

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**CNC TEZGÂHLARINDA YAZI VE DESENLERİN 3 BOYUTLU  
KARMAŞIK YÜZEYLERE AKTARILMASI**

**MELİH KUNCAN**

**KOCAELİ 2017**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

CNC TEZGÂHLARINDA YAZI VE DESENLERİN 3 BOYUTLU  
KARMAŞIK YÜZEYLERE AKTARILMASI

MELİH KUNCAN

Prof. Dr. H. Metin ERTUNÇ  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir CENGİZ  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Selçuk KIZIR  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
Doç. Dr. Durmuş KARAYEL  
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi  
Doç. Dr. Fevzi HANSU  
Jüri Üyesi, Siirt Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 08.08.2017

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Bu tez Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın desteğiyle Kocaeli Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü ve Kesit Makine ve Metal Sanayi Ticaret Ltd. Şti. ortaklığıyla 0577.STZ.2013-2 kodlu "5 EKSEN CNC LASTİK KALIBI DESEN MAKİNESİNİN TASARIMI VE İMALATI" isimli SANTEZ projesi kapsamında hazırlanmıştır. Ürün ile ilgili elde edilen tüm resimler Kesit Makine Ltd. Şti. izni ile teze eklenmiştir ve bu resimler izinsiz kullanılamaz, kopyalanamaz ve çoğaltılamaz.

Lisans öğrenim süremde yaptığı yönlendirmeler başta olmak üzere, bu tez çalışmamın tüm aşamalarında gösterdiği destekler ve ilgisi için değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. H. Metin ERTUNÇ'a teşekkür ederim. Ayrıca, değerli çalışma arkadaşım Kaplan KAPLAN'a desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim. Tez çalışmasının tüm aşamalarında CNC konularındaki tecrübelerini ve bilgilerini benimle paylaşarak doktora çalışmama katkı sağlayan başta Selim KÜÇÜKATEŞ ve Mehmet BAYRAKTUTAR olmak üzere tüm Turkuaz Elektromekanik Sis. Ltd. Şti. firma çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak hayatım boyunca desteklerini bir an olsun esirgemeyen ve beni bugünlere getiren annem, babam ve kardeşlerime sonsuz minnet duygularımı sunarım. Ayrıca her zaman manevi desteğini hissettiğim eşim ve oğluma da teşekkürü bir borç bilirim. Onların dua ve desteklerinin hayatımdaki başarılarla önemli katkıları olduğu inancındayım.

Ağustos – 2017

Melih KUNCAN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET .....	viii
ABSTRACT .....	ix
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	4
2. PROTOTİPİ YAPILAN CNC’NİN MEKANİK TASARIMI MEKANİK ANALİZİ VE MEKANİK İMALATI.....	16
2.1. Prototipi Yapılan CNC’nin Mekanik Tasarımı .....	16
2.2. Tasarımı Yapılan CNC’nin Mekanik Analizleri .....	22
2.3. Prototipi Gerçekleştirilen CNC’nin Mekanik İmalatı .....	30
2.4. Prototipi Gerçekleştirilen CNC’de Kullanılan Ekipmanlar ve Malzemeler.....	40
3. PROTOTİP CNC MAKİNESİNİN YAZILIM ÇALIŞMASI.....	48
3.1. CAD-CAM Sistemleri.....	48
3.1.1. CNC koordinat sistemleri.....	54
3.1.2. Autocad DXF veri formatı ve NC formatı .....	58
3.2. Prototipi Yapılan CNC’nin Matematiksel Modeli ve Yazılımı .....	64
4. DENEYSEL UYGULAMALAR .....	85
4.1. Prototipi Gerçekleştirilen CNC’de Yapılan Örnek Uygulamalar .....	88
4.2. Alınan Sonuçlardaki Başarı Oranları .....	93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	94
KAYNAKLAR .....	97
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	102
ÖZGEÇMİŞ .....	105

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	1950'lerde üretilen ilk NC freze tezgâhının görüntüsü .....	5
Şekil 1.2.	Cha-Soo Jun ve arkadaşlarının geliştirmiş olduğu akış şeması .....	8
Şekil 1.3.	Lartigue ve arkadaşlarının yapmış oldukları örnek uygulama görüntüsü.....	9
Şekil 1.4.	Wen-Feng Gan ve diğ. geliştirmiş olduğu temel düzlem metodu ile ISFC metodunun 3 farklı yüzey için karşılaştırılma görüntüleri .....	10
Şekil 1.5.	İki farklı metot için, köşelerdeki takım yolu karşılaştırılma görüntüleri.....	11
Şekil 1.6.	Huan Zhao ve diğ. önerdikleri iki farklı metot için, takım yolu parametrelerinin karşılaştırılma görüntüleri .....	11
Şekil 1.7.	Huan Zhao ve arkadaşlarının kullandığı 3 eksenli deney düzeneğinin görüntüsü .....	12
Şekil 1.8.	Lineer ve yumuşatılmış takım yolları boyunca hareket kontrolünün deneysel sonuçları .....	12
Şekil 1.9.	Lineer ve yumuşatılmış takım yolları boyunca hareket kontrolünün deneysel sonuçlarının görüntüsü .....	13
Şekil 1.10.	Nokta bulutları ile gösterilmiş bir resmin önerilen metot ile (B-spline) yüzeylere dönüştürülmesine ait görüntüler.....	13
Şekil 1.11.	Sistem çalışmasının şematik akış diyagramı .....	15
Şekil 2.1.	Taslak ön mekanik tasarım görüntüsü .....	16
Şekil 2.2.	İyileştirilmiş mekanik tasarım görüntüsü .....	17
Şekil 2.3.	İyileştirilmiş mekanik tasarımın farklı açılardan görüntüleri.....	18
Şekil 2.4.	Prototipin farklı açılardan mekanik tasarım görüntüleri .....	20
Şekil 2.5.	Prototipin çeşitli açılardan mekanik tasarım görüntüleri .....	21
Şekil 2.6.	(a). Döküm açılı nervürlü (b). çevre nervürlü (c). döküm düz nervürsüz (d). sac konstrüksiyon malzemeler ile oluşturulan tabla çizimleri .....	22
Şekil 2.7.	Döner tablanın çeşitli sehim analiz görüntüleri .....	23
Şekil 2.8.	En iyi sehim miktarı elde edilen tablanın bazı sehim analiz görüntüleri .....	24
Şekil 2.9.	Mekanik tasarımın bilgisayar ortamındaki bazı titreşim analiz görüntüleri .....	27
Şekil 2.10.	Mekanik tasarımın bilgisayar ortamındaki bazı yükleme analiz görüntüleri .....	28
Şekil 2.11.	Mekanik tasarımın bilgisayar ortamındaki çeşitli yükleme analiz görüntüleri .....	29
Şekil 2.12.	(a). Mekanik imalat için tasarım kriterlerinin belirlendiği bazı görüntüleri (b). mekanik imalat için tasarım kriterlerinin belirlendiği patlatılmış görüntüsü.....	32
Şekil 2.13.	Prototip makinenin mekanik gövde imalatından bazı görüntüler.....	33
Şekil 2.14.	Mekanik imalatın çeşitli açılardan alınmış bazı görüntüleri.....	34
Şekil 2.15.	Mekanik imalatın bazı aşamalarının kesit görüntüleri.....	35

Şekil 2.16. Mekanik imalat aşamalarının görüntüleri .....	36
Şekil 2.17. Döner tabla imalatı aşamalarının görüntüleri .....	36
Şekil 2.18. Otomatik takım değiştirme aparatının bazı mekanik imalat görüntüleri .....	37
Şekil 2.19. (a). Spindle motor yuvasının üst mekanik imalat görüntüleri (b). spindle motor yuvasının üst mekanik imalat görüntüleri .....	38
Şekil 2.20. Spindle motor yuvasının bazı mekanik imalat görüntüleri .....	38
Şekil 2.21. Mekanik imalat aşamalarından bazı görüntüler .....	39
Şekil 2.22. Kızaklar ve sonsuz vidalardan bazı görüntüler .....	40
Şekil 2.23. Esnek kablo kanal görüntüleri .....	41
Şekil 2.24. Prototip CNC’de kullanılan Y eksen motorların farklı açılardan görüntüleri .....	41
Şekil 2.25. Prototip CNC’de kullanılan Z eksen motorun farklı açılardan görüntüleri .....	42
Şekil 2.26. Prototip CNC’de kullanılan A eksen motor görüntüleri .....	43
Şekil 2.27. Prototip CNC’de kullanılan C eksen motor görüntüleri .....	44
Şekil 2.28. Prototip CNC’de kullanılan spindle motor görüntüleri .....	44
Şekil 2.29. Prototip CNC’de kullanılan takım değiştirme motor görüntüleri .....	45
Şekil 2.30. Motor sürücüleri ve pano iç görüntüleri .....	46
Şekil 3.1. Küresel koordinat sistemi kesit görüntüsü .....	54
Şekil 3.2. CNC tezgâhında kullanılan temel eksenlerin gösterimleri .....	56
Şekil 3.3. Koordinat düzleminde sağ-el kuralı gösterimi .....	57
Şekil 3.4. Rastgele alınmış bir çizimin DXF formatındaki ifadesi .....	63
Şekil 3.5. Örnek bir yay çiziminin DXF formatındaki ifadesi .....	64
Şekil 3.6. CNC makinenin çalışma eksenlerinin gösterimi .....	65
Şekil 3.7. CNC makinenin hareket eksenlerinin gösterimi .....	66
Şekil 3.8. Matematiksel dönüşüm yazılımı akış diyagramı gösterimi .....	68
Şekil 3.9. DXF çizme yönüne göre çizgi veya yay parçalarına baş son nokta ataması .....	69
Şekil 3.10. Zincir akış diyagramı .....	70
Şekil 3.11. CNC makinesi genel akış diyagram gösterimi .....	71
Şekil 3.12. Örnek bir DXF yanak profili görüntüsü .....	73
Şekil 3.13. Matematiksel dönüşüm algoritması arayüz gösterimleri .....	76
Şekil 3.14. (a). DXF uzantılı dosya (b). NC uzantılı dosya (c). dönüştürülmüş NC uzantılı dosya gösterimleri .....	77
Şekil 3.15. Bezier noktaları gösterimi .....	78
Şekil 3.16. Dört ve yedi nokta ile tanımlanmış Bezier eğrilerinin gösterimleri .....	80
Şekil 3.17. İkinci derece b-spline gösterimleri .....	81
Şekil 3.18. Kübik uniform b-spline yapılanması gösterimleri .....	82
Şekil 4.1. Prototipi gerçekleştirilen CNC makinesinin prototip imalat aşama görüntüleri .....	85
Şekil 4.2. Prototipi gerçekleştirilen CNC makinesinin prototip imalat aşamaları görüntüleri .....	86
Şekil 4.3. (a). CNC makinesinin prototip ön görünüşü (b). CNC makinesinin prototip nihai görüntüsü .....	87
Şekil 4.4. Tahta yüzey üzerine işlenen örnek karakter görüntüleri .....	88
Şekil 4.5. Çelik yüzey üzerine işlenen örnek karakter görüntüleri .....	89
Şekil 4.6. Örnek CAD/CAM çizimi gösterimleri .....	90

Şekil 4.7. Arayüz ile elde edilen çıktı görüntüsü .....	90
Şekil 4.8. CNC tezgâhı ile işlenen örnek karakter görüntüsü .....	90
Şekil 4.9. Örnek bir motosiklet lastik kalıp tasarımı için CAD/CAM çizim görüntüleri .....	91
Şekil 4.10. Prototip CNC makine ile örnek kalıp ve karakter işleme görüntüleri .....	91



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Aynı yük ve farklı malzemeler altında oluşan sehîm uzunlukları .....	25
Tablo 2.2. Tabla ve Köprü parçaları için belirlenen analiz parametreleri .....	26
Tablo 2.3. Y eksen motoru özellikleri.....	41
Tablo 2.4. Z eksen motoru özellikleri .....	42
Tablo 2.5. A eksen motoru (Spindle motoru döndüren motor) özellikleri.....	43
Tablo 2.6. C eksen motoru (Döner tabla motoru) özellikleri.....	44
Tablo 2.7. Spindle motor özellikleri .....	45
Tablo 2.8. Takım değiştirme motor özellikleri .....	45
Tablo 3.1. CNC makinenin D-H parametreleri.....	66



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A_{ib}$	: i'inci yay başlangıç açısı, (derece)
$A_{is}$	: i'inci yay bitiş açısı, (derece)
$C_i$	: i'ninci noktadaki yay uzunluğu, (mm)
$L_i$	: i'ninci noktadaki çizgisel uzunluk, (mm)
$L_t$	: CNC makinesinde kullanılan uç işlevci takım boyu, (mm)
$n$	: parça sayısı
$R_{im}$	: i'inci yay yarıçap uzunluğu, (mm)
$X_{ib}$	: X eksenini i'inci çizgi veya yay uzunluğunun başlangıç noktası koordinatı
$X_{im}$	: i'inci yay merkezi X noktası koordinatı
$X_{is}$	: X eksenini i'inci çizgi veya yay uzunluğunun bitiş noktası koordinatı
$X_{nc}$	: Yüzey için NC dosyasından alınan X koordinatı
$Y_{ib}$	: Y eksenini i'inci çizgi veya yay uzunluğunun başlangıç noktası koordinatı
$Y_{im}$	: i'inci yay merkezi Y noktası koordinatı
$Y_{is}$	: Y eksenini i'inci çizgi veya yay uzunluğunun bitiş noktası koordinatı
$Y_{nc}$	: Yüzey için NC dosyasından alınan Y koordinatı
$Z_{im}$	: i'inci yay merkezi Z noktası koordinatı
$Z_{nc}$	: Yüzey için NC dosyasından alınan Z koordinatı
$\mu m$	: Mikro metre

### Kısaltmalar

APT	: Automatically Programmed Tools (Otomatik Programlama Araçları)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	: Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
CAPP	: Computer Aided Process Planning (Bilgisayar Destekli Proses Planı)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Nümerik Kontrol)
d/d	: Devir/Dakika
DXF	: Drawing Interchange Format (Çizim Değiştirme Formatı)
NC	: Numerical Control (Nümerik Kontrol)
MIT	: Massachusetts Institute Technology (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü)
ROM	: Read Only Memory (Sadece Hafızayı Oku)
ISFC	: Improved Space-Filling Curve (Geliştirilmiş Boşluk Doldurma Eğrisi)

## CNC TEZGÂHLARINDA YAZI VE DESENLERİN 3 BOYUTLU KARMAŞIK YÜZEYLERE AKTARILMASI

### ÖZET

CNC (Computer Numerical Control) tezgâhlar, yüksek hassasiyet ve hızlı işlem kabiliyetlerine sahip olup konvansiyonel tezgâhların optimize edilmesi sonucu ortaya çıkan makineler olarak bilinir. Bu üstünlüklerinden dolayı, günümüzde çeşitli sanayi imalat sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Bu tez çalışması kapsamında, düz yüzeylerin yanı sıra eğrisel yüzeylere de işleme yapabilen, lazer kesimli saçların kaynaklı konstrüksiyon işlemiyle birleştirilmesi sonucu gövdenin kütlesi azaltılarak rijitlik oranı artırılmış ve döner tablada döküm imalat işlemlerinin uygulanması sonucunda makinedeki titreşim oranları minimize edilen prototip bir CNC makine imal edilmiştir. Mevcut CNC makinelerden farklı olarak, operatör tarafından kolaylıkla kullanılabilen ve özel olarak geliştirilen C# tabanlı matematiksel dönüşüm algoritmasını kullanarak özgün NC takım yolu oluşturma kabiliyetine sahip ve hassasiyet oranı yüksek olan yeni bir CNC makinenin tasarımı yapılmış ve Turkuaz-Kesit Makine adlı firmaların da destekleriyle prototip uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Prototip makinenin çıktıları üzerinde yapılan kumpas ve komparatör ölçüm testleri sonucunda işlemenin neredeyse hatasız bir şekilde gerçekleştiği gözlenmiştir. Yapılan karşılaştırma ve değerlendirmelerde teorik sonuçlarla pratik sonuçların büyük oranda örtüştüğü ve işlenen örnek bir parçanın Ra değerinin (yüzey pürüzlülüğü) 1,2 µm civarında ve yüzey kalitesinin ise N7 serisine karşılık geldiği sonucuna varılmıştır.

Yerli ürün olarak ülkemizde ilk defa prototipi gerçekleştirilen ve üniversite-sanayi işbirliği açısından büyük öneme sahip olan bu CNC tezgâhın başta lastik kalıbı işleme sanayisinde olmak üzere ayakkabı taban kalıplarının işlenmesi, medikal sektöründeki protez imalatı, havacılık, otomotiv, kuyumculuk sektörü vb. yerlerde yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Ayrıca ürünün ithal muadilinin güncel değeri ortalama 1,7 Milyon TL (400000 Euro) civarında iken, ülkemizde ilk defa imal edilen ve özgün yazılıma sahip olan bu ürünün yaklaşık piyasa değeri 2017 yılı itibari ile 1 Milyon TL'dir.

