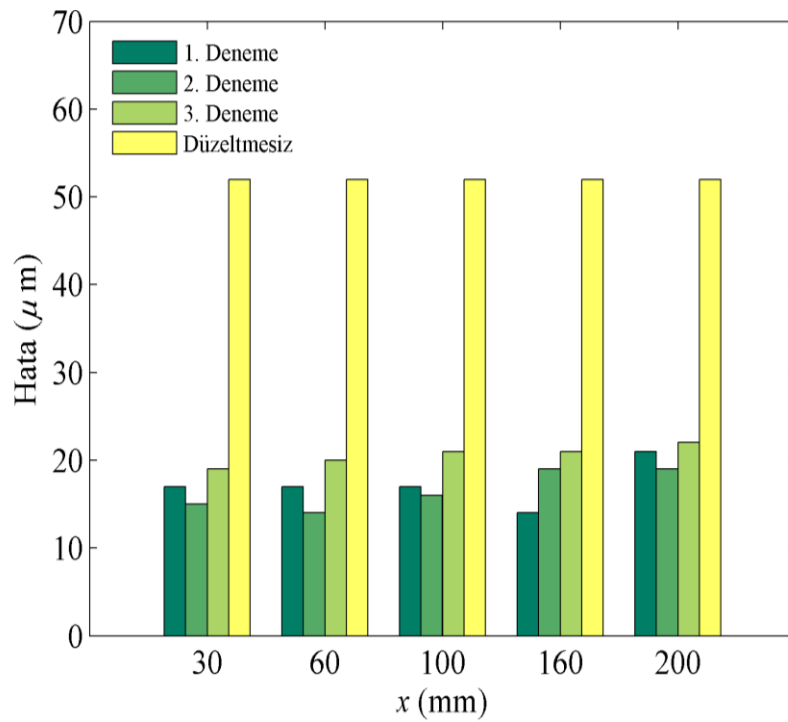


Şekil 4.15. 32°C St4140 Hata Analizi



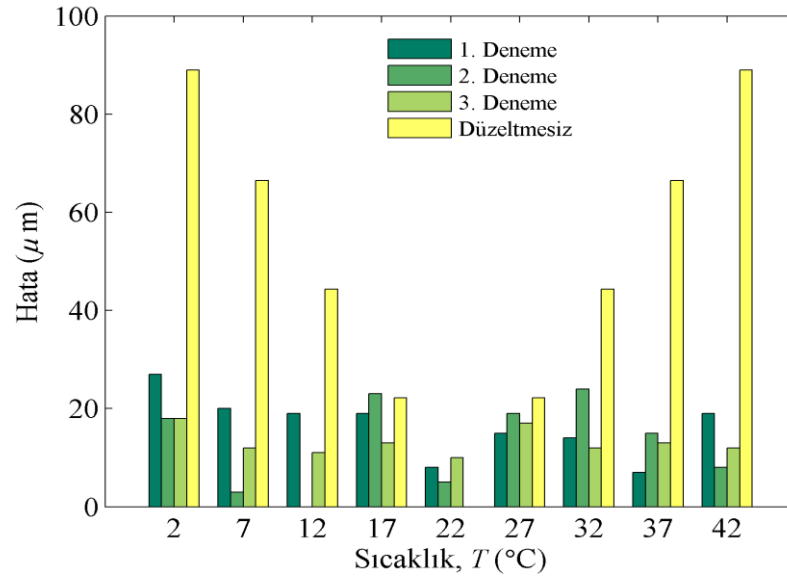
Şekil 4.16. 37°C St4140 Hata Analizi

Uygulanan hata azaltma yöntemi sonucunda St4140 malzemede 37°C’de 39μm olan boyutsal hata 17 μm’ye düşürülerek %56,4 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.16.). St4140 malzemede ise 42°C’de 52μm olan boyutsal hata 18 μm’ye düşürülerek %65,4 başarı ile hata indirgenmiştir (Şekil 4.17.).

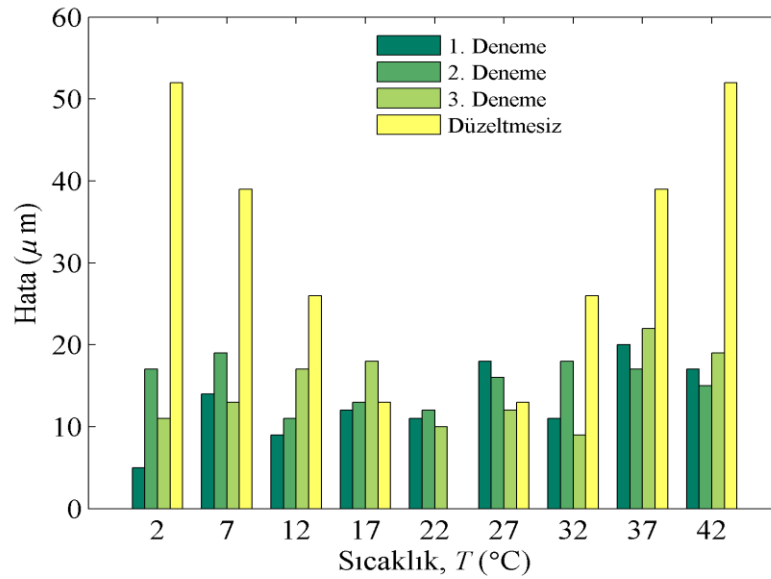


Şekil 4.17. 42°C St4140 Hata Analizi

4.3. Sıcaklığa Bağlı Hata Miktarı

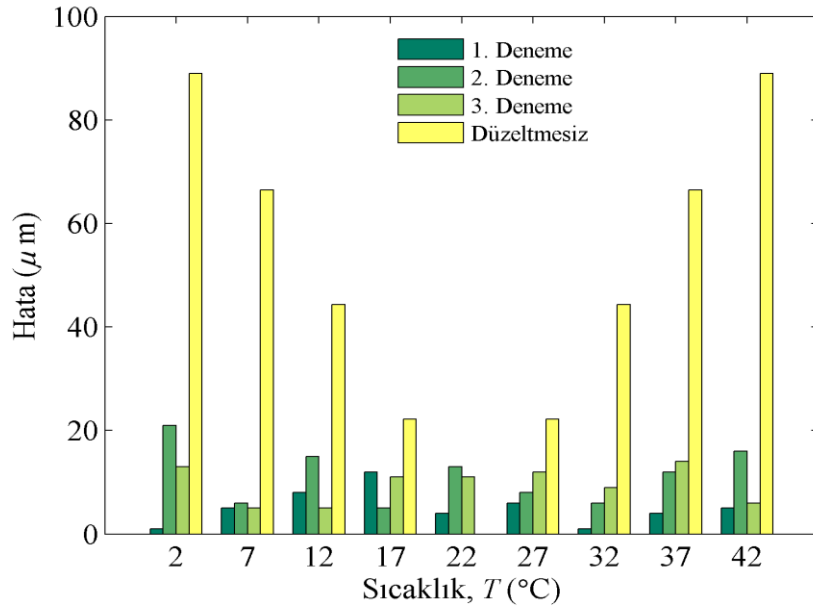


Şekil 4.18. 30mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

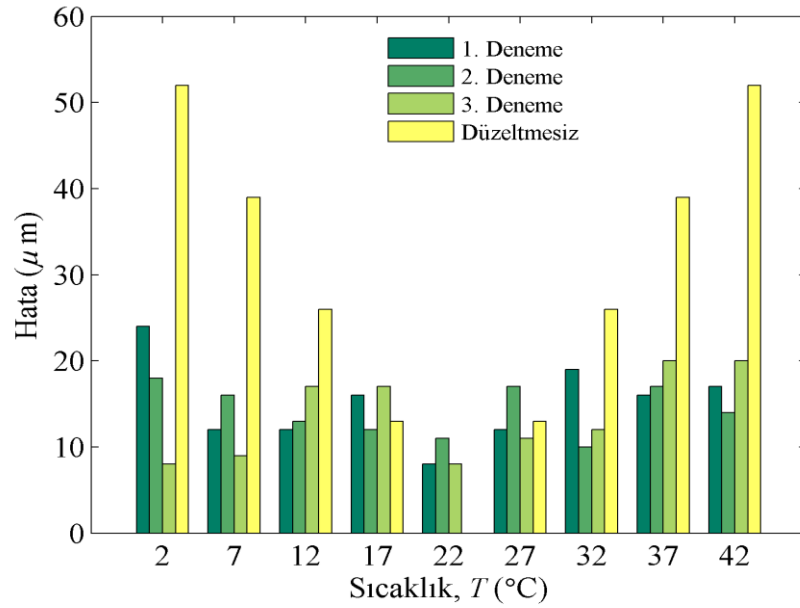


Şekil 4.19. 30mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi 1 numaralı ölçüm noktasında Al7075 ve St4140 için elde edilen sıcaklığa bağlı hata değerleri Şekil 4.18-19’da gösterilmiştir. İdeal sıcaklıkta Al7075 için ortalama hata 7.5μm iken St4140 için 11μm ölçülmüştür. Al7075 için en başarılı hata düzeltme işlemi 12°C deneylerinde 10μm, en kötü hata düzeltme işlemi 2°C’de 21μm ölçülmüştür. St4140 için ise en iyi hata düzeltme işlemi 2°C’de 11μm en kötü hata düzeltme işlemi 37 °C’de 19.6μm olarak ölçülmüştür.