Satış maliyeti, kullanım kolaylığı, işlevselliği, hızlı servis ağı ve yedek parça maliyetleri gibi avantajları göz önüne alındığında yakın gelecekte başta ülkemizin çeşitli sanayi sektörleri olmak üzere, dünya genelinde geniş bir kullanım alanına sahip olabileceği ve ilerleyen zamanlarda ihracat açısından milli sermayeye önemli katkıları olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** CNC Makine, NC Takım Yolu, Karmaşık Yüzey İşleme, Lastik Yanak İşleme.

## **TRANSFERRING OF FONTS AND PATTERNS TO COMPLEX 3D SURFACES IN CNC MACHINE TOOLS**

### **ABSTRACT**

CNC (Computer Numerical Control) machines having high precision and fast processing abilities are kind of conventional machines which are well optimized. Due to their advantage, they now have a wide range of applications in various industrial manufacturing sectors.

In the scope of this thesis, the prototype CNC machine which can process the curved surfaces as well as the flat surfaces, was produced. It has mainly a rotary table, which was produced by casting manufacturing process, and a body that is increased the stiffness ratio by reducing the mass using the laser cut sheet. Unlike existing CNC machines, a new CNC machine with the ability to create an innovative NC tool path and a high precision ratio has been designed using a specially developed C # based mathematical transformation algorithm that can be easily used by an operator. The prototype machine was carried out with the support of both Turkuaz Company and Kesit Makine Company.

As a result of the caliper and comparator measurement tests on the prototype machine's outputs, it has been observed that the machining process can be performed almost without error. In the comparison and the evaluations made, the theoretical results and practical results overlap well. The machined sample examined that its surface roughness (Ra value) is around 1,2  $\mu\text{m}$  and its surface quality corresponds to the N7 series.

This CNC machine is prototyped for the first time in our country as a domestic product and has a great importance in terms of university-industry cooperation. It can be mainly used mold processing industry, for example, shoe sole molds and different sectors such as medical, aerospace, automotive, jewelry and so on. Moreover, this product, which is designed and produced domestically with its original software, is approximately 1 million TL in 2017 while the current value of the product's import counterpart is approximately 1,7 million TL (400000 Euro).

Considering the advantages such as the cost of sales, ease of use, functionality, fast service network and spare part costs, it is expected that it will be widely used our country firstly, and then, around the world in the near future. As a result of export of this machine, it is projected that it will make a significant contribution of national capital.

**Keywords:** CNC Machine, NC Tool Path, Machining of Complex Surfaces, Tire Mold Processing.

## GİRİŞ

Bilim ve teknolojinin hızlı gelişmesi ile çok sayıda endüstriyel ürün ortaya çıkmış ve beraberinde farklı alanlarda yeniliklere ve yeni uygulamalara ihtiyaç doğmuştur. Bu durum yenilik ve yeni uygulamaların gelişmesine katkı sağlamıştır. Başta sanayi uygulamaları olmak üzere, günümüz imalat sektörünün vazgeçilmezi durumundaki CNC tezgâhlar üzerine çalışmalar giderek artmıştır. CNC (Computer Numerical Control) tezgâhlar, konvansiyonel tezgâhların optimize edilmesi sonucu ortaya çıkan makineler olarak ifade edilebilir. Yüksek hassasiyet ve hızlı işlem özelliklerinden dolayı, günümüz imalat sektöründe CNC'ler çok yaygın bir kullanım alanına sahiptirler.

Bu tez çalışması kapsamında CNC lastik kalıbı işleme makine tasarımı, imalatı ve özgün NC takım yolu oluşturulması işlemleri gerçekleştirilmiştir. CNC tezgâhın tasarım aşamasında köprü tasarım modeli belirlenerek hem daha rijit hem de işleme sırasında oluşabilecek titreşimleri en az indirgenmesi hedeflenmiştir. Tez konusu prototip CNC tezgâh bu yönüyle mevcut CNC'lerden biraz daha farklı bir tasarım modeli ile hassas işleme yapma özelliğinin kazandırılması amaçlanmıştır. Ayrıca imalat aşamasında tasarım esasları baz alınarak belirlenen parça imatları özenli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. CNC tezgâhın döner tabla kısmı, yapılan analizler sonrasında döküm gövde olarak imal edilmiş olup titreşim sönümlenme konusunda avantaj sağladığı düşünülmektedir. CNC tezgâh için gerekli diğer parça imatları kaynaklı imalat yöntemleri, lazer kesim ve CNC tezgâhlarda işlenerek gerçekleştirilmiştir. İmalat aşamasında, lazer kesimli saçların kaynaklı konstrüksiyon ile birleştirilmesi esasına göre tasarlanan gövdede yapılan titreşim analizlerinde titreşim genliğinin en fazla olduğu yerlerde boşaltmalar yapılmıştır. Yapılan bu boşaltma işlemleri sonucunda daha hafif bir yapı elde edilmiştir. Çalışmanın bir diğer aşaması olarak özgün bir yazılım çalışması gerçekleştirilmiştir. Yazılım çalışması için öncelikle mevcut tezgâhlar akademik ve endüstriyel olarak incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda yazılım için matematiksel dönüşüm algoritmasının gerçekleştirilme çalışmasına başlanmıştır. Geliştirilen matematiksel dönüşüm

algoritması bilgisayar ortamında yazılıma entegre edilmiştir. Yazılım çalışması için, C# bilgisayar derleyicisinde tüketici, üretici, operatör vb. kişilerin rahatça kullanabileceği bir arayüz geliştirilmiştir. Bu işlemler sonucunda başta lastik sektörü olmak üzere birçok sektörde kullanılabilecek bir prototip CNC tezgâhı üretilmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen yazılım algoritması, imal edilen CNC tezgâh üzerinde gerçek zamanlı olarak test edilmiş ve sonuçları gözlenmiştir. Tez çalışmasına konu olan CNC tezgâhın proje paydaşı firma ile ortak olarak ülkemizde ilk defa yapılıyor olması hem sanayi hem de akademik anlamdan ülkemize yerli ürün olarak katkı sağladığı düşünülmektedir.

Tez çalışmasının bölümlere göre işlenmiş konuları aşağıda sıralanmıştır:

Bölüm 1’de CNC uygulamaları ve çalışma alanları hakkında genel bilgiler verilmiştir. Akademik ve sanayi alanında kullanılan endüstri uygulamaları hakkında çeşitli örnekler incelenmiş ve CNC işleme hakkında literatür araştırmasına yer verilmiştir.

Bölüm 2’de bilgisayar ortamında yapılan mekanik tasarımlar, mekanik analizler ve mekanik imalatlar hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’te bu tez çalışması için gerçekleştirilen, matematiksel algoritma ve özgün yazılım çalışması detaylı olarak anlatılmıştır.

Bölüm 4’te geliştirilen yazılım algoritmasının (özgün NC takım yolu oluşturulması), örnek materyaller için deneysel sonuçları gerçekleştirilmiştir. Prototip CNC tezgâhı üzerinde yapılan farklı uygulamalar için geliştirilen yöntem yorumlanmıştır.

Bölüm 5’te bu tez çalışması kapsamında elde edilen tüm çıktılar özet halinde sunularak genel bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca bundan sonra yapılabilecek çalışmalar ve gelecekteki çalışmalara yönelik iyileştirmeler hakkında fikirler sunulmuştur.

Bu çalışmanın önemli bir özelliği, ülkemizdeki üniversite-sanayi işbirliğinin verimli bir örneği olarak bir SAN-TEZ projesi kapsamında gerçekleştirilmesidir. Projenin sanayi tarafındaki ortağı makinenin imalatını üstlenirken, üniversite tarafında yer alan doktora çalışması kapsamında tasarım ve orijinal yazılımın başarıyla yerine getirilmesi amaçlanmıştır. Ülkemizde benzeri olmayan ve yaklaşık değeri 2017 yılı itibari ile 1 Milyon TL değerindeki kalıp işleme makinasının özünü oluşturan yazılım işlemi geniş

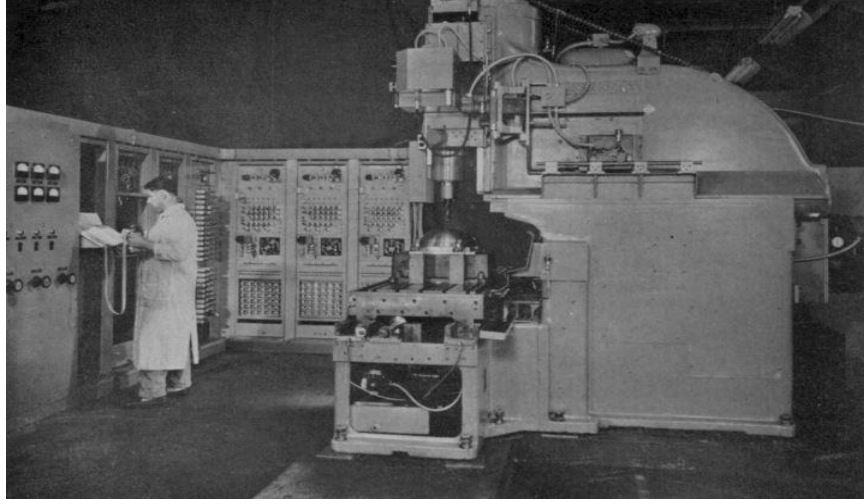
bir literatür araştırması ve teorik çalışmaların sonucunda gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, mevcut dxf (Drawing Interchange Format) ve nc (Numerical Control) dosyaları açılarak matematiksel algoritma ile yeni bir nc dosyası oluşturulmuş; bu işlem için matematiksel algoritma geliştirilmiştir. Bu sayede, ülkemizin en önemli alanlarından biri olan sanayi sektöründe kullanılacak yerli bir prototip CNC tezgâh uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı lastik kalıbı üzerine desen ve karakterlerin hassas bir şekilde işlenmesi işlemidir.



## 1. GENEL BİLGİLER

Gelişen teknolojik yeniliklerle birlikte birçok sistemde insan gücünün yerini teknolojik sistemler almaktadır. Teknolojik sistemlerin önem kazanması ile çok sayıda endüstriyel ürünler farklı alanlarda kullanılmak üzere ortaya çıkmıştır. Sanayi, savunma, sağlık, imalat vb. birçok sektörde yeni uygulamalara ihtiyaçlar doğmuştur. Bu kapsamda insanların ihtiyaç duyduğu tüketim malzemeleri otomasyon sistemleri yardımıyla daha kısa sürede, daha kaliteli, seri ve daha ucuza mal eden teknolojik araçlar tasarlanmıştır. Çeşitli alanlarda ortaya çıkan ihtiyaçlar doğrultusunda başta sanayi uygulamaları olmak üzere çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunların en başında, imalat sektöründeki yaygın uygulamalarından söz edebilir ve günümüz imalat sektörünün vazgeçilmezi durumundaki CNC tezgâhların üzerine çalışmaların arttığı görülmektedir.

CNC tezgâhlar, konvansiyonel tezgâhların optimize edilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Yüksek hassasiyet ve hızlı işlem özelliklerinden dolayı, imalat sektöründe CNC'ler çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar [1,2]. Sayısal (nümerik) kontrol fikri II. Dünya Savaşı'nın sonlarında ABD hava kuvvetlerinin ihtiyacı olan karmaşık uçak parçalarının üretimi için ortaya atılmıştır. Bu tür parçaların o günkü mevcut imalat tezgâhları ile üretilmesinin mümkün olmadığı belirtilmektedir. Bunun gerçekleştirilmesi için Parsons Corporation ve MIT (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü) ortak çalışmalara başlamıştır. 1952 yılında ilk olarak bir Cincinnati-Hydrotel freze tezgâhını sayısal kontrol ile donatarak bu alandaki ilk başarılı çalışmayı gerçekleştirdikleri belirtilmiştir. 1950'lerde yapılan ilk NC freze tezgâhı Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. 1950'lerde üretilen ilk NC freze tezgâhının görüntüsü [3]

Bu yıllardan sonra birçok takım tezgâhi üreticisi sayısal kontrollü tezgâh imalatına başlamıştır. Önceki yıllarda NC takım tezgâhlarında vakumlu tüpler, röleler, karışık kontrol ara yüzleri kullanılmaktaydı. Ancak bu ürünlerin sık sık tamirleri hatta yenilenmeleri gerekmektedir. Sonraki yıllarda NC takım tezgâhlarında daha kullanışlı olan minyatür elektronik tüp ve yekpare devreler kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişmesi sayısal kontrollü sistemleri de önemli ölçüde etkilemiştir. Son yıllarda artık NC tezgâhlarda daha yüksek düzeyde geliştirilmiş olan entegre devre ekipmanları, uygun fiyat ve güvenilir olan donanımlar kullanılmaktadır. ROM (Read Only Memory) teknolojisinin kullanılmaya başlanmasıyla da programların hafızada saklanması mümkün olmuştur. Yukarıda bahsedilen sistemli gelişmeler, CNC'nin ortaya çıkmasına öncülük etmiştir. CNC sonraki yıllarda torna, matkap vb. takım tezgâhlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [3-20].

CNC tezgâhlarının en çok kullanıldığı alanlarından birisi de kalıp imalatıdır. Geçmişte, döküm kalıp tasarımı, kalıp tasarımcıları veya teknisyenler tarafından deneme-yanılma yöntemi ile uygulandığından dolayı zor bir işleme süreci gerektirirken; günümüzde ise kalıp döküm imalatında, bilgisayar destekli mühendislik uygulamaları ile bu süreç göreceli olarak kolaylaşmıştır. Böylece kaliteyi artırmak, maliyeti düşürmek, kalıp tasarım sürecini hızlandırmak için simülasyon programlarının kullanımı yaygın hale gelmiştir. Bunun sonucu olarak, günümüzde kalıp imalatı, hassas CNC makineleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir [21].



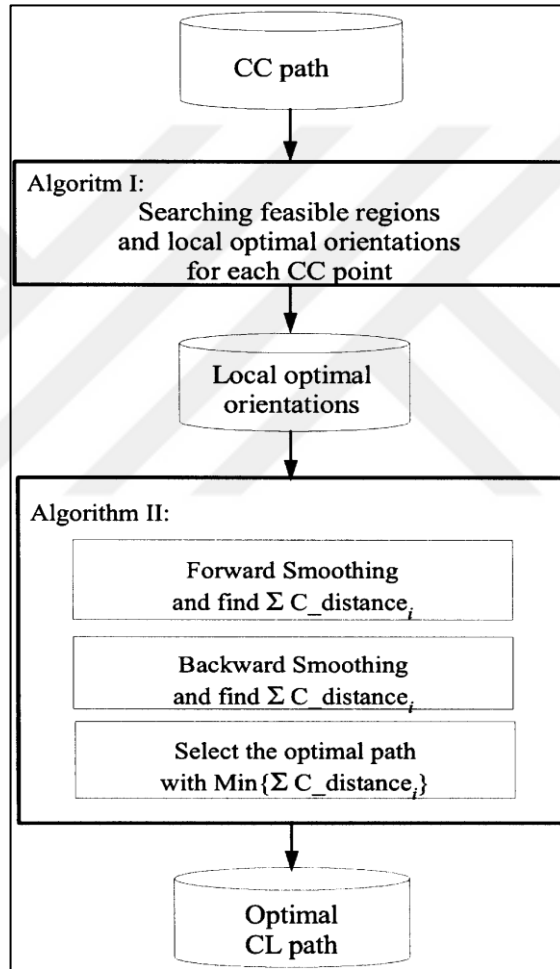
Endüstriyel uygulamalarda işlenmek istenen birçok kalıp yüzeyi, düzensiz (karmaşık) eğrilik yapılarına sahip olduğundan dolayı işlenebilmesi kolay değildir. Yüzeyler üzerindeki karmaşık eğrilik yapılarının artmasıyla, işlem ya da işlenebilirlik süresi de artmaktadır. Diğer taraftan gelişmiş kesme yoluna sahip CNC tezgâhlar kullanılarak, işlem zamanı %85'e kadar azaltılabilmektedir [22]. Kısaca ifade etmek gerekirse, gelişmiş kesme yoluna sahip CNC tezgâhlarının en önemli avantajları; daha iyi yüzey kalitesi, daha az işleme zamanı, düşük kurulum ve işletme maliyetidir [23]. Diğer taraftan; son 30 yıldır araştırmacıların en çok uğraştıkları konuların başında, daha iyi yüzey kalitesi elde edebilmek için kesme yolunun otomatik olarak en iyi şekilde belirlenmesi gelmektedir. Kaliteli ürünler elde etmek için en iyi işleme parametrelerin seçilmesi ve dış faktörlerden kaynaklı olumsuz etkilerinin en aza indirebilecek parametrelerin belirlenmesi bir başka dikkat edilmesi gereken husustur [24, 25].

Son yıllarda farklı alanlarda kalıp imalatında kullanılmak için; 3, 4, 5 eksen gibi çeşitli CNC makinelere olan ihtiyaç artmıştır. Ayrıca talaşlı şekil verme yöntemleri, havacılık sektörü, otomobil sektörü, sanayi, medikal protez sektörü, ayakkabı, lastik, kesici takım vb. kalıp imalatlarında, çok önem kazanmış olup bu uygulamaların birçoğu 5 eksenli CNC tezgâhlar ile mümkün olmaktadır. Yüksek hassas işleme için takım ucunun hatası da önemli bir parametredir. CNC takım ucu üzerinde oluşan hatalar, CNC tezgâhlarının karmaşık yapıları, üretim hatası, montaj hatası veya yarı statik hata sonucu kinematik parametre sapmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Makineler açısal hatalara karşı çok duyarlıdır. Bu tür hatalar sadece takım tezgâhının gerçek kinematik yapısıyla düzgün olarak tanımlanabilmektedir [26-32]. Mahbubur R. MD. ve diğ. [33] yazdıkları makalede, takım tezgâhı kinematik analizleri üzerine çalışmalarını yayınlamışlardır. Yeni eksen değerlerini sayarak, kesici konum verilerinden gelen hatalı eksenlerin numerik yineleme tekniğini kullanarak, takım ucunu istenen konuma ve yöne konumlandırmanın mümkün olabileceğini rapor etmişlerdir. Bir post-işlemede uyguladıkları yöntemleri sayesinde, kinematik hesaplamaların makinede online çalışmayı mümkün kıldıklarını belirtmişlerdir. Liang H. & Li X. [34] serbest formlu yüzeylerin üretiminde, serbest şekillendirilmiş yüzeylerin beş eksenli işlenmesinde takım yolu planlaması, takım ofseti ve ters kinematik CAM'den (Computer Aided Manufacturing) CNC'ye aktarılan STEP-NC standardına dayanan yeni bir CNC yapısı önermişlerdir. Yüzey işlemleri için 5 eksenli gerçek zamanlı

düzgün olmayan oransal B-spline tabanlı interpolasyon gerçekleştirmişlerdir. Bu teknolojilere dayalı olarak 5 eksenli bir CNC derleyici, görev koordinatörü, eksen grubu, PLC yazılımı içeren yazılım geliştirmişlerdir. CNC yazılım algoritmasını, eğri-döner tipli 5 eksen bir tezgâh üzerinde başarıyla frezeleme uygulaması için gerçekleştirmişlerdir. Lin Z. ve diğ. [35] 5 eksenli işleme için jenerik üniform taraklı takım yolu oluşturma yöntemi sunmuşlardır. Yerel yüzey geometrisi varsayımlarına dayanan geleneksel yöntemlerin aksine, bu yöntemde kesme simülasyonundan faydalanmışlardır. Kesici temas noktalarını, bir sonraki takım yolunu oluşturmak için birbirine bağlamışlardır. Bu sayede, tüm takım yollarını yinelemeli olarak oluşturmuşlardır. Bu yöntemin bir diğer göze çarpan özelliği ise, yerel yüzey geometrisi varsayımlarından yoksun olması ve bu nedenle de elde edilen takım yollarının daha hassas olmasıdır. Önerdikleri yöntemi birkaç serbest formlu yüzey örneğinde test etmişlerdir. Metodun uygulanabilirliğini de kesme deneyi ile doğrulamışlardır. Lin Z. ve diğ. [36] 5 eksenli CNC tezgâhlarda geleneksel olarak noktadan noktaya geçiş yönteminin aksine, örnek iş parçası yüzeyi için kabul edilebilir bir algoritma geliştirdiklerini belirtmişlerdir. Önerilen algoritma; örnekleme ve interpolasyon olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Bu algoritma ile yapılan testler sonucunda, algoritmanın tüm yüzeyi incelerken, nispeten hassas ve etkili olduğunu rapor etmişlerdir. Roth D. ve diğ. [37] kavisli yüzeylerin işlenmesi için 5 eksenli bir takım yolunu izleyen ve bir prop tarafından taranarak yüzeyin şeklini belirleme yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntem kullanılarak, 3 eksenli bir takım yolunun öngörülen sonuçları ve aynı takım yoluyla yapılmış bir parçanın ölçümleri ile 5 eksenli bir takım yolunun analitik sonuçları ve öngörülen sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sunulan yöntemin uygulanması basit, doğru, hızlı olduğunu, aynı zamanda 5 eksenli takım hareketleri için de uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Fan W. ve diğ. [38]  $G^3$  interpolasyon ve hareket planlama ile  $G01$  yörünge için, gerçek zamanlı takım yolu işleme yöntemini önermişlerdir. Çalışmalarını iki takım yolu üretimi ve hareket planlaması olmak üzere iki aşamadan oluşturmuşlardır. Takım yolu oluşturma aşamasında yüksek etkili algoritma olarak gösterdikleri kuadratik Bezier spline ve çizgi parçaları kullanarak  $G^3$  interpolatif takım yolunu üretmişlerdir. Hareket planlaması aşamasında,  $G^3$  takım yolu için sarsıntısız-kesintisiz ilerleme hızı planlama algoritması önermişlerdir. Uygulama olarak ticari bir tezgâh üzerinde işlemler yapmışlardır. Uyguladıkları algoritmanın  $G^2$  algoritmasına göre hem takım yolu

eğrilik, kontur hataları ve ilerleme hızı dalgalanmasını azalttığını hem de çapraz düzgünlüğü ve işleme verimliliğini artırdığını rapor etmişlerdir.

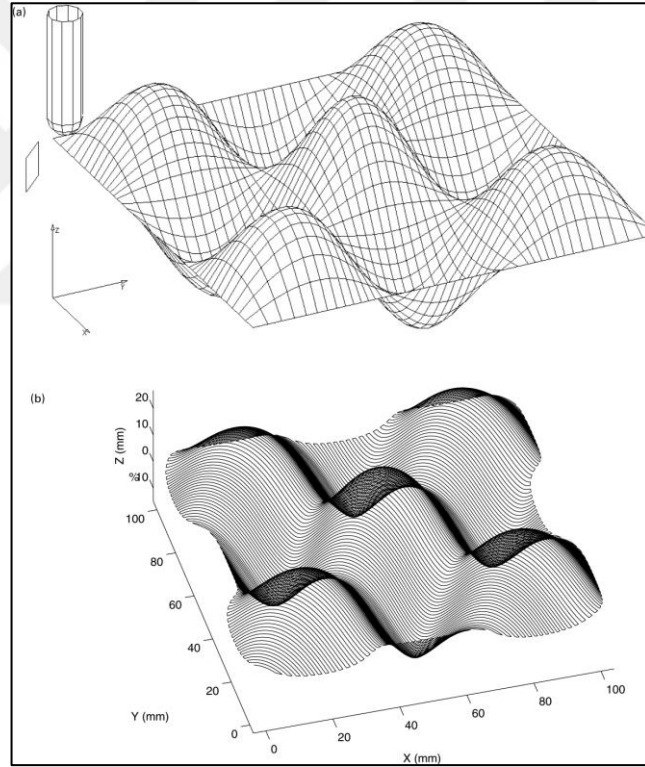
Cha-Soo Jun ve arkadaşları 5 eksen bir makine üzerinde çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, uzay arama metodu yöntemi kullanarak takım ucu oryantasyonunu optimizasyon çalışması ve takım ucu oryantasyonun 5 eksen heykel yüzey işleme için hassaslaştırma kontrol çalışması yapmışlardır [39]. Cha-Soo Jun ve arkadaşlarının geliştirdiği sistemin akış şeması Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Cha-Soo Jun ve arkadaşlarının geliştirmiş olduğu akış şeması [39]

B.S. So ve arkadaşları [40] 5 eksenli işleme hızını arttırmak için bir NC veri optimizasyon yaklaşımı çalışması yapmışlardır. Bu işlemi gerçekleştirmek takım ucu oryantasyonunu ve pozisyonlama işlemlerinde çok büyük hesaplamalar, takım ucu yörünge planlaması, çarpışmasız takım ucu yörüngesi oluşturması istediğinden ticari CAD (Computer Aided Design)/CAM (Computer Aided Manufacturing) programları

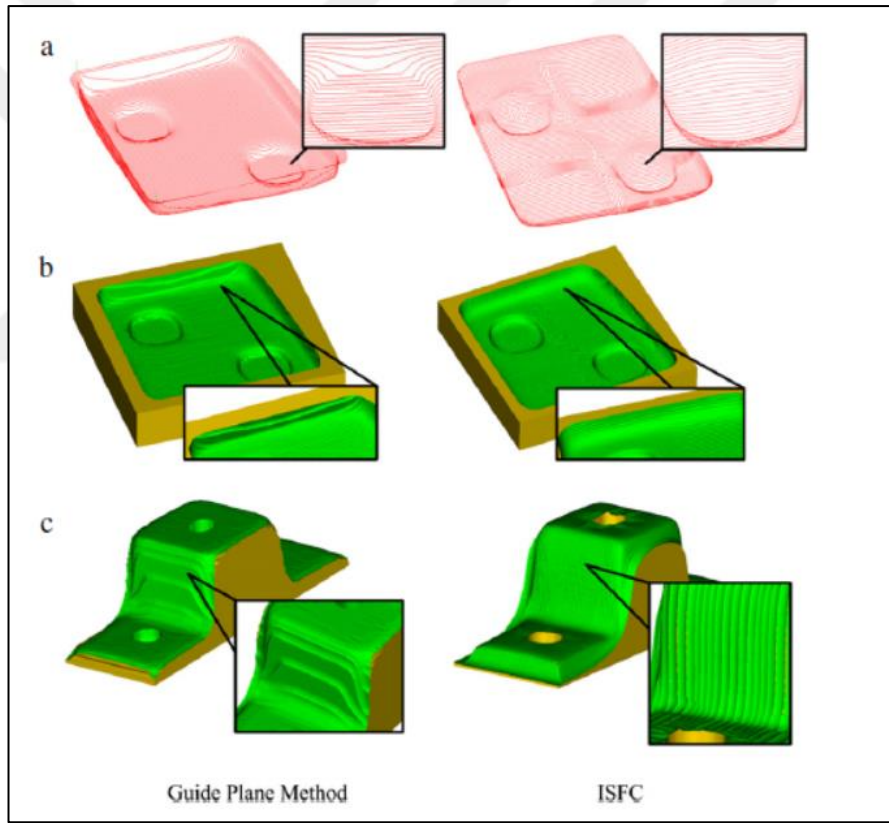
pahalıdır. Birçok ticari CAD/CAM sistemi işlenecek parça geometrisinin sadece karakteristiğini dikkate alır. Yani işlenecek parça için, farklı makinalar kullanılmasına rağmen işlenecek yüzey aynı olduğu halde aynı NC verilerini üretirler. NC veri optimizasyonu için yazarlar yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem çalışacak olan makinanın davranışına bağlıdır. Sonuç olarak da 5 eksen işleme makinasının hızı, işleme doğruluğu ve yüzey kalitesinde %25'lik bir artışın elde edildiğine değinmişlerdir. C. Lartigue ve arkadaşları [41] CNC takım ucu yörüngesini (yolunu) B-spline eğrileri belirlemişlerdir. Bu yöntem ile daha verimli ve daha doğru kesici uç yolu belirlediklerini söylemişlerdir. B-spline metodu ile kullanılan hafıza daha aza indirildiği söylenmiştir. C. Lartigue ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki örnek uygulama Şekil 1.3'deki gibidir.



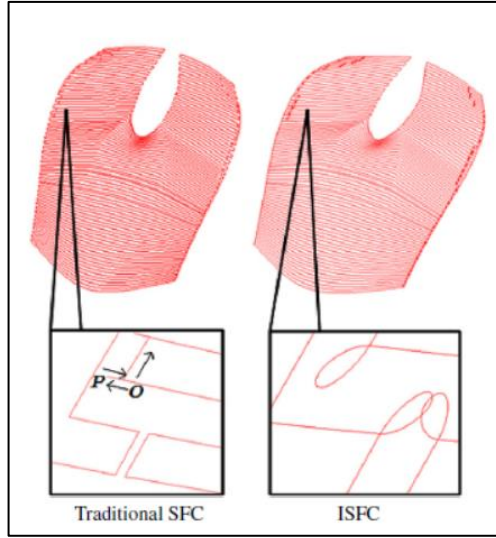
Şekil 1.3. Lartigue ve arkadaşlarının yapmış oldukları örnek uygulama görüntüsü [41]

Wen-Feng Gan ve arkadaşları [42] T-spline yüzeyleri kullanarak beş-eksenli takım yolu oluşturma çalışmasını CNC üzerinde uygulamışlardır. T-spline yüzeyler esnek topolojisi ve sağlam veri yapısından dolayı karmaşık yüzeylerin modellenmesinde CAD tasarımı, animasyon ve bilgisayar destekli mühendislik alanında kullanma eğilimin arttığı araştırmacılar tarafından değinilmiştir. Bu çalışmada araştırmacılar, T-

spline yüzeylere direk takım ucu yolu oluşturmasının gerçekleştirilebilirliğini araştırmışlardır. Geliştirilmiş bir boşluk doldurucu eğrisi (ISFC) aracı yol planlama algoritması önerilmiş, bu öneri ile T-spline modeli ile CAM prosesinde serbest biçimli yüzeylerin matematiksel gösteriminde avantaj elde etmişlerdir ve de düzensiz sınırlar ve delikler gibi dezavantajların önüne geçmişlerdir. Sonuç olarak önerilen algoritmayı prototip bir sisteme uygulamışlardır ve ticari CAM sistemi ile önerilen metodu karşılaştırmışlardır. CAM programı ile yazarların geliştirdiği metot arasındaki karşılaştırılması gösterilmiştir. Wen-Feng Gan ve arkadaşlarının geliştirdiği metot sayesinde yüzeyler daha düzgün bir forma getirilmiştir. Şekil 1.4'te 3 farklı yüzeyde gösterimi görülmektedir.

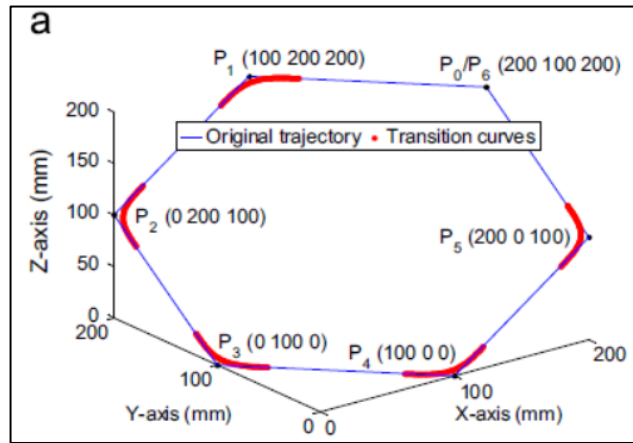


Şekil 1.4. Wen-Feng Gan ve diğ. geliştirmiş olduğu temel düzlem metodu ile ISFC metodunun 3 farklı yüzey için karşılaştırılma görüntüleri [42]

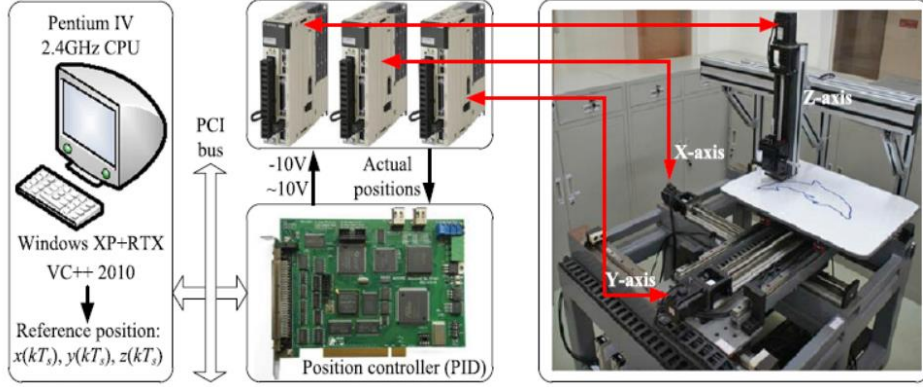


Şekil 1.5. İki farklı metot için, köşelerdeki takım yolu karşılaştırılma görüntüleri [42]

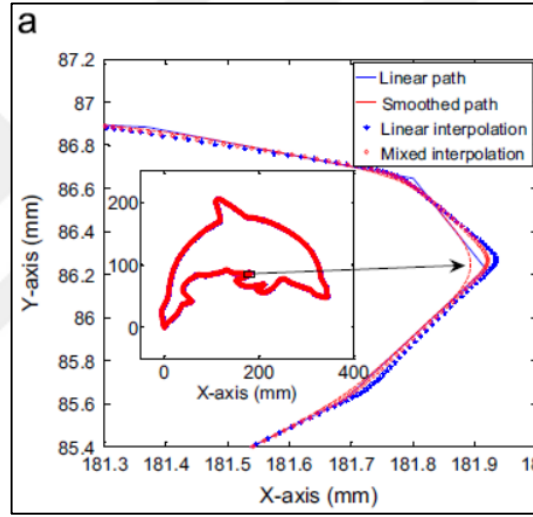
Huan Zhao ve arkadaşları [43], bir eğrisel sürekli B-spline geçiş şeması ile gerçek zamanlı ileriye interpolasyon metodunu kısa çizgi segmentlerinin CNC’de işlenebilmesi için geliştirmişlerdir. Düz çizgiler veya G01 blokları CNC işlemede takım yolu için geniş çaplı kullanılan gösterim şeklidir. Ardışıl parçalar arasında bağlantı noktalarında teğetlik ve eğrilik süreksizlikleri işleme verimliliği ve kalitesini kötüleştiren ilerleme hızı dalgalanması, ivmelenme osilasyonuna neden olabilir. Bu problemi çözmek için gerçek zamanlı yol yumuşatma metodu araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada, Huan Zhao ve arkadaşları algoritmanın uygulanabilir ve verimli olduğunu ileri sürmüşlerdir.