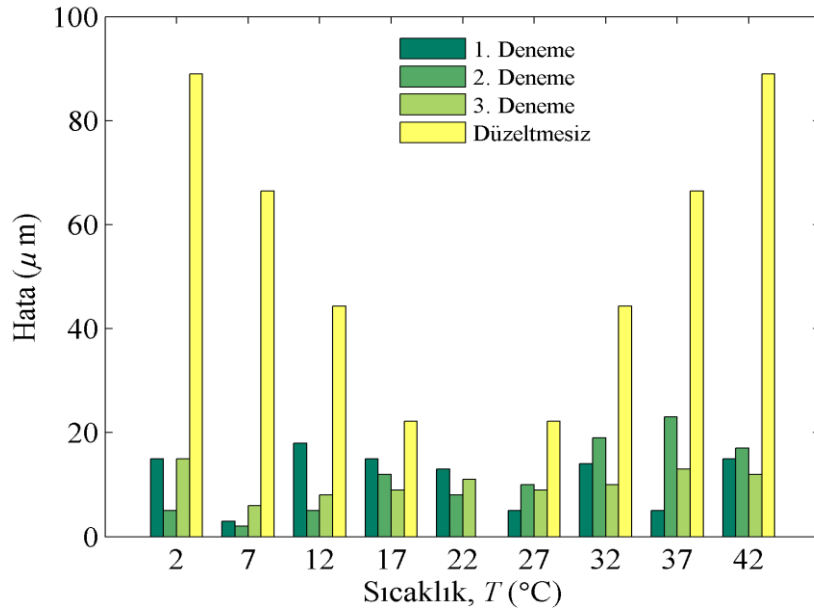


Şekil 4.20. 60mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

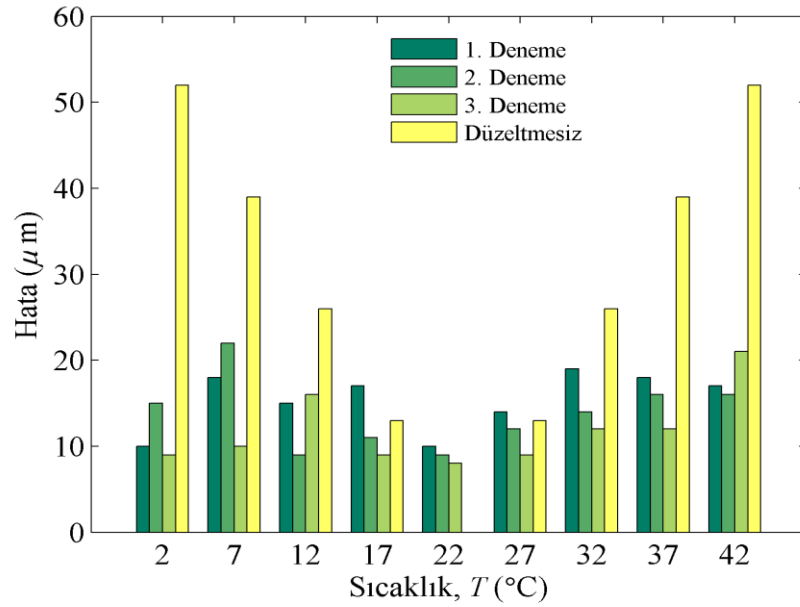


Şekil 4.21. 60mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

Şekil 4.1' de görüldüğü gibi 2 numaralı ölçüm noktasında Al7075 ve St4140 için elde edilen sıcaklığa bağlı hata değerleri Şekil 4.20-21'de gösterilmiştir. İdeal sıcaklıkta Al7075 ve St4140 için ortalama hata 9 μ m ölçülmüştür. Al7075 için en başarılı hata düzeltme işlemi 7°C deneylerinde 5.5 μ m, en kötü hata düzeltme işlemi 2°C 'de 11.7 μ m ölçülmüştür. St4140 için ise en iyi hata düzeltme işlemi 7°C'de 12.3 μ m, en kötü hata düzeltme işlemi 37 °C'de 17.6 μ m olarak ölçülmüştür.

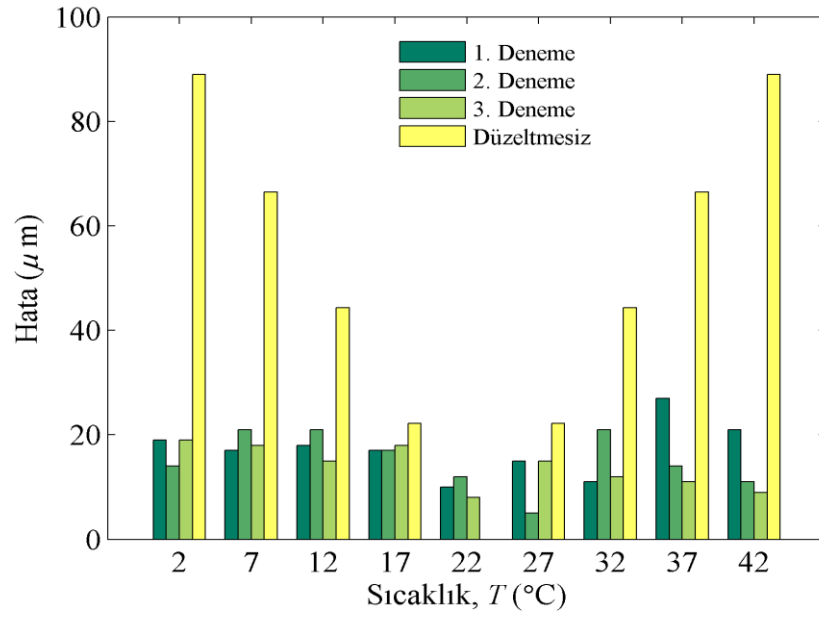


Şekil 4.22. 100mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

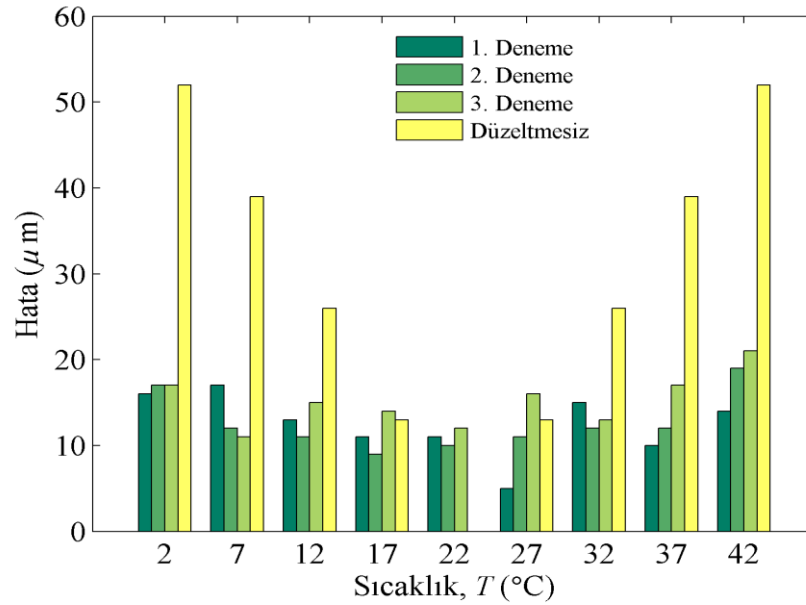


Şekil 4.23. 100mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

Şekil 4.1' de görüldüğü gibi 3 numaralı ölçüm noktasında Al7075 ve St4140 için elde edilen sıcaklığa bağlı hata değerleri Şekil 4.22-23'de gösterilmiştir. İdeal sıcaklıkta Al7075 için ortalama hata $10.6\mu m$ iken St4140 için $9\mu m$ ölçülmüştür. Al7075 için en başarılı hata düzeltme işlemi $7^{\circ}C$ deneylerinde $4\mu m$, en kötü hata düzeltme işlemi $32,37$ ve $42^{\circ}C$ 'de $14\mu m$ civarında ölçülmüştür. St4140 için ise en iyi hata düzeltme işlemi $2^{\circ}C$ 'de $11\mu m$ en kötü hata düzeltme işlemi $42^{\circ}C$ 'de $18\mu m$ olarak ölçülmüştür.

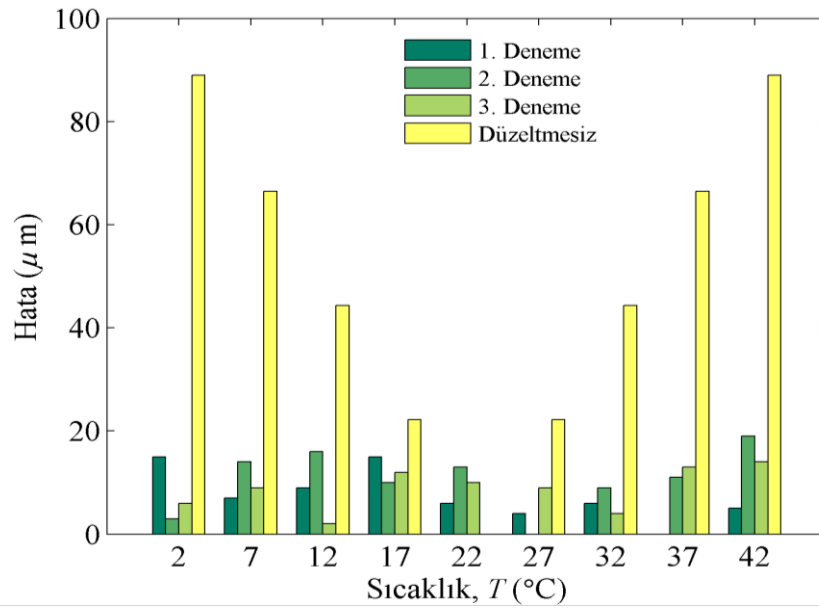


Şekil 4.24. 160mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

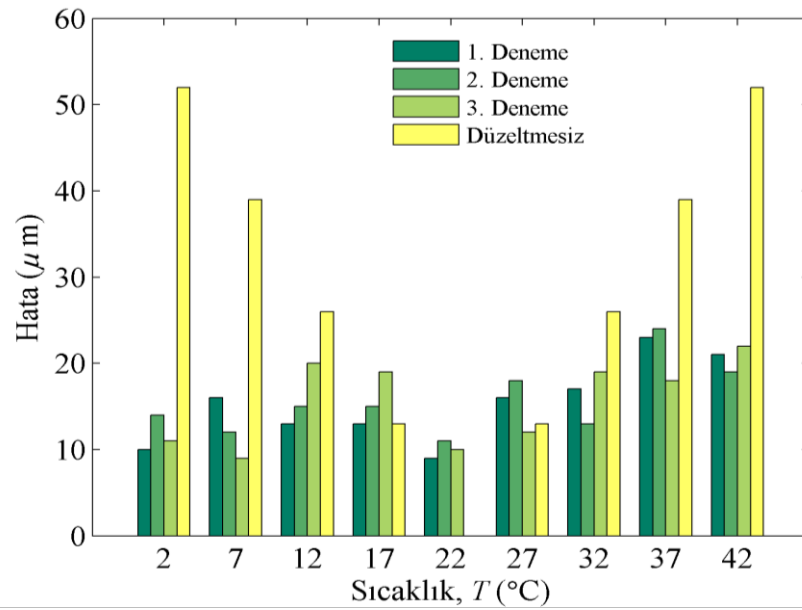


Şekil 4.25. 160mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

Şekil 4.1' de görüldüğü gibi 4 numaralı ölçüm noktasında Al7075 ve St4140 için elde edilen sıcaklığa bağlı hata değerleri Şekil 4.24-25'de gösterilmiştir. İdeal sıcaklıkta Al7075 için ortalama hata $10\mu\text{m}$ iken St4140 için 11μ ölçülmüştür. Al7075 için en başarılı hata düzeltme işlemi 27°C deneylerinde $11.6\mu\text{m}$, en kötü hata düzeltme işlemi 7°C 'de $18.6\mu\text{m}$ ölçülmüştür. St4140 için ise en iyi hata düzeltme işlemi 27°C 'de $10,7\mu\text{m}$, en kötü hata düzeltme işlemi 42°C 'de $18\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.26. 200mm için Al7075 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