Şekil 1.6. Huan Zhao ve diğ. önerdikleri iki farklı metot için, takım yolu parametrelerinin karşılaştırılma görüntüleri [43]

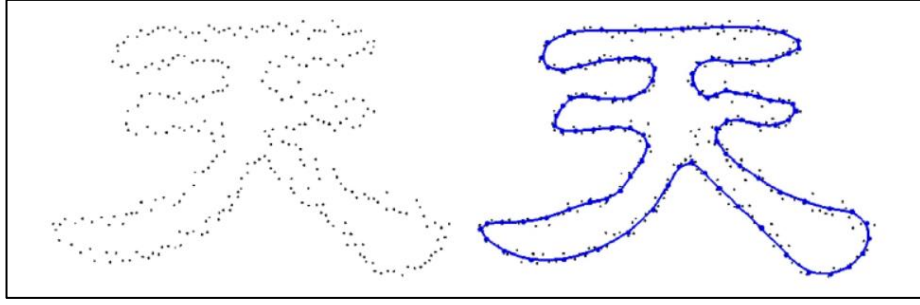


Şekil 1.7. Huan Zhao ve arkadaşlarının kullandığı 3 eksenli deney düzeneğinin görüntüsü [43]



Şekil 1.8. Lineer ve yumuşatılmış takım yolları boyunca hareket kontrolünün deneysel sonuçları [43]

Thomas Mörwald ve arkadaşları [44], gürbüz B-spline yaklaşımı ile keyfi düzlemsel nokta bulutlarında bağlı bölgelerin modellenmesi çalışmasını yapmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmada, B-spline eğrileri ile etki alanı sınırlarına gürbüz bir şekilde yaklaşmak için düzlemsel dağınık nokta kümesi için bir algoritma önermişlerdir. Algoritma üç anahtar özellikle karakterize edilmiştir: Birincisi asimetrik uzaklık ölçümü, ikincisi serbestlik derecesi bilinmeyen problemlerin çözümü için hata uyumlu düğüm yerleştirme, üçüncüsü derin ve dar çukurlardan kaçınmak için konkav doldurma metodudur. Bu eğri yakın veri noktalarına büyük mesafe alanları için denenmiştir. Yazarlar, sonuç olarak en gelişmiş yöntemlere göre 300 kat daha fazla sağlamlık elde ettiklerini ileri sürmüşlerdir.



Şekil 1.9. Lineer ve yumuşatılmış takım yolları boyunca hareket kontrolünün deneysel sonuçlarının görüntüsü [44]



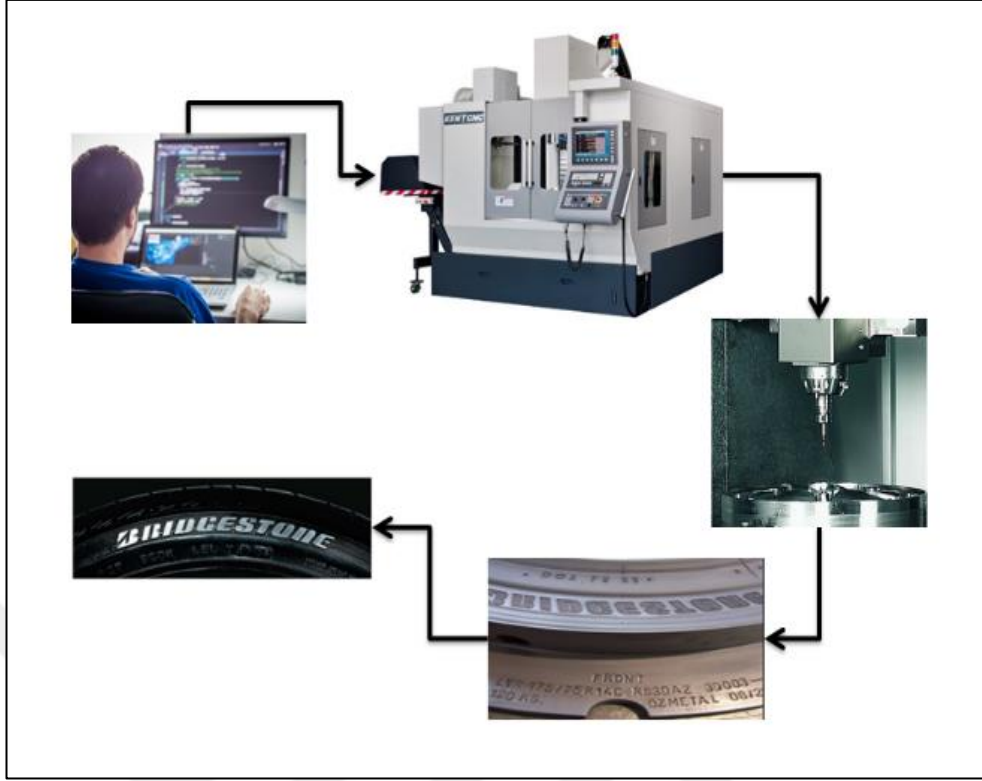
Şekil 1.10. Nokta bulutları ile gösterilmiş bir resmin önerilen metot ile (B-spline) yüzeylere dönüştürülmesine ait görüntüler [44]

Daha iyi bir yüzey kalitesi istenildiği ve işlenebilirliğin zor olduğu alanlardan birisi de lastik imalatıdır. Motorlu taşıtların kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, lastik kullanımının ve ihtiyacının çok hızlı bir şekilde arttığı bir gerçektir. Otomotiv sektöründe, daha az yakıt tüketimi, daha emniyetli ve güvenli araçlar üretmenin en önemli parametrelerinden birisi de lastik ve yer arasındaki sürtünmedir. Lastik ve yer arasındaki sürtünmenin minimuma indirilebilmesi, lastik desenine ve parametrelerine bağlıdır. Güvenlik açısından da araçların yol tutuşu ve fren mesafesinin azaltılması önemli ölçüde hassas lastik deseni işlemenin önemini arttırmaktadır. Diğer taraftan lastik üzerinde lastiğin modelini, ölçüsünü, üretim tarihini ve yerini belirten bilgilerin bulunması satıcı ve tüketici açısından önemli bir gerekliliktir. Bu bilgilerin okunaklı ve düzgün bir şekilde farklı lastik tipleri için kalıplar üzerine markalama yolu ile işlenmesi de önemli uygulama problemlerinden biridir. Genel olarak, lastik



sektöründeki bütün üreticilerin lastik desen makinesi kullanarak, farklı desenleri kalıpların üzerine işlemesi gerekmektedir. Kalıpların üzerine bu desenleri işlemek için CNC tezgâhları kullanılmaktadır [45-51]. Chu C. H. ve diğ. [52] 3D lastik kalıp üretimi için parametrik bir tasarım sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında lastik kalıp tasarımının standartlaştırılması için bir temel oluşturduklarını ve ortaya çıkan yüzey modelini parametrelendirdiklerini belirtmişlerdir. Tasarım esnasında ortaya çıkan istenmeyen oluk geometrilerini algılayan ve daha sonra otomatik olarak düzelten bir geometrik algoritma seti önermişlerdir. Bu çalışmayı, gerçek kalıp üretimi için entegre bir CAD/CAM sisteminde uygulamışlardır. Yaptıkları test örneklerinde, lastik kalıp gelişiminin kalitesini artırmak ve işlem süresini azaltmak için etkili bir yaklaşım sağladıklarını ve kalıp tasarımının kalitesini arttırdıklarını rapor etmişlerdir. Benzer bir çalışmada, Chen H. C. ve diğ. [53], karmaşık ayakkabı kalıplarının numerik kontrol takım yolu üretimi için bilgisayar destekli süreç planlama sistemini sunmuşlardır. Böyle bir yaklaşımla geleneksel ayakkabı kalıp üretim sürecini, otomatik üretim sürecine dönüştürdüklerini belirtmişlerdir. Otomatik takım yolu üretme ile hızlı üretim ve tutarlı kalite hedefine ulaştıklarını vurgulamışlardır. Ayrıca takım yolu düzenleme, programlama ve işleme süresini azaltmak için hem de verimliliği artırmak için önerdikleri algoritmanın başarıyla çalıştığını rapor etmişlerdir.

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde, çalışma konusu hakkında literatür araştırması ve CNC makineleri için genel bilgiler sunulmuştur. İkinci bölümde, prototip CNC'nin mekanik tasarımı ve imalatı hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışmanın özgün kısımlarından birisi olan yazılım algoritması ele alınmıştır. Dördüncü bölümde, tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular ve ilgili yorumlara yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise genel sonuçlara yer verilmiştir. Prototip CNC tezgâhta tasarım çalışması ve yazılım çalışması olmak üzere 2 aşamalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın odağında, bilgisayar ortamında yapılan çizimlerin matematiksel altyapısının anlaşılması bulunmaktadır. Geliştirilen matematiksel dönüşüm algoritması ile özgün bir yazılım elde edilmiştir. Geliştirilen yazılım algoritması, imal edilen prototip makinede kullanmak üzere gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma Şekil 1.11'de görsel olarak tasvir edilmektedir.



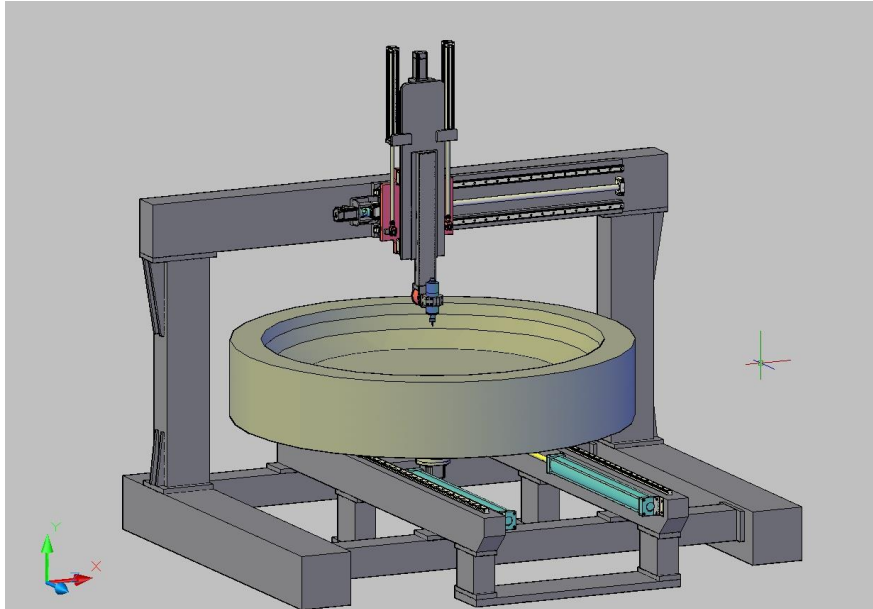
Şekil 1.11. Sistem çalışmasının şematik akış diyagramı

## 2. PROTOTİPİ YAPILAN CNC'NİN MEKANİK TASARIMI MEKANİK ANALİZİ VE MEKANİK İMALATI

Bu tez çalışmasında hassas işleme yapan bir CNC tezgâh tasarlanmış ve prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Akademik literatür araştırmaları ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan CNC tezgâhların incelenmesi sonucunda, optimal bir CNC lastik desen makinasının tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen tasarım modeline göre imal edilen prototip CNC tezgâhın farklı sektörlerde kullanılabileceği düşünülmektedir.

### 2.1. Prototipi Yapılan CNC'nin Mekanik Tasarımı

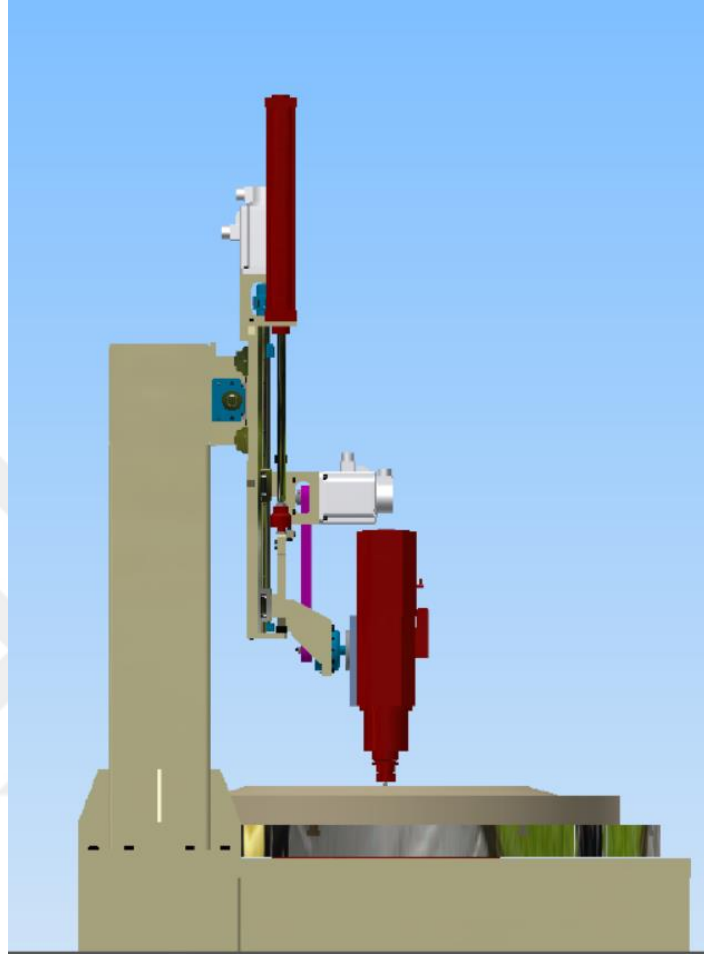
Tez çalışmasının başlangıç aşaması itibariyle farklı tasarım modelleri incelenmiştir. Tez çalışmasının ilk etabında X eksenini boyunca hareket kabiliyeti olan bir tezgâh çalışması üzerinde durulmuştur. Çalışmanın başlangıcında, Şekil 2.1'deki gibi taslak bir ön prototip tasarım yapılmıştır.



Şekil 2.1. Taslak ön mekanik tasarım görüntüsü

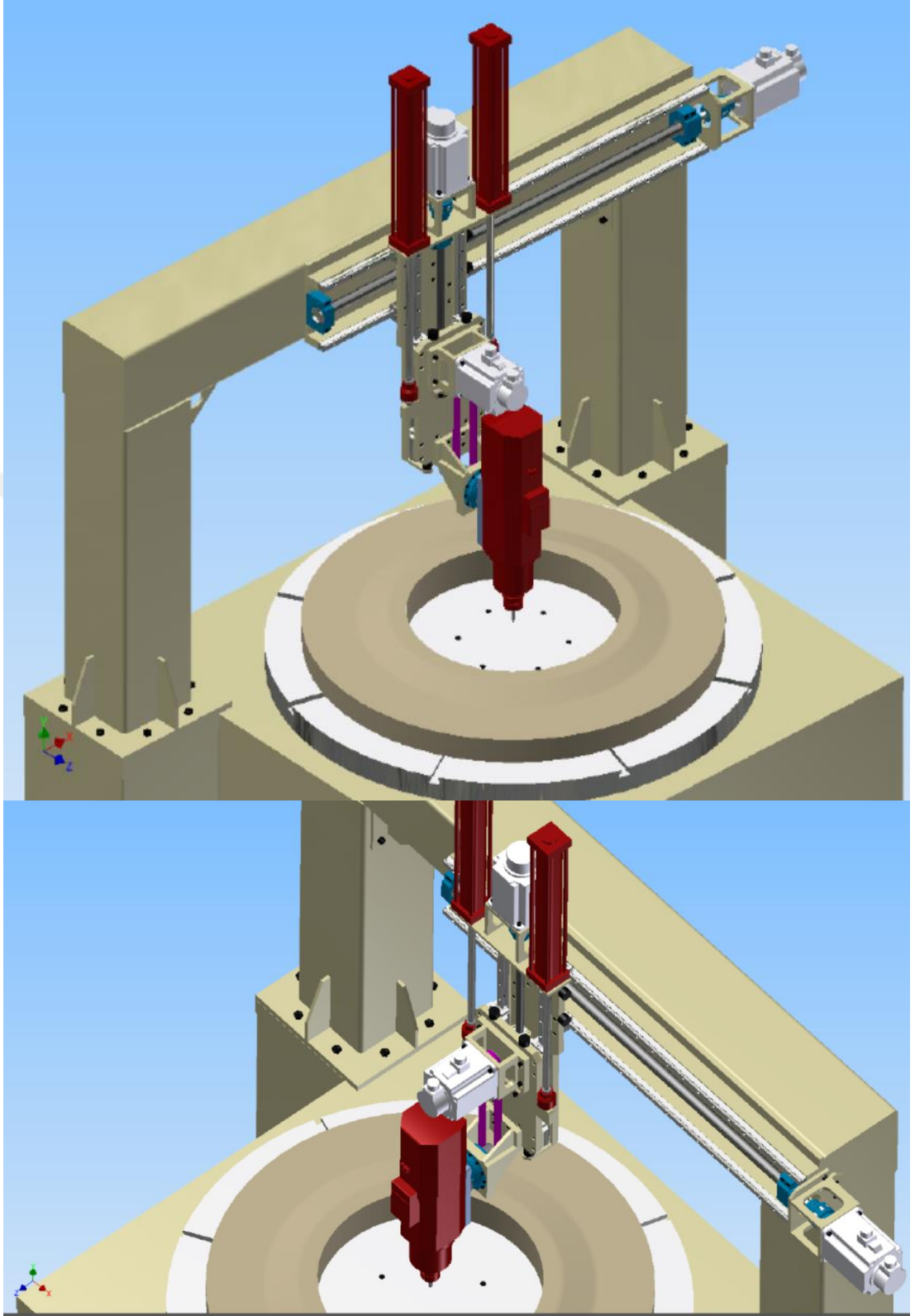
Taslak ön prototip mekanik çizimin basit bir gösterim olduğu ve daha detaylı tasarım çalışmalarının gerektiği belirlenmiştir. Tez çalışmasının ilerleyen aşamasında taslak

çizim üzerinde biraz daha detaylı çalışmalar sonucunda Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'teki gibi bir prototip mekanik tasarım belirlenmiştir.



Şekil 2.2. İyileştirilmiş mekanik tasarım görüntüsü

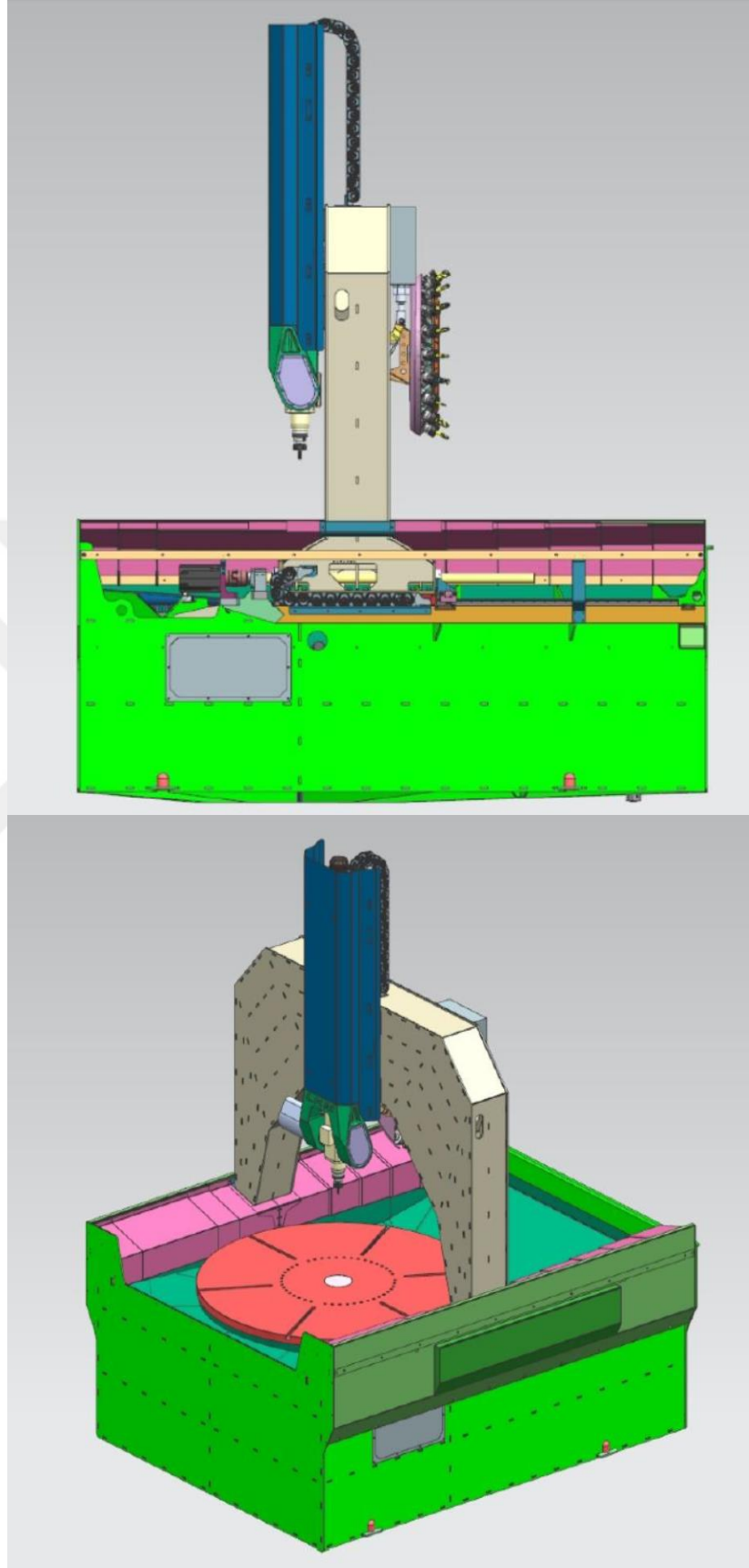
İyileştirilmiş mekanik tasarım çalışmasında da X eksenini boyunca hareket kabiliyeti olan tezgâh üzerinde çalışmalar yapılmıştır. X eksenini boyunca hareket eden tezgâh ithal muadiline benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Hem farklı bir tasarım modeli olması hem de prototipi gerçekleştirilecek CNC tezgâhın avantaj sağlaması sebebiyle yeni bir mekanik tasarım modeli gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.



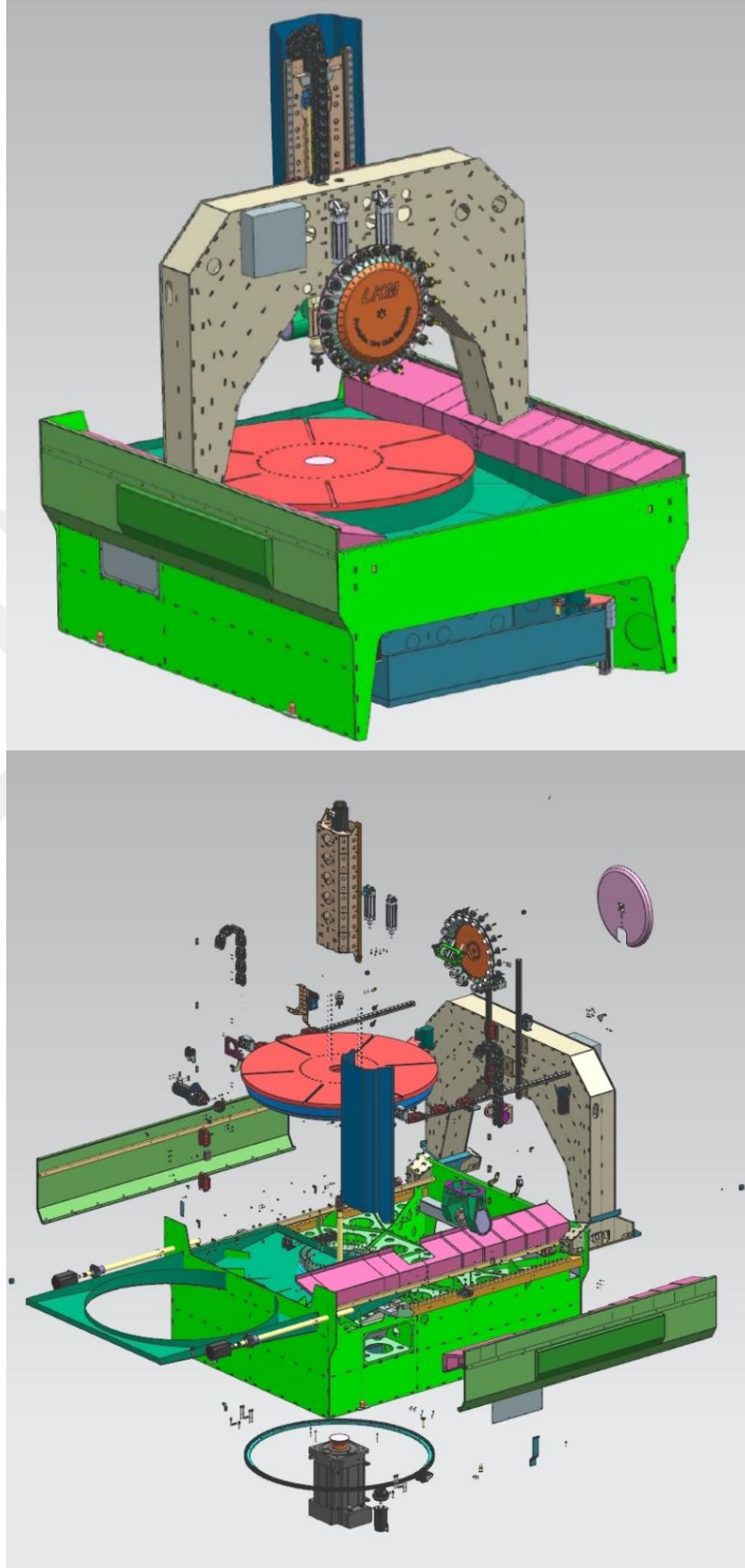
Şekil 2.3. İyileştirilmiş mekanik tasarımın farklı açılardan görüntüleri

Yapılan araştırmalar ve endüstriyel CNC tezgâhların incelenmesi sonrasında, köprü sisteminin Y eksenini boyunca hareket edecek şekilde tasarlanması planlanmıştır. Özgün

bir köprü sisteminin tasarımı neticesinde iş parçasının işlenmesi sırasında oluşabilecek titreşimlerin azalması ve rijit bir sistem elde edilmesi hedeflenmiştir. Prototip mekanik tasarım Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'teki gibi gerçekleştirilmiştir. Prototip makinenin belirlenen mekanik tasarım çalışmaları, tasarım esasları planlanarak mekanik hesaplamaları ve teknik çizimleri bilgisayar ortamında yapılarak tamamlanmıştır. Prototip olarak imal edilen CNC tezgâhta, Y eksenini boyunca köprü sistemiyle hareket kabiliyeti sağlanmıştır. Y eksenindeki hareket kabiliyeti sayesinde, ithal muadile göre farklı bir tasarım modeli olmuştur. Ayrıca Y eksenini sayesinde CNC tezgâhta parça işleme işleminin tamamlanmasından sonra, tezgâh başlangıç noktasına getirilmektedir. CNC tezgâhın başlangıç noktasına gelmesiyle spindle motora, kesme ucuna veya işlenen kalıba herhangi bir zarar gelmesini önlemektedir. Köprü sisteminin başlangıç noktasına gitmesiyle herhangi bir şekilde olması muhtemel (kalıbın spindle motora veya kesme ucuna) zararların önüne geçilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 2.4. Prototipin farklı açılardan mekanik tasarım görüntüleri