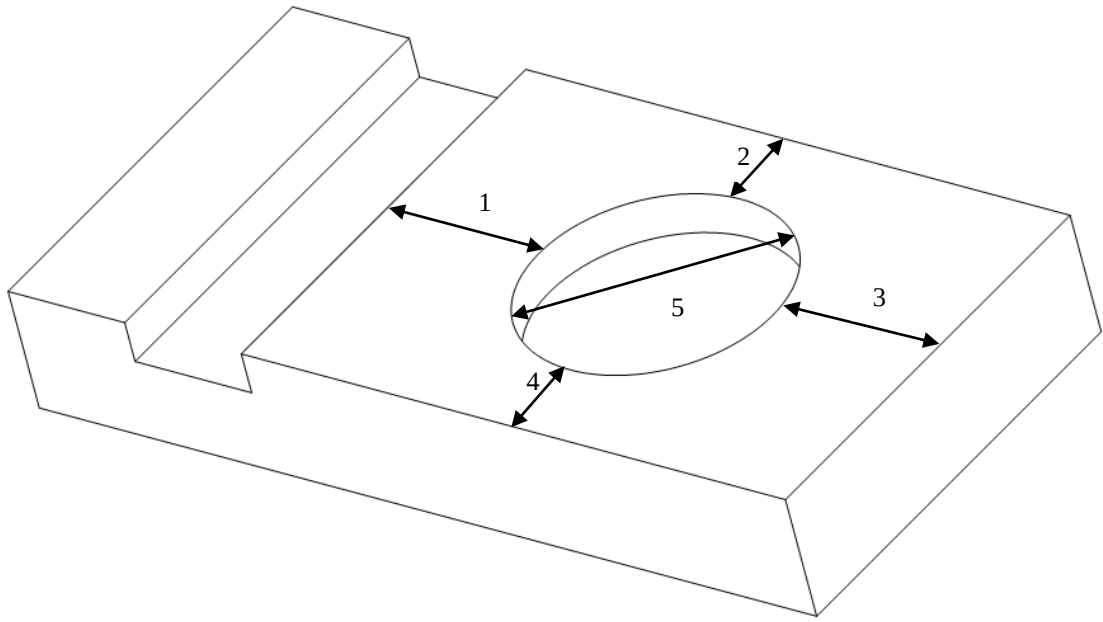


Şekil 4.27. 200mm için St4140 sıcaklığa bağlı hata ölçümü

Şekil 4.1' de görüldüğü gibi 5 numaralı ölçüm noktasında Al7075 ve St4140 için elde edilen sıcaklığa bağlı hata değerleri Şekil 4.26-27'de gösterilmiştir. İdeal sıcaklıkta Al7075 için ortalama hata $9.6\mu m$ iken St4140 için $10\mu m$ ölçülmüştür. Al7075 için en başarılı hata düzeltme işlemi $27^{\circ}C$ deneylerinde $4.3\mu m$ ve $32^{\circ}C$ deneylerinde $6.3\mu m$, en kötü hata düzeltme işlemi $42^{\circ}C$ 'de $12.6\mu m$ ölçülmüştür. St4140 için ise en iyi hata düzeltme işlemi $2^{\circ}C$ 'de $11.7\mu m$ en kötü hata düzeltme işlemi $37^{\circ}C$ ve $42^{\circ}C$ 'de yaklaşık $21\mu m$ ölçülmüştür.

4.4. Dairesel Cep Hata Düzeltme Performansı

Yapılan ısıl hata düzeltme işlemleri sonrasında iş parçası üzerinde bulunan dairesel cep için işleme doğruluğunu ölçmek için bir iç çap ölçümü ve dört tane de dairesel cebin iş parçası kenarlarına olan uzaklıklara bağlı olmak üzere beş farklı CMM ölçümü yapılmıştır. CMM ölçüm noktaları Şekil 4.28.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Dairesel Cep Ölçüm Noktaları

Yapılan ölçümler sonucunda Al7075 ve St 4140 malzeme için elde edilen sonuçlar Tablo 4.1 ve 4.2'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Al 7075 Dairesel Cep Sıcaklığa Bağlı Hata Miktarı

Al 7075 Çap Hataları (µm)									
Ölçüm Nok.	2°C	7°C	12°C	17°C	22°C	27°C	32°C	37°C	42°C
1	17	13	12	14	11	14	17	14	23
2	7	9	9	7	10	15	14	10	10
3	28	28	20	22	14	16	21	22	26
4	10	9	13	20	12	5	11	9	20
5	9	11	18	13	15	14	8	18	22
Ortalama Hata	14	14	14	15	12	12	14	15	20

Yapılan CMM ölçümleri sonucunda Al 7075 malzeme için ideal sıcaklıkta 12 µm olan hata 2, 7, 12 °C'de 14 µm ve artan sıcaklıklarda 20 µm seviyelerine çıkmıştır. İşleme sıcaklığının artışı nedeniyle takım tezgâhının yapı elemanlarında meydana gelen ısıl

genleşmeler sonucunda takım tezgâhının işleme hassasiyetinin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir.

Tablo 4.2 St 4140 Dairesel Cep Sıcaklığa Bağlı Hata Miktarı

St 4140 7075 Çap Hataları (µm)									
Ölçüm Nok.	2°C	7°C	12°C	17°C	22°C	27°C	32°C	37°C	42°C
1	15	20	15	22	13	15	27	29	32
2	18	19	27	17	13	16	19	17	29
3	32	35	26	23	12	13	24	21	32
4	15	21	17	16	13	17	23	18	26
5	12	19	12	16	14	17	25	29	30
Ortalama Hata	18	23	19	19	13	16	23	23	29

Yapılan CMM ölçümleri sonucunda St 4140 malzeme için ideal sıcaklıkta 13 µm olan hata ideal sıcaklık altındaki değerlerde 19 µm civarında iken artan sıcaklıklarda 29 µm seviyelerine çıkmıştır. Al 7075 malzemede de görülen işleme sıcaklığının artışı nedeniyle takım tezgâhının yapı elemanlarında meydana gelen ısı genleşmeler St 4140 malzemede de işleme hassasiyetini azaltan bir etki yapmıştır. Al 7075 malzemenin ısı genleşme hata azaltma performansının St4140 malzemedan yüksek olmasının sebebi Al 7075 malzemenin talaşlı imalata daha uygun olması ve bunun sonucunda daha iyi yüzey pürüzlülük değeri vermesidir.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

5.1. Tartışma

Son 20 yılı kapsayan detaylı literatür araştırmasından da anlaşılacağı üzere ısı etkileri araştırmak için kızıl ötesi kameralar, geliştirilmiş bilgisayar yazılım ve donanımları, farklı ölçüm metotları ile birlikte birçok farklı ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Sıcaklık değişimlerinin etkilerini azaltmak için tezgâh bileşenlerinin termal genleşme katsayıları iyi bilinmeli, başarılı bir sıcaklık analizi yaparken tezgâh yapısındaki elemanların sıcaklık kontrolü yanında ortam sıcaklığının da istenilen değerlerde tutulması büyük önem arz etmektedir. Takım tezgâhı üreten birçok firma ve bu firmaların ürettiği farklı ve karmaşık yapıya sahip (ısı genleşme katsayısı farklı bir çok elemanın kullanılması ve bu elemanlarda işleme şartlarına bağlı olarak değişen termal deformasyonların ve etkilerin önceden tahmin edilemeyişi) takım tezgâhlarının üretimde kullanılması termal etkileri azaltma yönünde ortak bir çözüm üretilmesinin önündeki önemli bir engeldir. Yanma verimliliğini artırma, sürtünmeyi azaltma, yeni teknoloji motorların kalıp ve döküm işlemlerinde, gelişmiş mikroişlemciler, çeşitli uzay sistemleri, mikroskoplar ve tıbbi teçhizatlar ihtiyaç duyulan yüksek hassasiyette işleme gereksinimi ortaya çıkaran temel faktörlerdendir.

Takım tezgâhının hassasiyeti önceleri bir ayrıcalık olarak görülse de günümüz imalat sektöründe bir gereklilik haline gelmiştir. İnsanoğlunun artan istekleri teknolojiye yeniliklerin daha da geliştirilmesini sağlamıştır. Günümüzdeki modern takım tezgâhları gelişmiş malzeme teknolojileri kullanarak yaklaşık 0.005 mm hassasiyete ulaşabilmiştir. Takım tezgâhı ne kadar iyi dizayn edilirse edilsin tezgâh doğruluğu artırmada her zaman kısıtlar vardır. Termal deformasyon hataları ve kesme kuvvetlerinden kaynaklanan hataları gibi hatalar işleme şartlarına bağlı olarak sürekli farklılık gösterdiği için detaylı

bir dizaynla bile tamamen tespit edilemez. Bu yüzden de hata indirgeme işlemlerinin önemi atmaktadır

Ortam sıcaklığını istenilen değerde tutmak için takım tezgâhı iklimlendirilmiş oda içerisine alınır ve klimalar yardımıyla soğutma ve ısıtma işlemleri yapılır. Takım tezgâhları işletmelerdeki vardiyalı çalışma şartlarında da kullanıldığı için iklimlendirme masrafları da üretim maliyetleri üzerine eklenmektedir.

Yapılan bu çalışmada iklimlendirme yapılmadan ortam sıcaklığına bağlı işlenecek parça sıcaklığı dikkate alınarak G kodları yeniden düzenlenmiştir. Teorik ve deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olması uygulanan yöntemin başarısını göstermiştir.

Talaşlı imalat işlemlerinde kaba işleme şartlarına, takım-iş parçası çiftine, soğutma sistemi ve türüne bağlı olarak iş parçası sıcaklığı 100 °C ve üzerine çıkabilmektedir. Bu yüksek sıcaklıklara çıkan malzeme genleşmekte ve kaba işlemeden hemen sonra yapılacak olan bitirme işlemi için boyut hassasiyetini bozmakta ve bitirme işlemi sonucunda hatalı parça üretimine sebep olmaktadır. Uygulanan bu yöntem ile işleme hatalarının azaltılmasının yanında kaba işlemeden sonra iş parçasının soğumasını beklenmeden ölçülen o anki sıcaklık değerine bağlı G kodlarının üretilmesiyle işparçası ölçü tamlığını da artırılmıştır.

5.2. Sonuçlar

Geliştirilen hata düzeltme yönteminin uygulanması sonucunda Al7075 malzeme için işleme hatası 88µm den 14µm'ye düşürülerek %84 oranında, ST4140 malzeme için işleme hatası ise 52µm den 13µm'ye düşürülerek %75 oranında başarı ile ısıl hata azaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen başarı değerlerine ilaveten yıpranmamış bir takım tezgâhının ideal şartlarda işleme hassasiyetinin 5 µm civarında olduğu dikkate alınırsa yapılan çalışma sonucu elde edilen başarı değerlerinin daha da artabileceği aşıkardır.

Tez çalışmasında kullanılan iş parçası numune özellikleri dikkate alındığında ısıl genleşme katsayısı Al7075 için $22.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ve St4140 için $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu katsayı Al7075 için daha büyük olduğu için aynı sıcaklık değerlerinde termal deformasyonlar daha büyük çıkmış ve bunun sonucunda Al7075 malzemenin hata düzeltme performansı St4140 malzemeye göre daha yüksektir.

Hata azaltma performansları bakımından karşılaştırıldığında Al7075 de indirgeme işlemleri sonucu ortalama hata miktarı, St4140 göre %24 daha iyi sonuçlar vermiştir (11.825/14.625). Bunun sebebi Al7075'in işlenebilme kabiliyetinin daha iyi olması ve daha iyi yüzey kalitesi vermesidir. Elde edilen iyi yüzey kalitesi CMM ölçüm başarısını artırmaktadır.

Hata düzeltme deneylerinin sonuçlarının genel değerlendirmesinde düzeltme işlemi sonucunda tüm deneyler için 10-12 µm civarında bir artık hata değeri gözlenmektedir. Bu durum tezgâh eksenlerindeki pozisyonlama hataları, kayıt kızak sistemindeki aşınmalar ve servo motor hataları gibi faktörlerden kaynaklanan sabit bir hata olduğunu göstermektedir.