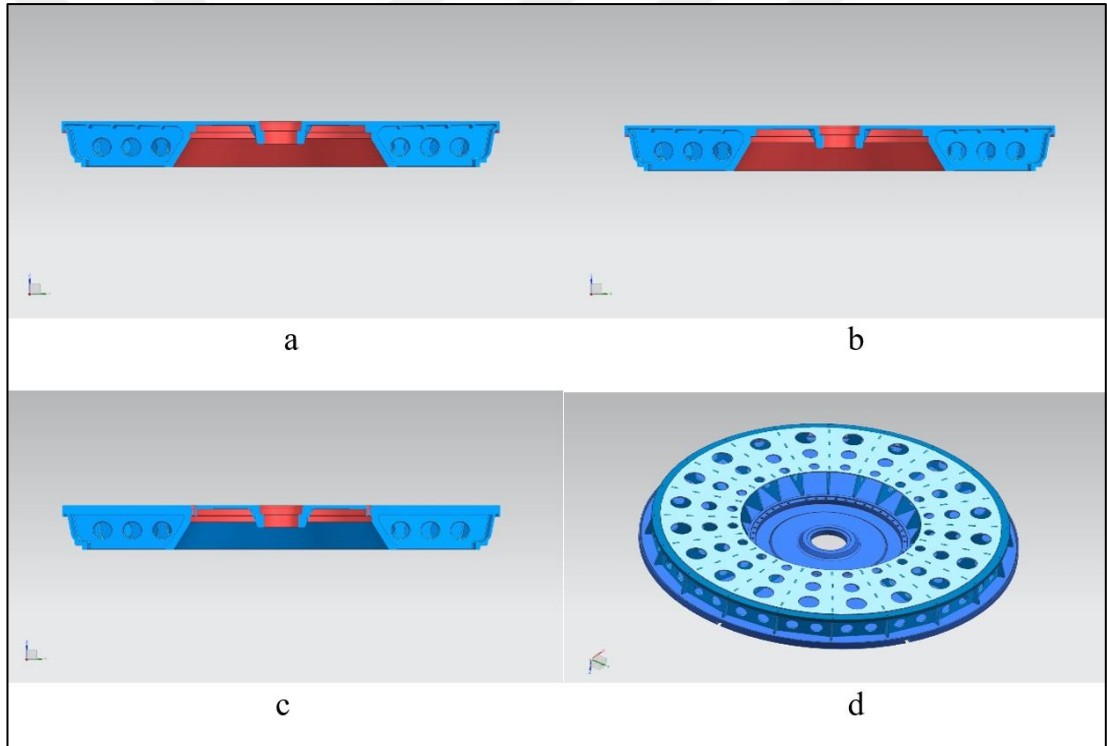


Şekil 2.5. Prototipin çeşitli açılardan mekanik tasarım görüntüleri



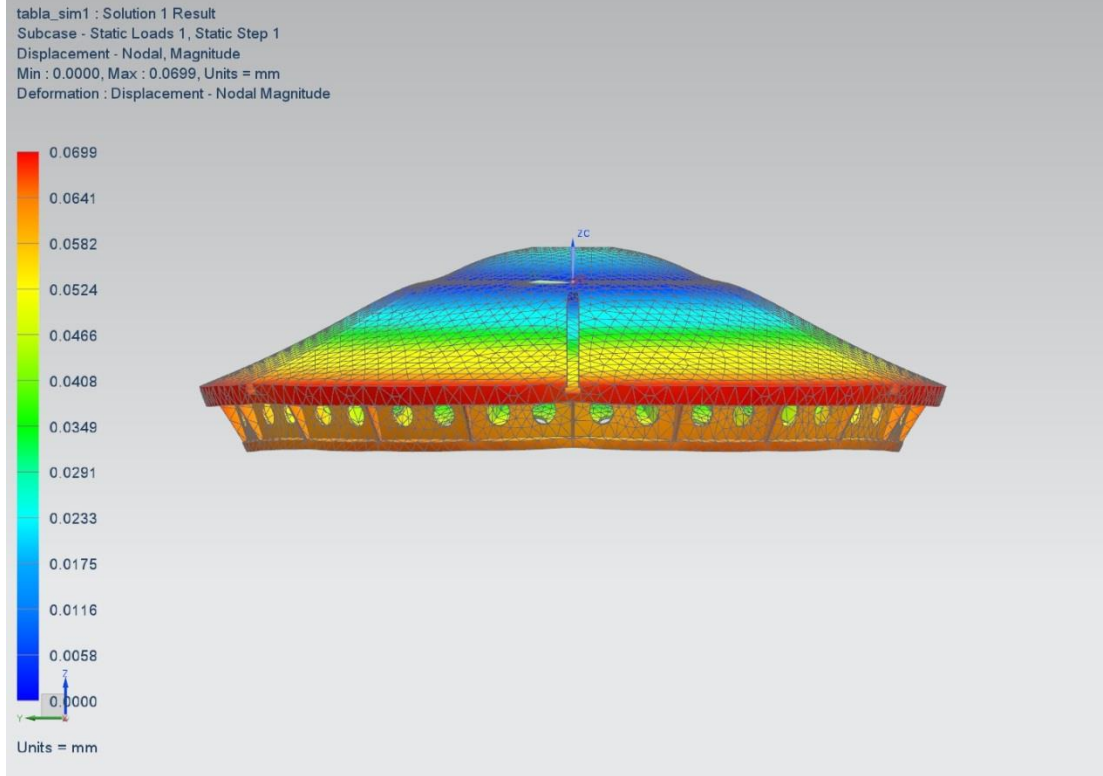
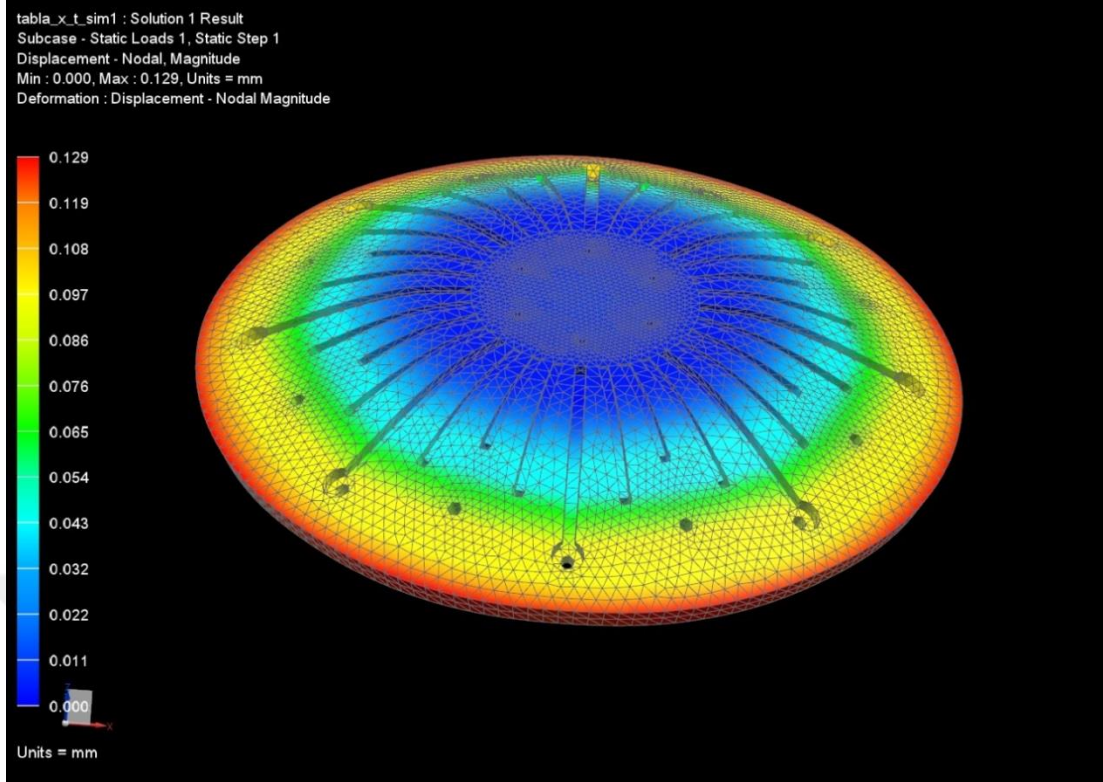
## 2.2. Tasarımı Yapılan CNC'nin Mekanik Analizleri

Mekanik tasarımın diğer aşamasında, kapsamlı mekanik analiz çalışmaları gerektiği belirlenmiştir. Bu nedenle bilgisayar ortamında, çalışma konusu prototip makinenin farklı mekanik analiz çalışmaları yapılmıştır. Mekanik analiz esasları temel alınarak yükleme, sehim, titreşim vb. analizleri ile mekanik tasarımın uygunluğu incelenmiştir. Prototip makine için belirlenen analizler, NX Nastran bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3D Tetrahedral Mesh uygulanarak analiz çıktıları incelenmiştir. Makinanın tablasında yapılan statik analizler sonucunda aynı yük altında farklı malzeme, imalat tekniği ve değişik geometrilere elde edilen ağırlık ve sehim ilişkisi ile ilgili tasarım aşamaları Şekil 2.6'da verilmiştir.

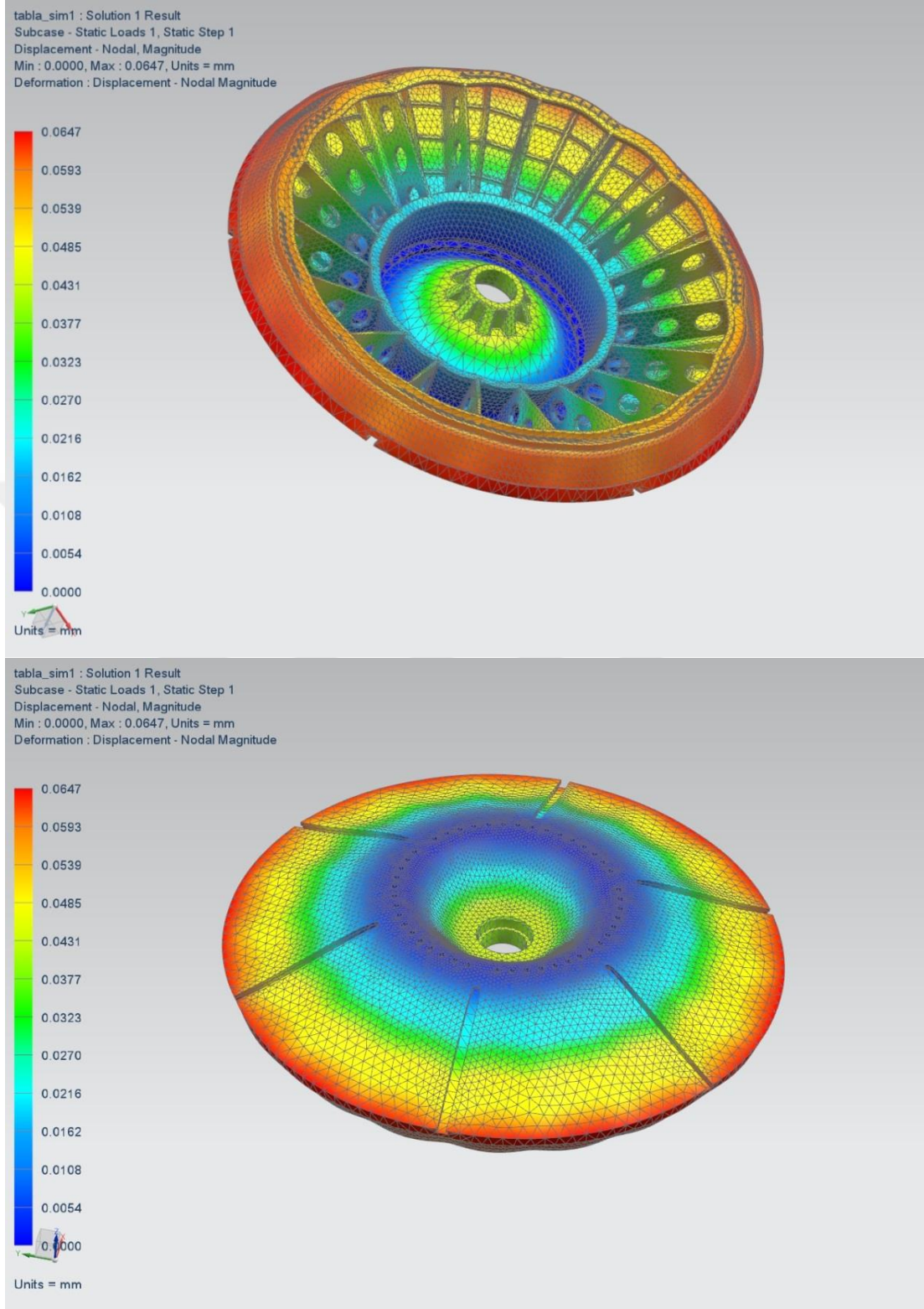


Şekil 2.6. (a). Döküm açılı nervürlü (b). çevre nervürlü (c). döküm düz nervürlü (d). sac konstrüksiyon malzemeler ile oluşturulan tabla çizimleri

Şekil 2.7'de ve Şekil 2.8'de ise belirtilen farklı koşullarda analiz edilen tablada en iyi performans sonucu gösterilmiştir. Şekil 2.7'de dolu sac plakanın işlenmesi ve sac konstrüksiyon yöntemi ile tasarımı yapılan döner tablanın sehim miktarları görülmektedir.



Şekil 2.7. Döner tablann çeşitli sehim analiz görüntüleri



Şekil 2.8. En iyi sehim miktarı elde edilen tablanın bazı sehim analiz görüntüleri

Şekil 2.8’de döner tablanın döküm çevre nervürlü olarak bilgisayar ortamındaki sehim analiz görüntüsü verilmiştir.

Tablo 2.1’de aynı yükler ve farklı malzemeler altında tablanın analiz sonucu oluşan sehim miktarları verilmiştir. Yapılan sehim analizi sonucunda, sehim miktarının az olması ve dayanıklılığı nedeniyle tabla için döküm gövde tercih edilmiştir. Tablo 2.1 detaylı olarak incelendiğinde, çevre nervürlü malzemenin 0.0647 mm sehim miktarı ve tabla ağırlığının daha az olması ile döner tabla için en uygun yöntem olduğu görülmektedir. Sfero döküm yöntemi; kolay üretim ve titreşim sönümlenme gibi özellikleri sayesinde avantajlıdır. Geometride kademe kademe düzenlemeler yapılarak döküm çevre nervürlü malzeme ile en hafif ve az sehimli yapı elde edilmiştir.

Tablo 2.1. Aynı yük ve farklı malzemeler altında oluşan sehim uzunlukları

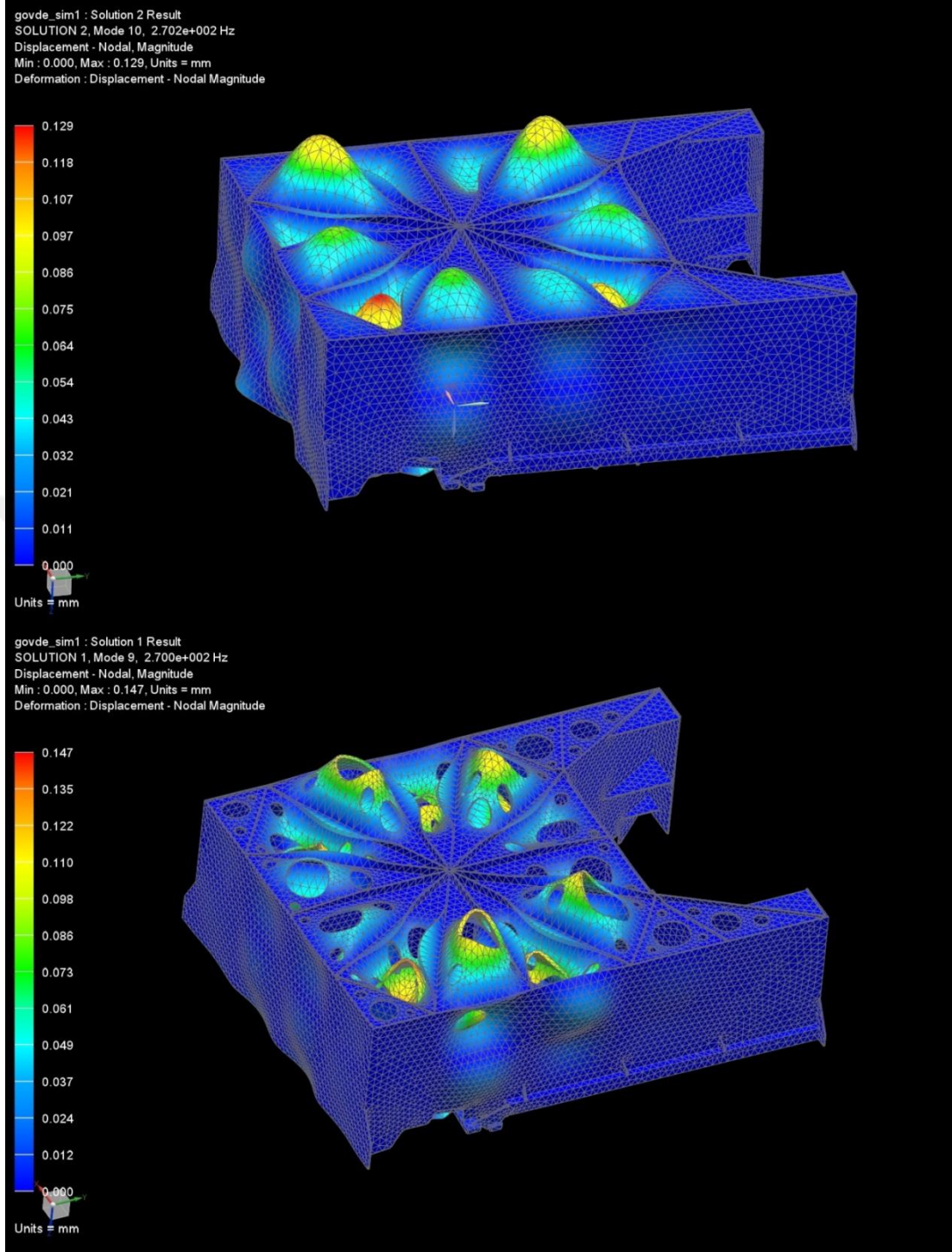
Malzeme Adı	Tabla Ağırlığı (kg)	Yayıllı Yük (kg)	Sehim (mm)	Analiz Sonucu
Dolu saç plaka	652	5000	0.129	Dolu saç plaka işleyerek yapılan tabla; yapımı kolay fakat çok ağır ve dayanıksız olduğu tespit edilmiştir.
Saç konstrüksiyon	480	5000	0.070	Lazerde kesilip lego gibi birleştirilip yapılan kaynaklı konstrüksiyon; işçiliği oldukça fazla, ısı gerilmeler ve ağırlık etkisinin çok fazla olduğu görülmüştür.
Döküm, düz, nervürsüz	456	5000	0.184	
Döküm, açılı, nervürlü	588	5000	0.046	
Döküm, nervürlü	429	5000	0.0699	
Döküm, çift açılı, nervürlü	454	5000	0.0806	
	437	5000	0.0709	
	431	5000	0.0704	
	441	5000	0.0702	
Döküm, çevre nervürlü	421	5000	0.0708	
	399.5	5000	0.0750	
	386	5000	0.0647	

Tablo 2.2’de prototip makinenin tabla ve köprüsünde belirlenen analiz parametreleri ile belirlenen analiz yöntemi verilmiştir. Tabla ve köprünün farklı yükler altında belirlenen bölgelerden sabitlenerek gerçekleştirilen analizi görülmektedir.

Tablo 2.2. Tabla ve Köprü parçaları için belirlenen analiz parametreleri

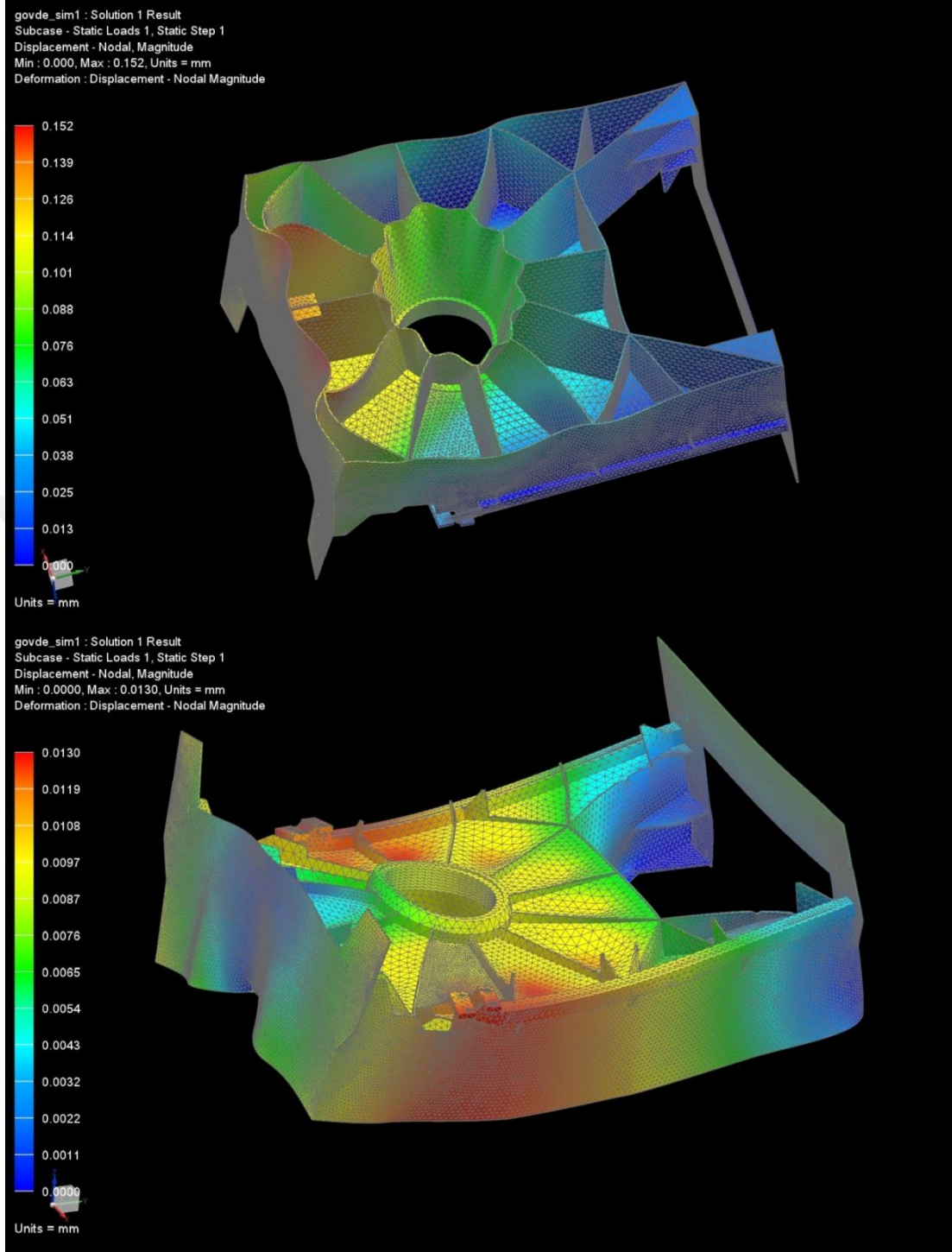
<b>Parça Adı</b>	<b>Element Tipi</b>	<b>Element Boyutu (mm)</b>	<b>Maksimum Jakobiyen</b>	<b>Yöntem</b>
Tabla	CTETRA(10)	15	10	Rulman bölgesinden sabitlenerek, tabla üzerine 50000 N. yayılı yük uygulanmıştır. Gravity 9810 mm/sec <sup>2</sup> tanımlanmıştır.
Köprü	CTETRA(10)	15	10	Tabanlardan sabitlenerek, bağlantı bölgesine 10000 N. aşağı yönlü yük uygulanmıştır.

Bilgisayar ortamında farklı yük ve titreşim değerlerindeki tasarlanan mekanik sistemin test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu analiz çalışmaları neticesinde, mekanik tasarımın rijitliğinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Lazer kesimli saçların kaynaklı konstrüksiyon ile birleştirilmesi esasına göre tasarlanan gövdede yapılan titreşim analizlerinde titreşim genliğinin en fazla olduğu yerlerde Şekil 2.9’taki gibi boşaltmalar yapılmıştır. Bu işlem sonucunda daha hafif bir yapı elde edilmiştir.



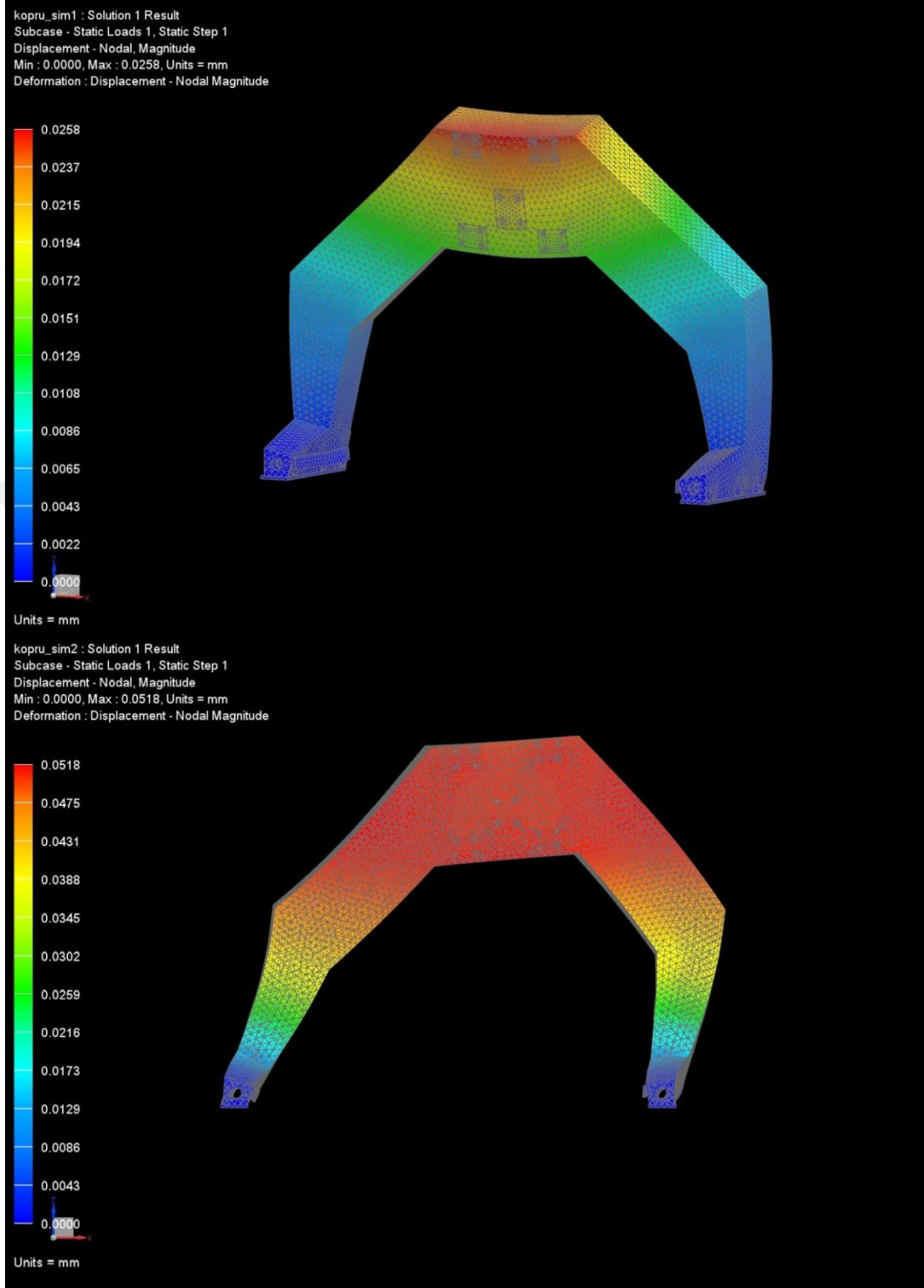
Şekil 2.9. Mekanik tasarımın bilgisayar ortamındaki bazı titreşim analiz görüntüleri

Titreşim analizleri sonucu bükülmelerin fazla olacağı değerlendirilen yerlerde, ikinci bir katman saç kaynatılarak bu sorun Şekil 2.10'da gösterildiği gibi giderilmiştir.



Şekil 2.10. Mekanik tasarımın bilgisayar ortamındaki bazı yükleme analiz görüntüleri

Mekanik tasarıma özgü köprü konstrüksiyon yöntemi ile olası yükler altında yapılan analizlerde oldukça düşük deformasyon değerleri Şekil 2.11'deki gibi elde edilmiştir. Köprü konstrüksiyon yapısının kullanılması ile prototip makinede olası titreşimlerin en aza indirilmesi ile hassas bir işleme yapılması hedeflenmiştir.



Şekil 2.11. Mekanik tasarımın bilgisayar ortamındaki çeşitli yükleme analiz görüntüleri

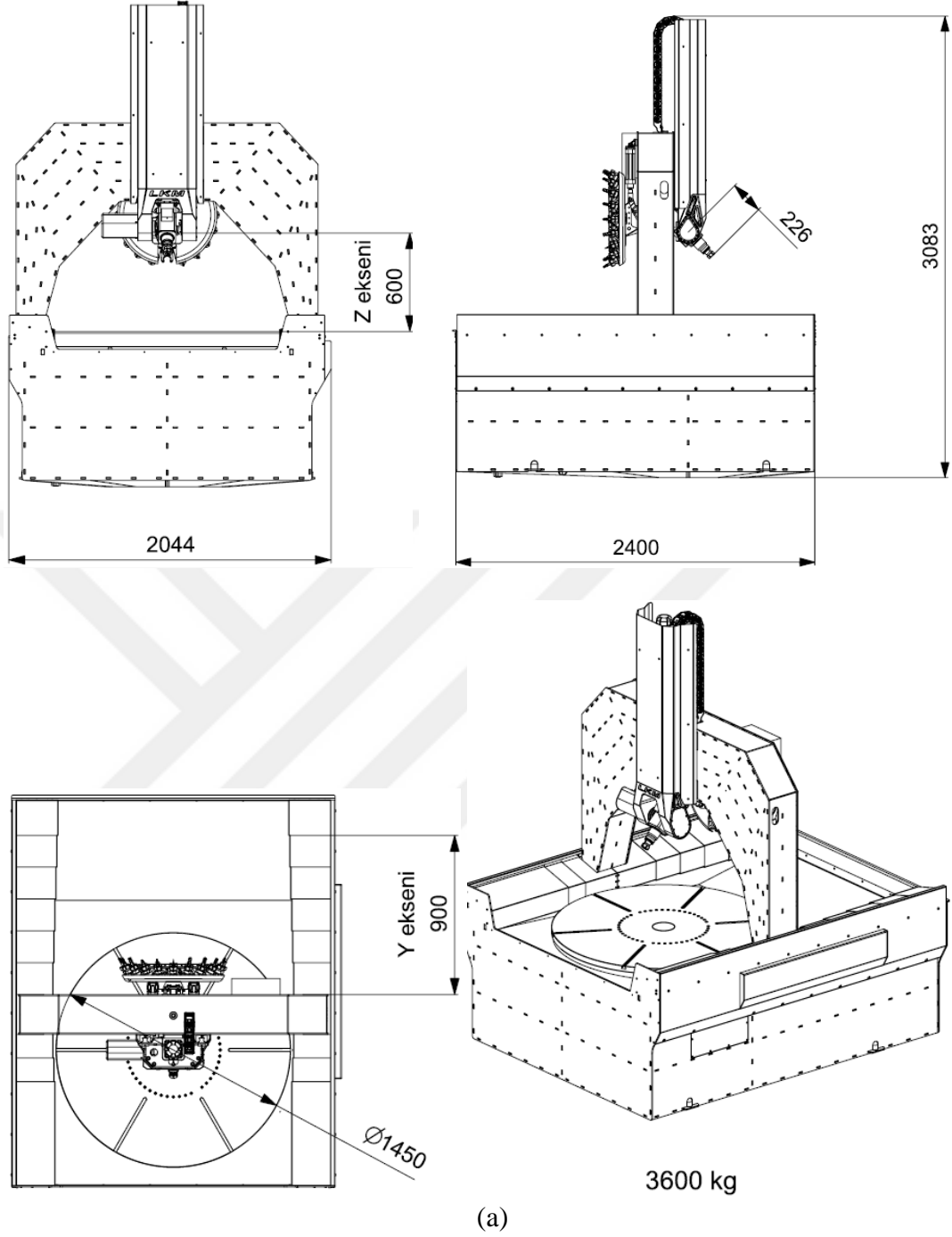
Gerçekleştirilen analiz çalışmalarının odağında, prototip olarak imal edilen CNC tezgâhın farklı koşullardaki değerlerin karşılaştırılması ve daha uygun bir (daha hafif, daha dayanıklı) makine elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle, sanayi sektöründe



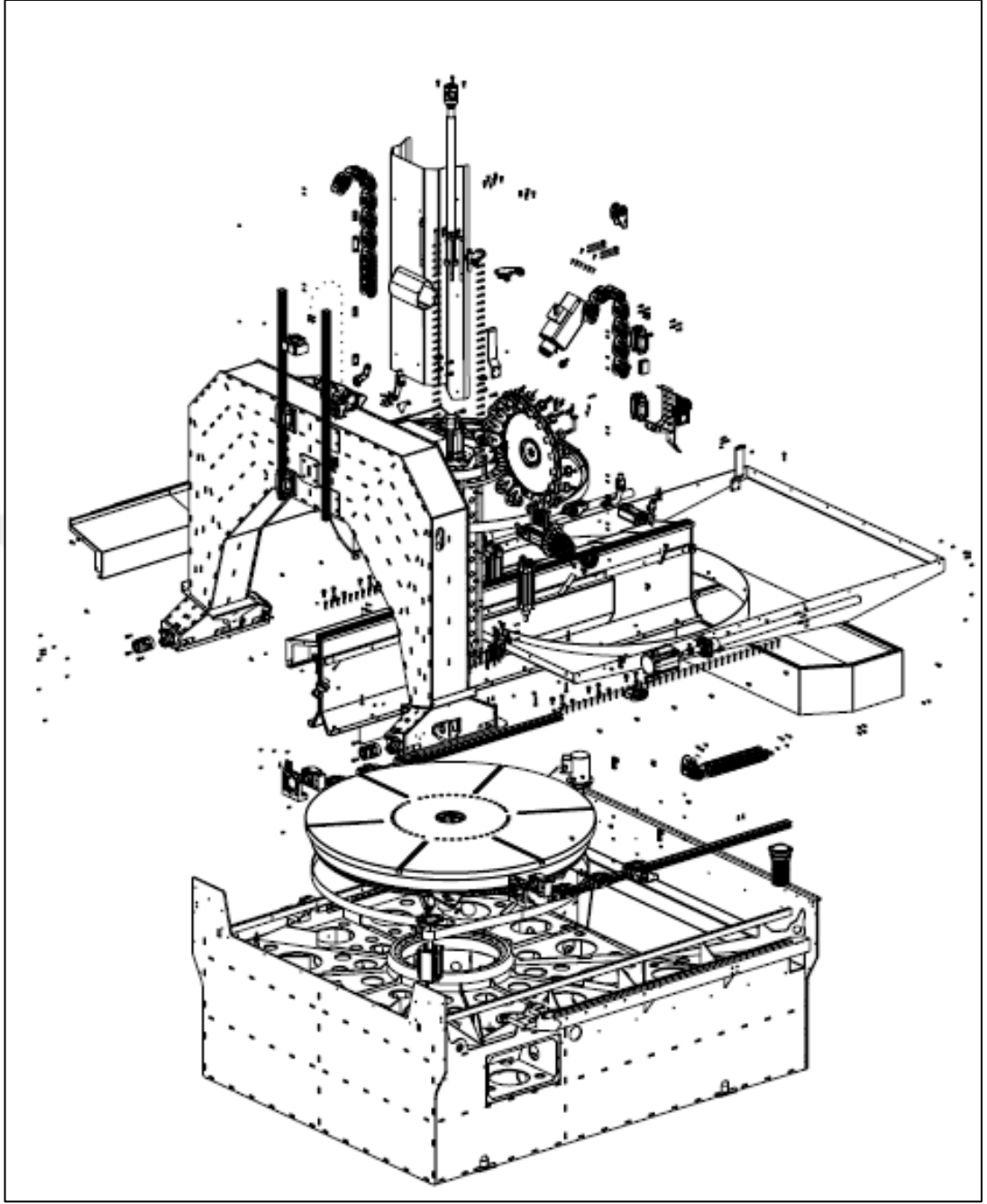
CNC tezgâh konusunda yetkin kişilerle yapılan çalışmaların sonucu olarak prototip olarak imal edilen makinenin; mekanik tasarım ve mekanik analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım olarak Y eksenini boyunca hareket kabiliyetli köprü sistemi farklı alanlarda çalışmaya olanak sağlaması ve kalıp işlemeden sonra olası sorunların önüne geçeceği düşünülmektedir. Ayrıca elde edilen analiz sonuçları sayesinde prototip CNC tezgâhın daha hafif olması sağlanmıştır. Ticari prototip çalışmasında analiz kriterlerinin biraz daha detaylandırılması sayesinde daha gürbüz bir CNC tezgâhın elde edileceği düşünülmektedir. Bilgisayar ortamında mekanik tasarımları ve analizleri tamamlanan parçaların imalat aşamasına geçilmiştir.