5.3. Öneriler

Yapılan tez çalışması sonucunda işleme hatalarında önemli bir azalma kaydedilmiştir. Daha sonraki yapılacak çalışmalara kolaylık sağlaması açısından uygulanan yöntem eğrisel yüzeylere de kolaylıkla uygulanabilir. Geliştirilen yöntemin en büyük avantajlarından birinin farklı takım tezgahlarına uygulanabilmesidir. Bunun sonucunda takip edilen yöntem torna tezgahlarında da başarılı sonuçlar verecektir. Yapılan çalışma ışığında elle yapılan hata indirgeme işlemleri için yazılım geliştirilirse işleme zamanı bakımından daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Büyükşahin, U., 2005. 3 Eksenli CNC Tezgah Tasarımı ve Uygulaması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
2. Kavala, D., 2010. Beş Eksenli CNC Tezgah Tasarımı ve Kontrolü. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
3. Kaygısız, H., 2010. Eğitim Amaçlı Masaüstü Üç Eksenli CNC Freze Tasarımı ve Prototipi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
4. Wang, S.-M., Liu, Y.-L., Kang, Y., 2002. An efficient error compensation system for CNC multi-axis machines. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **42**: (11): 1235-1245.
5. Weck, M., McKeown, P., Bonse, R., Herbst, U., 1995. Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, **44**: (2): 589-598.
6. Ni, J., 1997. CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real-Time Error Compensation. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, **119**: (4B): 717-725.
7. Lei, W. T., Hsu, Y. Y., 2003. Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through real-time error compensation. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **43**: (9): 871-877.
8. Tseng, P. C., Ho, J. L., 2002. A Study of High-Precision CNC Lathe Thermal Errors and Compensation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **19**: (11): 850-858.
9. Kang, Y., Chang, C.-W., Huang, Y., Hsu, C.-L., Nieh, I. F., 2007. Modification of a neural network utilizing hybrid filters for the compensation of thermal deformation in machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **47**: (2): 376-387.
10. Yuan, J., Ni, J., 1998. The real-time error compensation technique for CNC machining systems. **Mechatronics**, **8**: (4): 359-380.
11. Sortino, M., Belfio, S., Motyl, B., Totis, G., 2014. Compensation of geometrical errors of CAM/CNC machined parts by means of 3D workpiece model adaptation. **Computer-Aided Design**, **48**: 28-38.

12. Okafor, A. C., Ertekin, Y. M., 2000. Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer - Part 2. Angular errors. **Journal of Materials Processing Technology**, **105**: (3): 407-420.
13. Wang, W., Zhang, Y., Fan, K., Yang, J., 2015. A Fourier Series-Neural Network Based Real-Time Compensation Approach for Geometric and Thermal Errors of CNC Milling Machines. **Advances in Mechanical Engineering**, **5**: (0): 357920-357920.
14. Bryan, J., 1990. International Status of Thermal Error Research (1990). **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, **39**: (2): 645-656.
15. Lu, Y., Islam, M. N., 2012. A new approach to thermally induced volumetric error compensation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **62**: (9-12): 1071-1085.
16. Han, J., Wang, L., Wang, H., Cheng, N., 2011. A new thermal error modeling method for CNC machine tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **62**: (1-4): 205-212.
17. Zhang, J., Feng, P., Chen, C., Yu, D., Wu, Z., 2013. A method for thermal performance modeling and simulation of machine tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **68**: (5-8): 1517-1527.
18. Qianjian, G., Jianguo, Y., 2010. Application of projection pursuit regression to thermal error modeling of a CNC machine tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **55**: (5-8): 623-629.
19. Schmitz, T. L., Ziegert, J. C., Canning, J. S., Zapata, R., 2008. Case study: A comparison of error sources in high-speed milling. **Precision Engineering**, **32**: (2): 126-133.
20. Vyroubal, J., 2012. Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method. **Precision Engineering**, **36**: (1): 121-127.
21. Du, Z. C., Yang, J. G., Yao, Z. Q., Xue, B. Y., 2002. Modeling approach of regression orthogonal experiment design for the thermal error compensation of a CNC turning center. **Journal of Materials Processing Technology**, **129**: (1-3): 619-623.

22. Lee, J.-H., Yang, S.-H., 2002. Statistical optimization and assessment of a thermal error model for CNC machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **42**: (1): 147-155.
23. Delbressine, F. L. M., Florussen, G. H. J., Schijvenaars, L. A., Schellekens, P. H. J., 2006. Modelling thermomechanical behaviour of multi-axis machine tools. **Precision Engineering**, **30**: (1): 47-53.
24. Yang, H., Ni, J., 2005. Adaptive model estimation of machine-tool thermal errors based on recursive dynamic modeling strategy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **45**: (1): 1-11.
25. Okafor, A. C., Ertekin, Y. M., 2000. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, **40**: (8): 1199-1213.
26. Geçol, M. E., 2007. CNC Dik İşleme Merkezlerinde Isıl İşleme Hatalarının İş Parçası CAD Modeli Revizyonu ile Düzeltilmesi. Erciyes Üniversitesi, Makina Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri,
27. Bosetti, P., Bruschi, S., 2011. Enhancing positioning accuracy of CNC machine tools by means of direct measurement of deformation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **58**: (5-8): 651-662.
28. Lei, W. T., Hsu, Y. Y., 2003. Error measurement of five-axis CNC machines with 3D probe-ball. **Journal of Materials Processing Technology**, **139**: (1-3): 127-133.
29. Tian, W., Gao, W., Zhang, D., Huang, T., 2014. A general approach for error modeling of machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **79**: 17-23.
30. Kiridena, V., Ferreira, P. M., 1993. Mapping the effects of positioning errors on the volumetric accuracy of five-axis CNC machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **33**: (3): 417-437.
31. Jha, B. K., Kumar, A., 2003. Analysis of geometric errors associated with five-axis machining centre in improving the quality of cam profile. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **43**: (6): 629-636.

32. Lei, W. T., Hsu, Y. Y., 2002. Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: design and modeling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **42**: (10): 1153-1162.
33. Lin, Y., Shen, Y., 2003. Modelling of Five-Axis Machine Tool Metrology Models Using the Matrix Summation Approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **21**: (4): 243-248.
34. Zhu, S., Ding, G., Qin, S., Lei, J., Zhuang, L., Yan, K., 2012. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **52**: (1): 24-29.
35. Okafor, A. C., Ertekin, Y. M., 2000. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **40**: (8): 1199-1213.
36. Rahman, M., Heikkala, J., Lappalainen, K., 2000. Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools. Part I: theory. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **40**: (10): 1535-1546.
37. Ahn, K. G., Cho, D. W., 2000. An analysis of the volumetric error uncertainty of a three-axis machine tool by beta distribution. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **40**: (15): 2235-2248.
38. Lee, J. H., Liu, Y., Yang, S.-H., 2006. Accuracy improvement of miniaturized machine tool: Geometric error modeling and compensation. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **46**: (12-13): 1508-1516.
39. Hsu, Y. Y., Wang, S. S., 2007. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **47**: (2): 352-360.
40. Kong, L. B., Cheung, C. F., To, S., Lee, W. B., Du, J. J., Zhang, Z. J., 2008. A kinematics and experimental analysis of form error compensation in ultra-precision machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **48**: (12-13): 1408-1419.
41. Lee, D. S., Choi, J. Y., Choi, D. H., 2003. ICA based thermal source extraction and thermal distortion compensation method for a machine tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **43**: (6): 589-597.

42. Yang, S.-H., Kim, K.-H., Park, Y. K., 2004. Measurement of spindle thermal errors in machine tool using hemispherical ball bar test. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **44**: (2–3): 333-340.
43. Ramesh, R., Mannan, M. A., Poo, A. N., 2000. Error compensation in machine tools - a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, **40**: (9): 1235-1256.
44. Ramesh, R., Mannan, M. A., Poo, A. N., 2002. Support Vector Machines Model for Classification of Thermal Error in Machine Tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **20**: (2): 114-120.
45. Ramesh, R., Mannan, M. A., Poo, A. N., 2000. Error compensation in machine tools - a review Part II: thermal errors. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, **40**: (9): 1257-1284.
46. Hao, W., Hongtao, Z., Qianjian, G., Xiushan, W., Jianguo, Y., 2008. Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center. **Journal of Materials Processing Technology**, **207**: (1–3): 172-179.
47. Yan, J. Y., Yang, J. G., 2009. Application of synthetic grey correlation theory on thermal point optimization for machine tool thermal error compensation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **43**: (11-12): 1124-1132.
48. Zhang, Y., Yang, J., Jiang, H., 2012. Machine tool thermal error modeling and prediction by grey neural network. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **59**: (9-12): 1065-1072.
49. Wang, S. M., Liu, Y. L., Kang, Y. A., 2002. An efficient error compensation system for CNC multi-axis machines. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, **42**: (11): 1235-1245.
50. Go, J.-H., Yun, W.-S., Gang, S.-J., Jo, D.-U., An, G.-G., Yun, S.-H., 2001. Development of a Virtual Machine Tool-Part 2 (Dynamic Cutting Force Model, Thermal Behavior Model, Feed Drive Model and Comprehensive Software Environment). **Journal of the Korean Society for Precision Engineering**, **18**: (11): 80-85.

51. Jedrzejewski, J., Modrzycki, W., 1992. A New Approach to Modelling Thermal Behaviour of a Machine Tool under Service Conditions. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, **41**: (1): 455-458.
52. Kim, S. K., Cho, D. W., 1997. Real-time estimation of temperature distribution in a ball-screw system. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **37**: (4): 451-464.
53. Chen, J. S., Yuan, J. X., Ni, J., Wu, S. M., 1993. Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Errors on a Machining Center. **Journal of Engineering for Industry**, **115**: (4): 472-479.
54. Srivastava, A. K., Veldhuis, S. C., Elbestawit, M. A., 1995. Modelling geometric and thermal errors in a five-axis cnc machine tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **35**: (9): 1321-1337.
55. Wang, Y., Zhang, G., Moon, K. S., Sutherland, J. W., 1998. Compensation for the thermal error of a multi-axis machining center. **Journal of Materials Processing Technology**, **75**: (1-3): 45-53.
56. Mou, J., Donmez, M. A., Cetinkunt, S., 1995. An Adaptive Error Correction Method Using Feature-Based Analysis Techniques for Machine Performance Improvement, Part 1: Theory Derivation. **Journal of Engineering for Industry**, **117**: (4): 584-590.
57. Krulewich, D. A., 1998. Temperature integration model and measurement point selection for thermally induced machine tool errors. **Mechatronics**, **8**: (4): 395-412.
58. Balsamo, A., Marques, D., Sartori, S., 1990. A Method for Thermal-Deformation Corrections of CMMs. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, **39**: (1): 557-560.
59. Yang, M., Lee, J., 1998. Measurement and prediction of thermal errors of a CNC machining center using two spherical balls. **Journal of Materials Processing Technology**, **75**: (1-3): 180-189.
60. Veldhuis, S. C., Elbestawi, M. A., 1995. A Strategy for the Compensation of Errors in Five-Axis Machining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, **44**: (1): 373-377.

61. Chen, J., Ling, C., 1996. Improving the machine accuracy through machine tool metrology and error correction. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **11**: (3): 198-205.
62. Attia, M., Kops, L., 1993. Thermometric design considerations for temperature monitoring in machine tools and CMM structures. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **8**: (5): 311-319.
63. Wang, W., Zhang, Y., Yang, J., Zhang, Y., Yuan, F., 2012. Geometric and thermal error compensation for CNC milling machines based on Newton interpolation method. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, **227**: (4): 771-778.
64. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., Delbressine, F., 2008. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, **57**: (2): 660-675.
65. Chen, B., Zhang, X., Zhang, H., He, X., Xu, M., 2014. Investigation of error separation for three dimensional profile rotary measuring system. **Measurement**, **47**: 627-632.
66. Yang, Z., Sun, M., Li, W., Liang, W., 2010. Modified Elman network for thermal deformation compensation modeling in machine tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **54**: (5-8): 669-676.
67. Eskandari, S., Arezoo, B., Abdullah, A., 2012. Positional, geometrical, and thermal errors compensation by tool path modification using three methods of regression, neural networks, and fuzzy logic. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **65**: (9-12): 1635-1649.
68. Fan, K.-C., Chen, H.-M., Kuo, T.-H., 2012. Prediction of machining accuracy degradation of machine tools. **Precision Engineering**, **36**: (2): 288-298.
69. Miao, E.-M., Gong, Y.-Y., Niu, P.-C., Ji, C.-Z., Chen, H.-D., 2013. Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **69**: (9-12): 2593-2603.
70. Yao, X., Fu, J., Xu, Y., He, Y., 2013. Synthetic Error Modeling for NC Machine Tools based on Intelligent Technology. **Procedia CIRP**, **10**: 91-97.

71. Bohez, E. L. J., Ariyajunya, B., Sinlapeecheewa, C., Shein, T. M. M., Lap, D. T., Belforte, G., 2007. Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines. **Computer-Aided Design**, **39**: (4): 229-244.
72. Jakstas, A., Kausinis, S., Barauskas, R., Kasparaitis, A., Barakauskas, A., 2014. Thermal error analysis in precision length measurements. **Measurement**, **51**: 133-146.
73. Xu, Z. Z., Liu, X. J., Kim, H. K., Shin, J. H., Lyu, S. K., 2011. Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **51**: (7-8): 605-611.
74. Ramesh, R., Mannan, M. A., Poo, A. N., 2003. Thermal error measurement and modelling in machine tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **43**: (4): 391-404.
75. Yang, J., Yuan, J., Ni, J., 1999. Thermal error mode analysis and robust modeling for error compensation on a CNC turning center. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **39**: (9): 1367-1381.
76. Chen, D., Bonis, M., Zhang, F., Dong, S., 2011. Thermal error of a hydrostatic spindle. **Precision Engineering**, **35**: (3): 512-520.
77. Hao, W., Hongtao, Z., Qianjian, G., Xiushan, W., Jianguo, Y., 2008. Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center. **Journal of Materials Processing Technology**, **207**: (1-3): 172-179.
78. Mayr, J., Jedrzejewski, J., Uhlmann, E., Alkan Donmez, M., Knapp, W., Härtig, F., Wendt, K., Moriwaki, T., Shore, P., Schmitt, R., Brecher, C., Würz, T., Wegener, K., 2012. Thermal issues in machine tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, **61**: (2): 771-791.
79. Zhang, J. F., Feng, P. F., Wu, Z. J., Yu, D. W., Chen, C., 2013. Thermal Structure Design and Analysis of a Machine Tool Headstock. **Mechanika**, **19**: (4):
80. Liu, Y., Lu, Y., Gao, D., Hao, Z., 2013. Thermally induced volumetric error modeling based on thermal drift and its compensation in Z-axis. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, **69**: (9-12): 2735-2745.

81. Abdulshahed, A. M., Longstaff, A. P., Fletcher, S., 2015. The application of ANFIS prediction models for thermal error compensation on CNC machine tools. **Applied Soft Computing**, **27**: (0): 158-168.
82. Feng, W., Li, Z., Gu, Q., Yang, J., 2015. Thermally induced positioning error modelling and compensation based on thermal characteristic analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **93**: (0): 26-36.
83. Fan, K., Yang, J., Yang, L., 2015. Unified error model based spatial error compensation for four types of CNC machining center: Part I—Singular function based unified error model. **Mechanical Systems and Signal Processing**, **60–61**: (0): 656-667.
84. Topal, E. S., 2003. BDS Tornalamada Kesme Kuvveti Esaslı İşleme Hatasının İncelenmesi ve Bilgisayar Desteği İle Düzeltilmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri,
85. Chungchoo, C., Saini, D., 2002. On-line tool wear estimation in CNC turning operations using fuzzy neural network model. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **42**: (1): 29-40.

EKLER

Ek-1.A17075 kaba işleme kodları

%
 O5155
 N0010 G80 G49 G40
 N0020 G91 G28 Z0.0
 N0040 G00 G90 G54 X129.8668 Y118.9973 S4000 M03
 N0050 G43 Z10. H01
 N0060 Z.5
 N0070 G01 Z-2.5 F800. M08
 N0080 Y109.5
 N0090 X200.
 N0100 G02 X209.5 Y100. I0.0 J-9.5
 N0110 G01 Y0.0
 N0120 G02 X200. Y-9.5 I-9.5 J0.0
 N0130 G01 X59.8375
 N0140 Y-9.4986
 N0150 G02 X50.5 Y0.0 I.1625 J9.4986
 N0160 G01 Y100.
 N0170 G02 X59.7336 Y109.4963 I9.5 J0.0
 N0180 G01 X59.7335 Y109.5
 N0190 X129.8668
 N0200 Y118.9973 F1000.
 N0210 Z.5
 N0220 G00 Z10.
 N0230 X-18.9955 Y0.0
 N0240 Z.5
 N0250 G01 Z-2.5 F800.
 N0260 X-9.5
 N0270 Y100.
 N0280 G02 X0.0 Y109.5 I9.5 J0.0
 N0290 G01 X30.
 N0300 G02 X39.5 Y100. I0.0 J-9.5
 N0310 G01 Y0.0
 N0320 G02 X30. Y-9.5 I-9.5 J0.0
 N0330 G01 X0.0
 N0340 G02 X-9.5 Y0.0 I0.0 J9.5
 N0350 G01 X-18.9955 F1000.
 N0360 Z.5
 N0370 G00 Z10.
 N0380 X129.8668 Y118.9975
 N0390 Z-2.
 N0400 G01 Z-5. F800.
 N0410 Y109.5
 N0420 X200.
 N0430 G02 X209.5 Y100. I0.0 J-9.5
 N0440 G01 Y0.0
 N0450 G02 X200. Y-9.5 I-9.5 J0.0

N0460 G01 X59.8375
N0470 Y-9.4986
N0480 G02 X50.5 Y0.0 I.1625 J9.4986
N0490 G01 Y100.
N0500 G02 X59.7336 Y109.4963 I9.5 J0.0
N0510 G01 X59.7335 Y109.5
N0520 X129.8668
N0530 Y118.9975 F1000.
N0540 Z-2.
N0550 G00 Z10.
N0560 X-18.9958 Y0.0
N0570 Z-2.
N0580 G01 Z-5. F800.
N0590 X-9.5
N0600 Y100.
N0610 G02 X0.0 Y109.5 I9.5 J0.0
N0620 G01 X30.
N0630 G02 X39.5 Y100. I0.0 J-9.5
N0640 G01 Y0.0
N0650 G02 X30. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N0660 G01 X0.0
N0670 G02 X-9.5 Y0.0 I0.0 J9.5
N0680 G01 X-18.9958 F1000.
N0690 Z-2.
N0700 G00 Z10.
N0710 X129.8668 Y118.9978
N0720 Z-4.5
N0730 G01 Z-7.5 F800.
N0740 Y109.5
N0750 X200.
N0760 G02 X209.5 Y100. I0.0 J-9.5
N0770 G01 Y0.0
N0780 G02 X200. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N0790 G01 X59.8375
N0800 Y-9.4986
N0810 G02 X50.5 Y0.0 I.1625 J9.4986
N0820 G01 Y100.
N0830 G02 X59.7336 Y109.4963 I9.5 J0.0
N0840 G01 X59.7335 Y109.5
N0850 X129.8668
N0860 Y118.9978 F1000.
N0870 Z-4.5
N0880 G00 Z10.
N0890 X-18.996 Y0.0
N0900 Z-4.5
N0910 G01 Z-7.5 F800.
N0920 X-9.5
N0930 Y100.
N0940 G02 X0.0 Y109.5 I9.5 J0.0

N0950 G01 X30.
N0960 G02 X39.5 Y100. I0.0 J-9.5
N0970 G01 Y0.0
N0980 G02 X30. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N0990 G01 X0.0
N1000 G02 X-9.5 Y0.0 I0.0 J9.5
N1010 G01 X-18.996 F1000.
N1020 Z-4.5
N1030 G00 Z10.
N1040 X129.8668 Y118.998
N1050 Z-7.
N1060 G01 Z-10. F800.
N1070 Y109.5
N1080 X200.
N1090 G02 X209.5 Y100. I0.0 J-9.5
N1100 G01 Y0.0
N1110 G02 X200. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N1120 G01 X59.8375
N1130 Y-9.4986
N1140 G02 X50.5 Y0.0 I.1625 J9.4986
N1150 G01 Y100.
N1160 G02 X59.7336 Y109.4963 I9.5 J0.0
N1170 G01 X59.7335 Y109.5
N1180 X129.8668
N1190 Y118.998 F1000.
N1200 Z-7.
N1210 G00 Z10.
N1220 X-18.9963 Y0.0
N1230 Z-7.
N1240 G01 Z-10. F800.
N1250 X-9.5
N1260 Y100.
N1270 G02 X0.0 Y109.5 I9.5 J0.0
N1280 G01 X30.
N1290 G02 X39.5 Y100. I0.0 J-9.5
N1300 G01 Y0.0
N1310 G02 X30. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N1320 G01 X0.0
N1330 G02 X-9.5 Y0.0 I0.0 J9.5
N1340 G01 X-18.9963 F1000.
N1350 Z-7.
N1360 G00 Z10.
N1370 X125.9332 Y51.5288
N1380 Z3.
N1390 G01 X123.2858 Y49.6128 Z2.6563 F800.
N1400 X121.5515 Y46.827 Z2.3125
N1410 X120.9206 Y43.6068 Z1.9688
N1420 X121.4756 Y40.3725 Z1.625
N1430 X123.144 Y37.5468 Z1.2813

N1440 X125.7078 Y35.4986 Z.9375
N1450 X128.8322 Y34.4954 Z.5938
N1460 X132.1091 Y34.6684 Z.25
N1470 X135.1106 Y35.9948 Z-.0938
N1480 X137.4446 Y38.3015 Z-.4375
N1490 X138.8062 Y41.2872 Z-.7813
N1500 X139.0177 Y44.5619 Z-1.125
N1510 X138.0514 Y47.6979 Z-1.4688
N1520 X136.0334 Y50.2856 Z-1.8125
N1530 X133.2275 Y51.987 Z-2.1563
N1540 X130. Y52.5 Z-2.5
N1550 G03 I0.0 J-2.5
N1560 G01 Y61.5
N1570 G03 I0.0 J-11.5
N1580 G01 Y70.5
N1590 G03 I0.0 J-20.5
N1600 G01 Y61.5 F1000.
N1610 Z.5
N1620 G00 Z10.
N1630 X125.9332 Y51.5288
N1640 Z.5
N1650 G01 X123.2858 Y49.6128 Z.1563 F800.
N1660 X121.5515 Y46.827 Z-.1875
N1670 X120.9206 Y43.6068 Z-.5313
N1680 X121.4756 Y40.3725 Z-.875
N1690 X123.144 Y37.5468 Z-1.2188
N1700 X125.7078 Y35.4986 Z-1.5625
N1710 X128.8322 Y34.4954 Z-1.9063
N1720 X132.1091 Y34.6684 Z-2.25
N1730 X135.1106 Y35.9948 Z-2.5938
N1740 X137.4446 Y38.3015 Z-2.9375
N1750 X138.8062 Y41.2872 Z-3.2813
N1760 X139.0177 Y44.5619 Z-3.625
N1770 X138.0514 Y47.6979 Z-3.9688
N1780 X136.0334 Y50.2856 Z-4.3125
N1790 X133.2275 Y51.987 Z-4.6563
N1800 X130. Y52.5 Z-5.
N1810 G03 I0.0 J-2.5
N1820 G01 Y61.5
N1830 G03 I0.0 J-11.5
N1840 G01 Y70.5
N1850 G03 I0.0 J-20.5
N1860 G01 Y61.5 F1000.
N1870 Z-2.
N1880 G00 Z10.
N1890 X125.9332 Y51.5288
N1900 Z-2.
N1910 G01 X123.2858 Y49.6128 Z-2.3438 F800.
N1920 X121.5515 Y46.827 Z-2.6875

N1930 X120.9206 Y43.6068 Z-3.0313
N1940 X121.4756 Y40.3725 Z-3.375
N1950 X123.144 Y37.5468 Z-3.7188
N1960 X125.7078 Y35.4986 Z-4.0625
N1970 X128.8322 Y34.4954 Z-4.4063
N1980 X132.1091 Y34.6684 Z-4.75
N1990 X135.1106 Y35.9948 Z-5.0938
N2000 X137.4446 Y38.3015 Z-5.4375
N2010 X138.8062 Y41.2872 Z-5.7813
N2020 X139.0177 Y44.5619 Z-6.125
N2030 X138.0514 Y47.6979 Z-6.4688
N2040 X136.0334 Y50.2856 Z-6.8125
N2050 X133.2275 Y51.987 Z-7.1563
N2060 X130. Y52.5 Z-7.5
N2070 G03 I0.0 J-2.5
N2080 G01 Y61.5
N2090 G03 I0.0 J-11.5
N2100 G01 Y70.5
N2110 G03 I0.0 J-20.5
N2120 G01 Y61.5 F1000.
N2130 Z-4.5
N2140 G00 Z10.
N2150 X125.9332 Y51.5288
N2160 Z-4.5
N2170 G01 X123.2858 Y49.6128 Z-4.8438 F800.
N2180 X121.5515 Y46.827 Z-5.1875
N2190 X120.9206 Y43.6068 Z-5.5313
N2200 X121.4756 Y40.3725 Z-5.875
N2210 X123.144 Y37.5468 Z-6.2188
N2220 X125.7078 Y35.4986 Z-6.5625
N2230 X128.8322 Y34.4954 Z-6.9063
N2240 X132.1091 Y34.6684 Z-7.25
N2250 X135.1106 Y35.9948 Z-7.5938
N2260 X137.4446 Y38.3015 Z-7.9375
N2270 X138.8062 Y41.2872 Z-8.2813
N2280 X139.0177 Y44.5619 Z-8.625
N2290 X138.0514 Y47.6979 Z-8.9688
N2300 X136.0334 Y50.2856 Z-9.3125
N2310 X133.2275 Y51.987 Z-9.6563
N2320 X130. Y52.5 Z-10.
N2330 G03 I0.0 J-2.5
N2340 G01 Y61.5
N2350 G03 I0.0 J-11.5
N2360 G01 Y70.5
N2370 G03 I0.0 J-20.5
N2380 G01 Y61.5 F1000.
N2390 Z-7.
N2400 G00 Z10.
N2410 M02%

Ek-2.Al7075 ince işleme kodları

%

O5155

N0010 G80 G49 G40

N0020 G91 G28 Z0.0

N0040 G00 G90 G54 X-10. Y45. S4000 M03

N0050 G43 Z10. H01

N0060 Z-2.0004

N0070 G01 Z-5.0004 F500. M08

N0080 G03 X-5. Y50. I0.0 J5.

N0090 G01 Y100.

N0100 G02 X0.0 Y105. I5. J0.0

N0110 G01 X30.1921

N0120 X30.1919 Y104.9963

N0130 G02 X35. Y100. I-.1919 J-4.9963

N0140 G01 Y0.0

N0150 G02 X30. Y-5. I-5. J0.0

N0160 G01 X0.0

N0170 G02 X-5. Y0.0 I0.0 J5.

N0180 G01 Y50.

N0190 Y58.661 Z-10.0009

N0200 Y100.

N0210 G02 X0.0 Y105. I5. J0.0

N0220 G01 X30.1921

N0230 X30.1919 Y104.9963

N0240 G02 X35. Y100. I-.1919 J-4.9963

N0250 G01 Y0.0

N0260 G02 X30. Y-5. I-5. J0.0

N0270 G01 X0.0

N0280 G02 X-5. Y0.0 I0.0 J5.

N0290 G01 Y58.661

N0300 G03 X-10. Y63.661 I-5. J0.0

N0310 G01 Z-7.0009

N0320 G00 Z10.

N0330 X124.9014 Y110.

N0340 Z-2.0004

N0350 G01 Z-5.0004

N0360 G03 X129.9014 Y105. I5. J0.0

N0370 G01 X200.

N0380 G02 X205. Y100. I0.0 J-5.

N0390 G01 Y0.0

N0400 G02 X200. Y-5. I-5. J0.0

N0410 G01 X59.8511

N0420 X59.8512 Y-4.9978

N0430 G02 X55. Y0.0 I.1488 J4.9978

N0440 G01 Y100.

N0450 G02 X59.8029 Y104.9961 I5. J0.0

N0460 G01 X59.8028 Y105.

N0470 X129.9014

N0480 X138.5624 Z-10.0009
N0490 X200.
N0500 G02 X205. Y100. I0.0 J-5.
N0510 G01 Y0.0
N0520 G02 X200. Y-5. I-5. J0.0
N0530 G01 X59.8511
N0540 X59.8512 Y-4.9978
N0550 G02 X55. Y0.0 I.1488 J4.9978
N0560 G01 Y100.
N0570 G02 X59.8029 Y104.9961 I5. J0.0
N0580 G01 X59.8028 Y105.
N0590 X138.5624
N0600 G03 X143.5624 Y110. I0.0 J5.
N0610 G01 Z-7.0009
N0620 G00 Z10.
N0630 X135. Y69.3649
N0640 Z-2.0004
N0650 G01 Z-5.0004
N0660 Y70.
N0670 G03 X130. Y75. I-5. J0.0
N0680 I0.0 J-25.
N0690 G01 X129.6391 Y74.9974 Z-5.2088
N0700 X129.2783 Y74.9896 Z-5.4171
N0710 X128.9177 Y74.9766 Z-5.6255
N0720 X128.5573 Y74.9583 Z-5.8338
N0730 X128.1972 Y74.9349 Z-6.0422
N0740 X127.8375 Y74.9063 Z-6.2506
N0750 X127.4782 Y74.8725 Z-6.4589
N0760 X127.1194 Y74.8335 Z-6.6673
N0770 X126.7612 Y74.7893 Z-6.8756
N0780 X126.4038 Y74.74 Z-7.084
N0790 X126.047 Y74.6855 Z-7.2923
N0800 X125.6911 Y74.6259 Z-7.5007
N0810 X125.3361 Y74.5611 Z-7.709
N0820 X124.9821 Y74.4912 Z-7.9174
N0830 X124.6291 Y74.4162 Z-8.1257
N0840 X124.2772 Y74.3362 Z-8.3341
N0850 X123.9265 Y74.251 Z-8.5424
N0860 X123.5771 Y74.1608 Z-8.7508
N0870 X123.229 Y74.0656 Z-8.9591
N0880 X122.8823 Y73.9654 Z-9.1675
N0890 X122.5371 Y73.8601 Z-9.3758
N0900 X122.1935 Y73.7499 Z-9.5842
N0910 X121.8515 Y73.6348 Z-9.7925
N0920 X121.5112 Y73.5147 Z-10.0009
N0930 G03 I8.4888 J-23.5147
N0940 X118.506 Y67.114 I1.6978 J-4.7029
N0950 G01 X118.7217 Y66.5166
N0960 Z-7.0009

N0970 G00 Z10.
 N0980 M02
 %

Ek-3.St4140 Kaba işleme kodları

%
 O5155
 N0010 G80 G49 G40
 N0020 G91 G28 Z0.0
 N0040 G00 G90 G54 X129.8668 Y118.9973 S2100 M03
 N0050 G43 Z10. H01
 N0060 Z.5
 N0070 G01 Z-2.5 F340. M08
 N0080 Y109.5
 N0090 X200.
 N0100 G02 X209.5 Y100. I0.0 J-9.5
 N0110 G01 Y0.0
 N0120 G02 X200. Y-9.5 I-9.5 J0.0
 N0130 G01 X59.8375
 N0140 Y-9.4986
 N0150 G02 X50.5 Y0.0 I.1625 J9.4986
 N0160 G01 Y100.
 N0170 G02 X59.7336 Y109.4963 I9.5 J0.0
 N0180 G01 X59.7335 Y109.5
 N0190 X129.8668
 N0200 Y118.9973
 N0210 Z.5
 N0220 G00 Z10.
 N0230 X-18.9955 Y0.0
 N0240 Z.5
 N0250 G01 Z-2.5
 N0260 X-9.5
 N0270 Y100.
 N0280 G02 X0.0 Y109.5 I9.5 J0.0
 N0290 G01 X30.
 N0300 G02 X39.5 Y100. I0.0 J-9.5
 N0310 G01 Y0.0
 N0320 G02 X30. Y-9.5 I-9.5 J0.0
 N0330 G01 X0.0
 N0340 G02 X-9.5 Y0.0 I0.0 J9.5
 N0350 G01 X-18.9955
 N0360 Z.5
 N0370 G00 Z10.
 N0380 X129.8668 Y118.9975
 N0390 Z-2.
 N0400 G01 Z-5.
 N0410 Y109.5
 N0420 X200.

N0430 G02 X209.5 Y100. I0.0 J-9.5
N0440 G01 Y0.0
N0450 G02 X200. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N0460 G01 X59.8375
N0470 Y-9.4986
N0480 G02 X50.5 Y0.0 I.1625 J9.4986
N0490 G01 Y100.
N0500 G02 X59.7336 Y109.4963 I9.5 J0.0
N0510 G01 X59.7335 Y109.5
N0520 X129.8668
N0530 Y118.9975
N0540 Z-2.
N0550 G00 Z10.
N0560 X-18.9958 Y0.0
N0570 Z-2.
N0580 G01 Z-5.
N0590 X-9.5
N0600 Y100.
N0610 G02 X0.0 Y109.5 I9.5 J0.0
N0620 G01 X30.
N0630 G02 X39.5 Y100. I0.0 J-9.5
N0640 G01 Y0.0
N0650 G02 X30. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N0660 G01 X0.0
N0670 G02 X-9.5 Y0.0 I0.0 J9.5
N0680 G01 X-18.9958
N0690 Z-2.
N0700 G00 Z10.
N0710 X129.8668 Y118.9978
N0720 Z-4.5
N0730 G01 Z-7.5
N0740 Y109.5
N0750 X200.
N0760 G02 X209.5 Y100. I0.0 J-9.5
N0770 G01 Y0.0
N0780 G02 X200. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N0790 G01 X59.8375
N0800 Y-9.4986
N0810 G02 X50.5 Y0.0 I.1625 J9.4986
N0820 G01 Y100.
N0830 G02 X59.7336 Y109.4963 I9.5 J0.0
N0840 G01 X59.7335 Y109.5
N0850 X129.8668
N0860 Y118.9978
N0870 Z-4.5
N0880 G00 Z10.
N0890 X-18.996 Y0.0
N0900 Z-4.5
N0910 G01 Z-7.5

N0920 X-9.5
N0930 Y100.
N0940 G02 X0.0 Y109.5 I9.5 J0.0
N0950 G01 X30.
N0960 G02 X39.5 Y100. I0.0 J-9.5
N0970 G01 Y0.0
N0980 G02 X30. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N0990 G01 X0.0
N1000 G02 X-9.5 Y0.0 I0.0 J9.5
N1010 G01 X-18.996
N1020 Z-4.5
N1030 G00 Z10.
N1040 X129.8668 Y118.998
N1050 Z-7.
N1060 G01 Z-10.
N1070 Y109.5
N1080 X200.
N1090 G02 X209.5 Y100. I0.0 J-9.5
N1100 G01 Y0.0
N1110 G02 X200. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N1120 G01 X59.8375
N1130 Y-9.4986
N1140 G02 X50.5 Y0.0 I.1625 J9.4986
N1150 G01 Y100.
N1160 G02 X59.7336 Y109.4963 I9.5 J0.0
N1170 G01 X59.7335 Y109.5
N1180 X129.8668
N1190 Y118.998
N1200 Z-7.
N1210 G00 Z10.
N1220 X-18.9963 Y0.0
N1230 Z-7.
N1240 G01 Z-10.
N1250 X-9.5
N1260 Y100.
N1270 G02 X0.0 Y109.5 I9.5 J0.0
N1280 G01 X30.
N1290 G02 X39.5 Y100. I0.0 J-9.5
N1300 G01 Y0.0
N1310 G02 X30. Y-9.5 I-9.5 J0.0
N1320 G01 X0.0
N1330 G02 X-9.5 Y0.0 I0.0 J9.5
N1340 G01 X-18.9963
N1350 Z-7.
N1360 G00 Z10.
N1370 X125.9332 Y51.5288
N1380 Z3.
N1390 G01 X123.2858 Y49.6128 Z2.6563
N1400 X121.5515 Y46.827 Z2.3125

N1410 X120.9206 Y43.6068 Z1.9688
N1420 X121.4756 Y40.3725 Z1.625
N1430 X123.144 Y37.5468 Z1.2813
N1440 X125.7078 Y35.4986 Z.9375
N1450 X128.8322 Y34.4954 Z.5938
N1460 X132.1091 Y34.6684 Z.25
N1470 X135.1106 Y35.9948 Z-.0938
N1480 X137.4446 Y38.3015 Z-.4375
N1490 X138.8062 Y41.2872 Z-.7813
N1500 X139.0177 Y44.5619 Z-1.125
N1510 X138.0514 Y47.6979 Z-1.4688
N1520 X136.0334 Y50.2856 Z-1.8125
N1530 X133.2275 Y51.987 Z-2.1563
N1540 X130. Y52.5 Z-2.5
N1550 G03 I0.0 J-2.5
N1560 G01 Y61.5
N1570 G03 I0.0 J-11.5
N1580 G01 Y70.5
N1590 G03 I0.0 J-20.5
N1600 G01 Y61.5
N1610 Z.5
N1620 G00 Z10.
N1630 X125.9332 Y51.5288
N1640 Z.5
N1650 G01 X123.2858 Y49.6128 Z.1563
N1660 X121.5515 Y46.827 Z-.1875
N1670 X120.9206 Y43.6068 Z-.5313
N1680 X121.4756 Y40.3725 Z-.875
N1690 X123.144 Y37.5468 Z-1.2188
N1700 X125.7078 Y35.4986 Z-1.5625
N1710 X128.8322 Y34.4954 Z-1.9063
N1720 X132.1091 Y34.6684 Z-2.25
N1730 X135.1106 Y35.9948 Z-2.5938
N1740 X137.4446 Y38.3015 Z-2.9375
N1750 X138.8062 Y41.2872 Z-3.2813
N1760 X139.0177 Y44.5619 Z-3.625
N1770 X138.0514 Y47.6979 Z-3.9688
N1780 X136.0334 Y50.2856 Z-4.3125
N1790 X133.2275 Y51.987 Z-4.6563
N1800 X130. Y52.5 Z-5.
N1810 G03 I0.0 J-2.5
N1820 G01 Y61.5
N1830 G03 I0.0 J-11.5
N1840 G01 Y70.5
N1850 G03 I0.0 J-20.5
N1860 G01 Y61.5
N1870 Z-2.
N1880 G00 Z10.
N1890 X125.9332 Y51.5288

N1900 Z-2.
N1910 G01 X123.2858 Y49.6128 Z-2.3438
N1920 X121.5515 Y46.827 Z-2.6875
N1930 X120.9206 Y43.6068 Z-3.0313
N1940 X121.4756 Y40.3725 Z-3.375
N1950 X123.144 Y37.5468 Z-3.7188
N1960 X125.7078 Y35.4986 Z-4.0625
N1970 X128.8322 Y34.4954 Z-4.4063
N1980 X132.1091 Y34.6684 Z-4.75
N1990 X135.1106 Y35.9948 Z-5.0938
N2000 X137.4446 Y38.3015 Z-5.4375
N2010 X138.8062 Y41.2872 Z-5.7813
N2020 X139.0177 Y44.5619 Z-6.125
N2030 X138.0514 Y47.6979 Z-6.4688
N2040 X136.0334 Y50.2856 Z-6.8125
N2050 X133.2275 Y51.987 Z-7.1563
N2060 X130. Y52.5 Z-7.5
N2070 G03 I0.0 J-2.5
N2080 G01 Y61.5
N2090 G03 I0.0 J-11.5
N2100 G01 Y70.5
N2110 G03 I0.0 J-20.5
N2120 G01 Y61.5
N2130 Z-4.5
N2140 G00 Z10.
N2150 X125.9332 Y51.5288
N2160 Z-4.5
N2170 G01 X123.2858 Y49.6128 Z-4.8438
N2180 X121.5515 Y46.827 Z-5.1875
N2190 X120.9206 Y43.6068 Z-5.5313
N2200 X121.4756 Y40.3725 Z-5.875
N2210 X123.144 Y37.5468 Z-6.2188
N2220 X125.7078 Y35.4986 Z-6.5625
N2230 X128.8322 Y34.4954 Z-6.9063
N2240 X132.1091 Y34.6684 Z-7.25
N2250 X135.1106 Y35.9948 Z-7.5938
N2260 X137.4446 Y38.3015 Z-7.9375
N2270 X138.8062 Y41.2872 Z-8.2813
N2280 X139.0177 Y44.5619 Z-8.625
N2290 X138.0514 Y47.6979 Z-8.9688
N2300 X136.0334 Y50.2856 Z-9.3125
N2310 X133.2275 Y51.987 Z-9.6563
N2320 X130. Y52.5 Z-10.
N2330 G03 I0.0 J-2.5
N2340 G01 Y61.5
N2350 G03 I0.0 J-11.5
N2360 G01 Y70.5
N2370 G03 I0.0 J-20.5
N2380 G01 Y61.5

N2390 Z-7.
 N2400 G00 Z10.
 N2410 M02
 %

Ek-4.St4140 İnce işleme kodları

%
 O5155
 N0010 G80 G49 G40
 N0020 G91 G28 Z0.0
 N0040 G00 G90 G54 X-16. Y42. S1989 M03
 N0050 G43 Z10. H01
 N0060 Z-2.0004
 N0070 G01 Z-5.0004 F400. M08
 N0080 G03 X-8. Y50. I0.0 J8.
 N0090 G01 Y100.
 N0100 G02 X0.0 Y108. I8. J0.0
 N0110 G01 X30.2373
 N0120 X30.2372 Y107.9965
 N0130 G02 X38. Y100. I-.2372 J-7.9965
 N0140 G01 Y0.0
 N0150 G02 X30.2069 Y-7.9973 I-8. J0.0
 N0160 G01 Y-8.
 N0170 X0.0
 N0180 G02 X-8. Y0.0 I0.0 J8.
 N0190 G01 Y50.
 N0200 Y58.661 Z-10.0009
 N0210 Y100.
 N0220 G02 X0.0 Y108. I8. J0.0
 N0230 G01 X30.2373
 N0240 X30.2372 Y107.9965
 N0250 G02 X38. Y100. I-.2372 J-7.9965
 N0260 G01 Y0.0
 N0270 G02 X30.2069 Y-7.9973 I-8. J0.0
 N0280 G01 Y-8.
 N0290 X0.0
 N0300 G02 X-8. Y0.0 I0.0 J8.
 N0310 G01 Y58.661
 N0320 G03 X-16. Y66.661 I-8. J0.0
 N0330 G01 Z-7.0009
 N0340 G00 Z10.
 N0350 X122. Y116.
 N0360 Z-2.0004
 N0370 G01 Z-5.0004
 N0380 G03 X130. Y108. I8. J0.0
 N0390 G01 X200.
 N0400 G02 X208. Y100. I0.0 J-8.
 N0410 G01 Y0.0

N0420 G02 X200. Y-8. I-8. J0.0
N0430 G01 X60.
N0440 G02 X52. Y0.0 I0.0 J8.
N0450 G01 Y100.
N0460 G02 X60. Y108. I8. J0.0
N0470 G01 X130.
N0480 X138.661 Z-10.0009
N0490 X200.
N0500 G02 X208. Y100. I0.0 J-8.
N0510 G01 Y0.0
N0520 G02 X200. Y-8. I-8. J0.0
N0530 G01 X60.
N0540 G02 X52. Y0.0 I0.0 J8.
N0550 G01 Y100.
N0560 G02 X60. Y108. I8. J0.0
N0570 G01 X138.661
N0580 G03 X146.661 Y116. I0.0 J8.
N0590 G01 Z-7.0009
N0600 G00 Z10.
N0610 X138. Y61.4891
N0620 Z-2.0004
N0630 G01 Z-5.0004
N0640 Y64.
N0650 G03 X130. Y72. I-8. J0.0
N0660 I0.0 J-22.
N0670 G01 X129.5189 Y71.9947 Z-5.2782
N0680 X129.038 Y71.979 Z-5.556
N0690 X128.5575 Y71.9527 Z-5.8338
N0700 X128.0778 Y71.9159 Z-6.1117
N0710 X127.599 Y71.8686 Z-6.3895
N0720 X127.1213 Y71.8108 Z-6.6673
N0730 X126.645 Y71.7427 Z-6.9451
N0740 X126.1703 Y71.6641 Z-7.2229
N0750 X125.6974 Y71.5752 Z-7.5007
N0760 X125.2266 Y71.4759 Z-7.7785
N0770 X124.7581 Y71.3664 Z-8.0563
N0780 X124.292 Y71.2466 Z-8.3341
N0790 X123.8288 Y71.1167 Z-8.6119
N0800 X123.3684 Y70.9767 Z-8.8897
N0810 X122.9113 Y70.8267 Z-9.1675
N0820 X122.4575 Y70.6667 Z-9.4453
N0830 X122.0073 Y70.4968 Z-9.7231
N0840 X121.561 Y70.3171 Z-10.0009
N0850 G03 I8.439 J-20.3171
N0860 X117.2417 Y59.8603 I3.0687 J-7.388
N0870 G01 X118.2048 Y57.5415
N0880 Z-7.0009
N0890 G00 Z10.
N0900 G00 X30. Y-8. S3000 M03

N0910 Z10.
N0920 Z8.
N0930 G01 Y-7.9015 Z6.7485 F270.
N0940 Y-7.6085 Z5.5279
N0950 Y-7.1281 Z4.3681
N0960 Y-6.4721 Z3.2977
N0970 Y-5.6569 Z2.3431
N0980 Y-4.7023 Z1.5279
N0990 Y-3.6319 Z.8719
N1000 Y-2.4721 Z.3915
N1010 Y-1.2515 Z.0985
N1020 Y0.0 Z0.0
N1030 Y100.
N1040 X0.0
N1050 Y0.0
N1060 X30.
N1070 X31.2515 Z.0985
N1080 X32.4721 Z.3915
N1090 X33.6319 Z.8719
N1100 X34.7023 Z1.5279
N1110 X35.6569 Z2.3431
N1120 X36.4721 Z3.2977
N1130 X37.1281 Z4.3681
N1140 X37.6085 Z5.5279
N1150 X37.9015 Z6.7485
N1160 X38. Z8.
N1170 G00 Z10.
N1180 X200. Y-8.
N1190 Z8.
N1200 G01 Y-7.9015 Z6.7485
N1210 Y-7.6085 Z5.5279
N1220 Y-7.1281 Z4.3681
N1230 Y-6.4721 Z3.2977
N1240 Y-5.6569 Z2.3431
N1250 Y-4.7023 Z1.5279
N1260 Y-3.6319 Z.8719
N1270 Y-2.4721 Z.3915
N1280 Y-1.2515 Z.0985
N1290 Y0.0 Z0.0
N1300 Y100.
N1310 X60.
N1320 Y0.0
N1330 X200.
N1340 X201.2515 Z.0985
N1350 X202.4721 Z.3915
N1360 X203.6319 Z.8719
N1370 X204.7023 Z1.5279
N1380 X205.6569 Z2.3431
N1390 X206.4721 Z3.2977

N1400 X207.1281 Z4.3681
N1410 X207.6085 Z5.5279
N1420 X207.9015 Z6.7485
N1430 X208. Z8.
N1440 G00 Z10.
N1450 X137.9938 Y80.3141
N1460 Z8.
N1470 G01 X137.8954 Y80.3102 Z6.7485
N1480 X137.6026 Y80.2987 Z5.5279
N1490 X137.1226 Y80.2798 Z4.3681
N1500 X136.4671 Y80.2541 Z3.2977
N1510 X135.6525 Y80.2221 Z2.3431
N1520 X134.6987 Y80.1846 Z1.5279
N1530 X133.6291 Y80.1426 Z.8719
N1540 X132.4702 Y80.0971 Z.3915
N1550 X131.2505 Y80.0491 Z.0985
N1560 X130. Y80. Z0.0
N1570 G03 I0.0 J-30.
N1580 G01 X128.7495 Y80.0491 Z.0985
N1590 X127.5298 Y80.0971 Z.3915
N1600 X126.3709 Y80.1426 Z.8719
N1610 X125.3013 Y80.1846 Z1.5279
N1620 X124.3475 Y80.2221 Z2.3431
N1630 X123.5329 Y80.2541 Z3.2977
N1640 X122.8774 Y80.2798 Z4.3681
N1650 X122.3974 Y80.2987 Z5.5279
N1660 X122.1046 Y80.3102 Z6.7485
N1670 X122.0062 Y80.3141 Z8.
N1680 G00 Z10.
N1690 M02
%

Ek-5. Doğrultuya Bağlı Hata Ölçümleri

Al7075 2 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	27	18	18
60	1	21	13
100	15	5	15
160	19	14	19
200	15	3	6

Al7075 7 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	20	3	12
60	5	6	5
100	3	2	6
160	17	21	18
200	7	14	9

Al7075 12 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	19	0	11
60	8	15	5
100	18	5	8
160	18	21	15
200	9	16	2

Al7075 17 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	19	23	13
60	12	5	11
100	15	12	9
160	17	17	18
200	15	10	12

Al7075 22 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	8	5	10
60	4	13	11
100	13	8	11
160	10	12	8
200	6	13	10

Al7075 27 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	15	19	17
60	6	8	11
100	5	10	9
160	15	5	15
200	4	0	9

Al7075 32 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	14	24	12
60	1	6	9
100	14	19	9
160	11	21	11
200	6	9	4

Al7075 37 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	7	15	13
60	4	12	14
100	5	23	13
160	27	14	11
200	0	11	13

Al7075 42 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	19	8	12
60	5	16	6
100	15	17	12
160	21	11	9
200	5	19	14

St4140 2 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
0	5	17	11
60	24	18	8
100	10	15	9
160	16	17	17
200	10	14	11

St4140 7 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	14	19	13
60	12	16	9
100	18	22	10
160	17	12	11
200	16	12	9

St4140 12 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	9	11	17
60	12	13	17
100	15	9	16
160	13	11	15
200	13	15	20

St4140 17 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	12	13	18
60	16	12	17
100	17	11	9
160	11	9	14
200	13	15	19

St4140 22 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	11	12	10
60	8	8	11
100	10	9	8
160	11	10	12
200	9	11	10

St4140 27 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	18	16	12
60	12	17	11
100	14	12	9
160	5	11	16
200	16	18	12

St4140 32 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	11	18	9
60	19	10	12
100	19	14	12
160	15	12	13
200	17	13	19

St4140 37 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	20	17	22
60	16	17	20
100	18	16	12
160	10	12	17
200	23	24	18

St4140 42 °C hata miktarı(μm)			
Ölçüm Noktaları(mm)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
30	17	15	19
60	17	14	20
100	17	16	21
160	14	19	21
200	21	19	22

Ek-5. Sıcaklığa Bağlı Hata Ölçümleri

Al7075 Hata miktarı(μm)(30mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
2	27	18	18
7	20	3	12
12	19	0	11
17	19	23	13
22	8	5	10
27	15	19	17
32	14	24	12
37	7	15	13
42	19	8	12

Al7075 Hata miktarı(μm)(60mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
2	1	21	13
7	5	6	5
12	8	15	5
17	12	5	11
22	4	13	11
27	6	8	12
32	1	6	9
37	4	12	14
42	5	16	6

Al7075 Hata miktarı(μm)(100mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
2	15	5	15
7	3	2	6
12	18	5	8
17	15	12	9
22	13	8	11
27	5	10	9
32	14	19	10
37	5	23	13
42	15	17	12

Al7075 Hata miktarı(μm)(160mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
2	19	14	19
7	17	21	18
12	18	21	15
17	17	17	18
22	10	12	8
27	15	5	15
32	11	21	12
37	27	14	11
42	21	11	9

Al7075 Hata miktarı(μm)(200mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
2	15	3	6
7	7	14	9
12	9	16	2
17	15	10	12
22	6	13	10
27	4	0	9
32	6	9	4
37	0	11	13
42	5	19	14

St4140 Hata miktarı(μm)(30mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
2	5	17	11
7	14	19	13
12	9	11	17
17	12	13	18
22	11	12	10
27	18	16	12
32	11	18	9
37	20	17	22
42	17	15	19

St4140 Hata miktarı(μm)(60mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
2	5	17	11
7	14	19	13
12	9	11	17
17	12	13	18
22	11	12	10
27	18	16	12
32	11	18	9
37	20	17	22
42	17	15	19

St4140 Hata miktarı(μm)(100mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
2	10	15	9
7	18	22	10
12	15	9	16
17	17	11	9
22	10	9	8
27	14	12	9
32	19	14	12
37	18	16	12
42	17	16	21

St4140 Hata miktarı(μm)(160mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3.Ölçüm
2	16	17	17
7	17	12	11
12	13	11	15
17	11	9	14
22	11	10	12
27	5	11	16
32	15	12	13
37	10	12	17
42	14	19	21

St4140 Hata miktarı(μm)(200mm)			
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
2	10	14	11
7	16	12	9
12	13	15	20
17	13	15	19
22	9	11	10
27	16	18	12
32	17	13	19
37	23	24	18
42	21	19	22

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Şaban Murat ÜNLÜ
 Uyuşu: Türkiye (TC)
 Doğum Tarihi ve Yeri: 20 Ağustos 1982, Kayseri
 Medeni Durumu: Evli
 Tel: +90 352 207 66 66/32081
 Fax: +90 352 437 57 84
 email: smunlu@erciyes.edu.tr
 Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Müh. Böl.
 Melikgazi/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	EÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü	2008
Lisans	EÜ Müh. Fak. Makine Müh	2005
Lise	Kılıçaslan Lisesi, Kayseri	2000

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2009- Halen	Erciyes Üniversitesi Müh. Fak Mak. Müh. Böl	Arş. Gör.
2006–2009	Ergül Mobilya	Üretim Müh.

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

- 1- Topal E.S., Ünlü Ş.M., "Milling Operations, Applications And Industrial Effects in Mechanical Engineering Theory and Applications, Topal E.S, Ünlü Ş.M., Eds., NOVA Publications , New York, pp.275-284-, 2013
- 2- Doğan M., Ünlü Ş.M., "Flame Retardant Effect Of Boron Compounds On Red Phosphorus Containing Epoxy Resins", POLYMER DEGRADATION AND STABILITY, vol.99, pp.12-17, 2014
- 3- Ünlü Ş.M., Doğan Ş.D., Doğan M., "Comparative Study Of Boron Compounds And Aluminum Trihydroxide As Flame Retardant Additives In Epoxy Resin", POLYMERS FOR ADVANCED TECHNOLOGIES, vol.25, pp.769-776, 2014
- 4- Seyhoglu H. , Dike A.S., Ünlü Ş.M., Çevik A., Doğan M., "Mechanical Properties Of Woven Fabric Reinforced All-Polypropylene Composites", POLYMER-PLASTICS TECHNOLOGY AND ENGINEERING, vol.53, pp.365-370, 2014