### **2.3. Prototipi Gerçekleştirilen CNC'nin Mekanik İmalatı**

Tez çalışması kapsamında prototip imalatı gerçekleştirilen makine için başlangıç olarak tasarım kriterleri belirlenmiştir. Tasarım kriterleri kapsamında CNC tezgâhın çalışma eksenleri (hareket eksenleri) belirlenmiştir. Prototip CNC tezgâhta Y eksen, Z eksen, C eksen (döner tabla) ve A eksen (spindle eksen) olarak çalışma uzayı belirlenmiştir. Prototip CNC tezgâhın boyu (yerden yüksekliği) 3083 mm, eni 2400 mm ve kalınlığı 2044 mm olarak tasarlanmış ve 3600 kg kütleye sahiptir. Prototip CNC tezgâh maksimum 1450 mm çapında ve 600 mm kalınlığında olan kalıpları işleme özelliğine sahiptir. Tasarım kriterleri belirlenerek gerçekleştirilen mekanik tasarım işlemleri yapılmıştır. Çalışmanın bu kısmında, bilgisayar ortamında teknik çizimleri ve mekanik analizleri gerçekleştirilen parça imalat çalışmalarından bahsedilmiştir. Parçaların imalatı sonrasında prototip makinenin omurgası büyük ölçüde oluşturulmuştur. Mekanik imalat aşamasına fayda sağlaması için tasarım kriterleri baz alınarak bilgisayar ortamında belirlenen ölçekli çizimlerim bazı görüntüleri Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. (a). Mekanik imalat için tasarım kriterlerinin belirlendiği bazı görüntüleri  
(b). mekanik imalat için tasarım kriterlerinin belirlendiği patlatılmış görüntüsü



(b)

Şekil 2.12. (Devam) (a). Mekanik imalat için tasarım kriterlerinin belirlendiği bazı görüntüleri (b). mekanik imalat için tasarım kriterlerinin belirlendiği patlatılmış görüntüsü

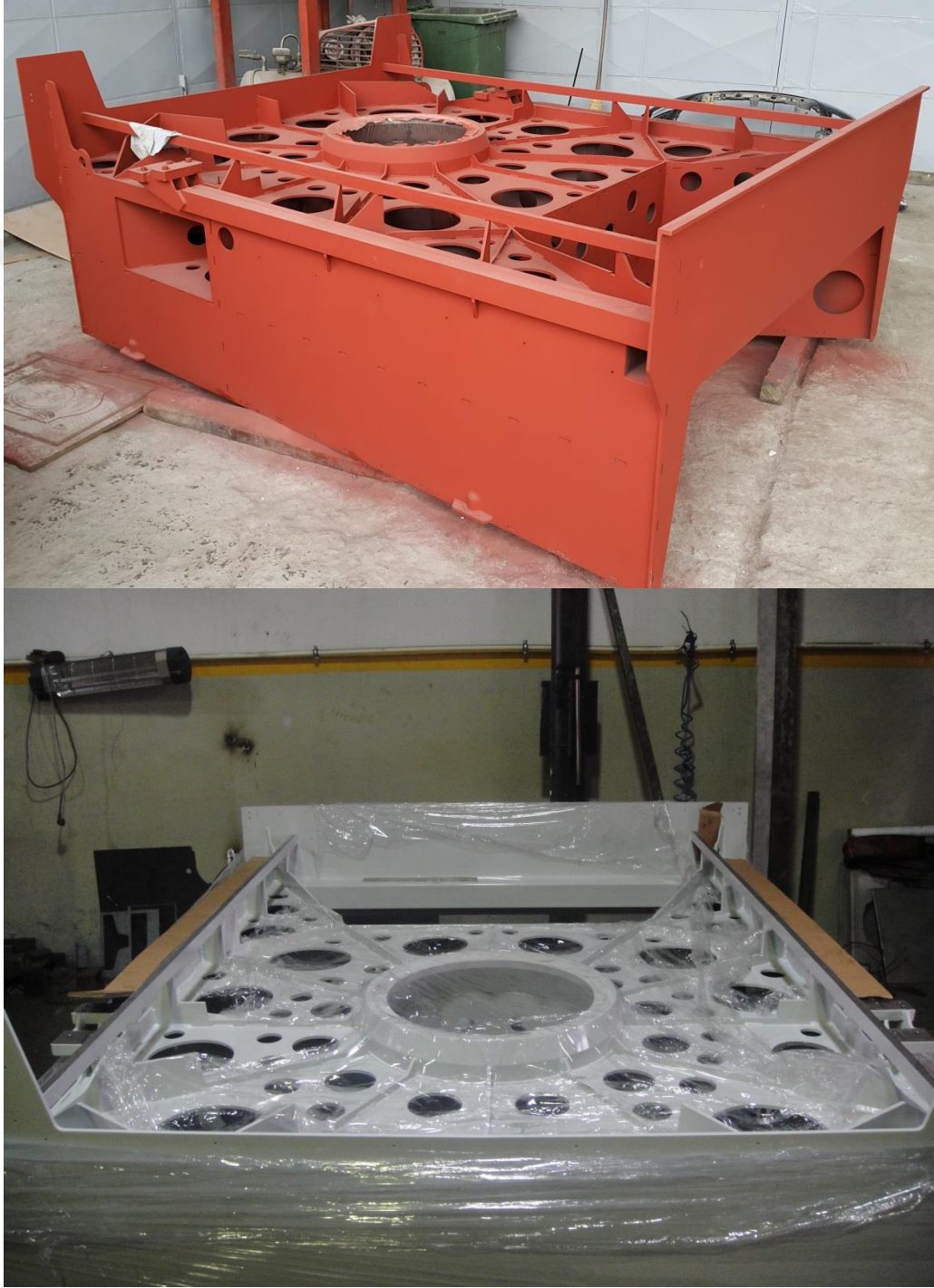
Prototip makinenin ana gövdesi, köprü ve Z eksen gövdesi lazerle kesilmiş sacların kaynaklı konstrüksiyonu ile yapılmıştır. Ana gövde imalatı Şekil 2.13'teki gibidir.



Şekil 2.13. Prototip makinenin mekanik gövde imalatından bazı görüntüler

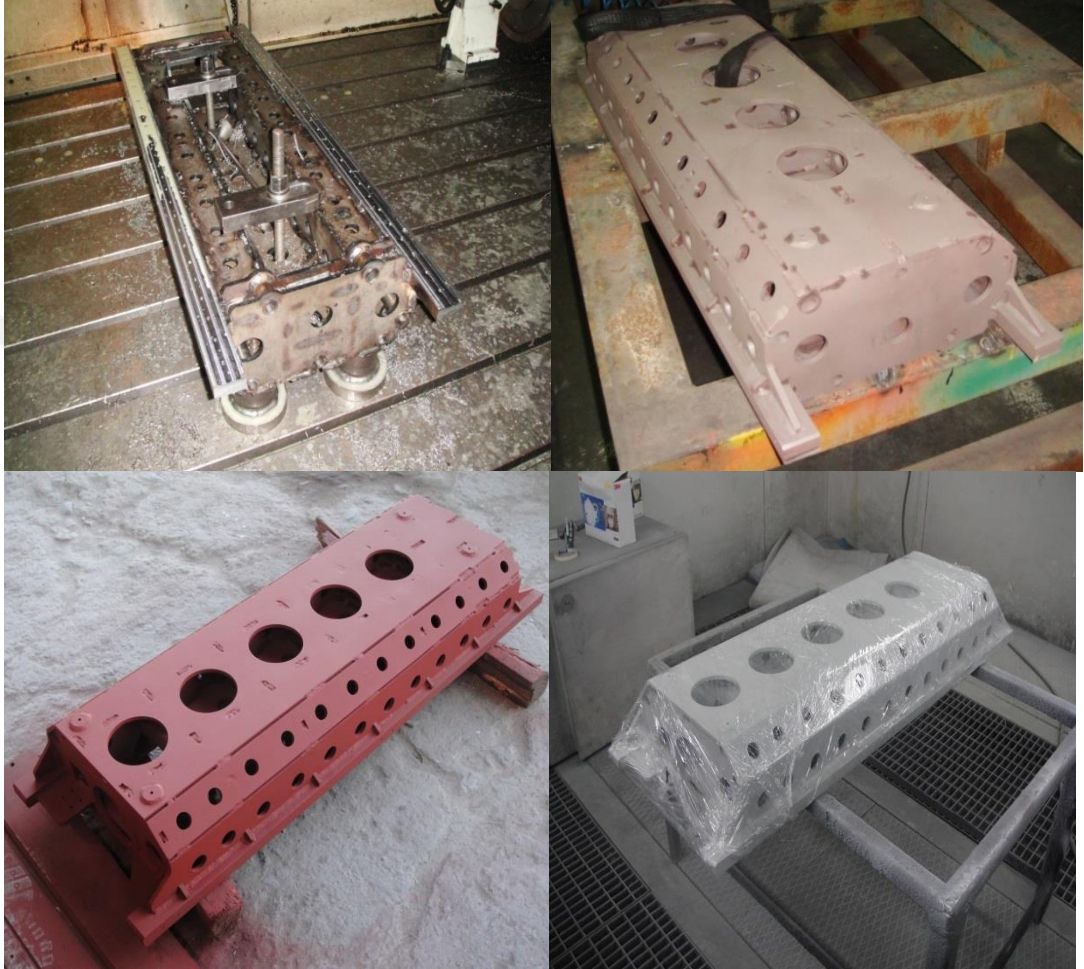
Prototip CNC tezgâhının gövdesi parça parça imal edilen parçaların kaynaklı konstrüksiyon yöntemi sayesinde lego gibi birleştirilmiştir. Bilgisayar ortamında

belirli bölgeler tespit edilmiş olup, bu bölgelerin boşaltılması işlemi yapılmıştır Gövde yapısındaki her bir parça kısmında belirlenen noktaların boşaltılması sayesinde daha hafif bir yapı elde edilmiştir. Kaynaklı imalat işleminin tamamlanmasından sonra, parçaların kumlanması ve boyanması işlemleri Şekil 2.14’te gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.14. Mekanik imalatın çeşitli açılardan alınmış bazı görüntüleri

Prototip makinede kullanılan Z eksenli için kaynaklı konstrüksiyon ile imalatı yapılmış ve sonrasında gerekli düzeltmeler CNC makinede gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlemler sonrasında imalat, kumlama ve boyanması Şekil 2.15'te verildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.15. Mekanik imalatın bazı aşamalarının kesit görüntüleri

Prototip makinede kullanılan köprü sisteminin boyutlandırmasına göre imalat aşamasına geçilmiştir. Köprü sistemi için kaynaklı konstrüksiyon imalatı, kumlama ve boyanması Şekil 2.16'da gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.16. Mekanik imalat aşamalarının görüntüleri

Prototip makinede kullanılan döner tablanın döküm gövde yapısı ile imal edilmesi, yapılan teknik analizler ve endüstriyel araştırmalar neticesinde belirlenmiştir. Öncelikle döküm gövde için model imalat yöntemi belirlenmiştir. Belirlenen modele göre, döner tablanın döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Döküm işleminden sonra tablada gerekli mekanik imalat revizyonları gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlemlerin Şekil 2.17’de verildiği gibi tamamlanmasından sonra döner tabla imalatı tamamlanmıştır.



Şekil 2.17. Döner tabla imalatı aşamalarının görüntüleri

CNC tezgâhlar farklı ölçülerde takım uçları ile işleme yapabilme özelliğine sahiptirler. İşlenmek istenen farklı kalıplara göre, değişik çap ve özellikte takım ucu olması gerekmektedir. Farklı takım uçları takım değiştirme aparatında bulunmakta olup, gerekmesi halinde otomatik olarak değişmektedir. Prototip CNC tezgâhında kullanılan 20 uçlu şemsiye tipli otomatik takım değiştirme sistemi Şekil 2.18’de gösterildiği gibi imal edilmiştir.



Şekil 2.18. Otomatik takım değiştirme aparatının bazı mekanik imalat görüntüleri

Prototip makinede kullanılan spindle motor yüksek devirlerde çalışmaktadır. Bu nedenle spindle motorun yerleştirildiği mekanizmanın imalatı önemli bir rol oynamaktadır. Spindle motorun bağlantı ekipmanları CNC tezgâhta hassas bir şekilde imal edilmiştir. İmalatı tamamlanan spindle bağlantı bileşenlerinin kumlama ve boyama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Prototip makinede kullanılan spindle motorun bağlantı bileşenleri Şekil 2.19 ve Şekil 2.20’deki gibi üretilmiştir.



(a)

Şekil 2.19. (a). Spindle motor yuvasının üst mekanik imalat görüntüleri (b). spindle motor yuvasının üst mekanik imalat görüntüleri

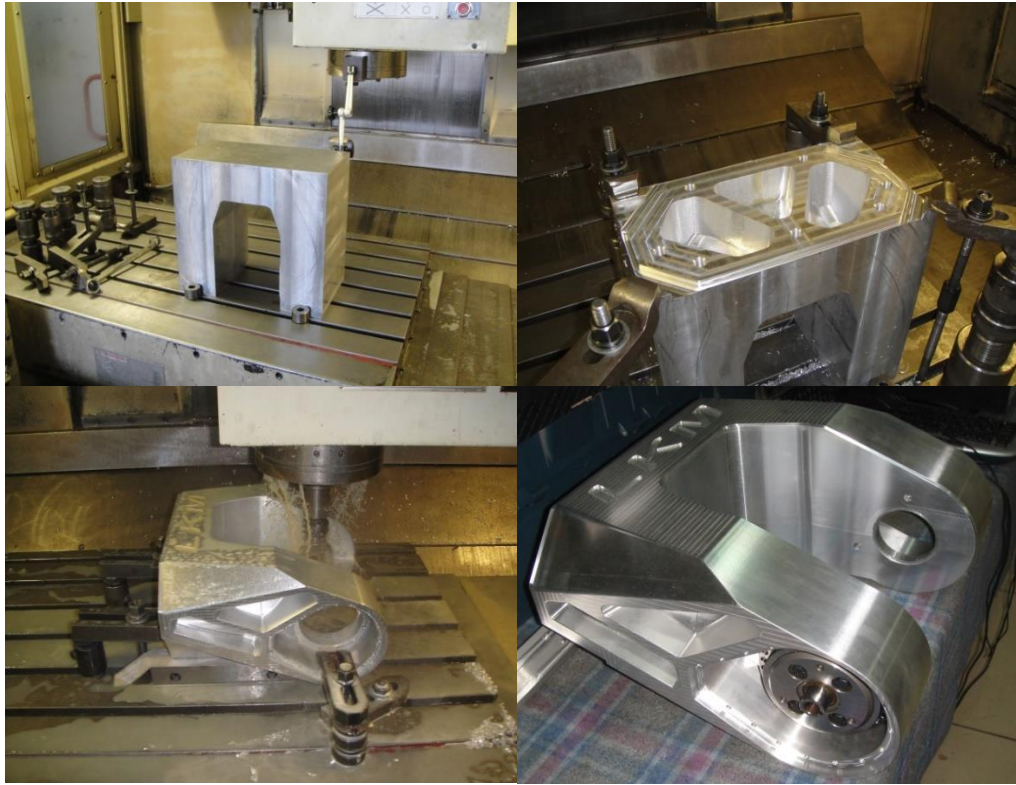




(b)

Şekil 2.19. (Devam) (a). Spindle motor yuvasının üst mekanik imalat görüntüleri  
(b). spindle motor yuvasının üst mekanik imalat görüntüleri

İmalatı tamamlanan spindle motor yuvasına rulman ve diğ. ekipmanların montaj işlemleri gerçekleştirilmiştir. Spindle motorun yüksek devirlerde çalışması sırasında meydana gelebilecek titreşim vb. istenmeyen durumların meydana gelmemesi için yapılan işlemlerin hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi önemlidir.



Şekil 2.20. Spindle motor yuvasının bazı mekanik imalat görüntüleri



Şekil 2.21. Mekanik imalat aşamalarından bazı görüntüler

Bilgisayar ortamında yapılan mekanik tasarımın ölçeklendirilmesi sayesinde ekipmanların imalat işlemleri Şekil 2.21'deki gibi tamamlanmıştır. Prototip makinede kullanılan ekipmanlar (parçalar) kaynaklı imalat yöntemleri, CNC tezgâh imalatı, torna imalatı, freze imalatı, kumlama, boyama vb. işlemler sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan imalat aşamasında hem akademik hem de sanayi deneyimleri bir araya gelerek optimal bir prototip CNC tezgâhın elde edilmesi amaçlanmıştır.

#### 2.4. Prototipi Gerçekleştirilen CNC’de Kullanılan Ekipmanlar ve Malzemeler

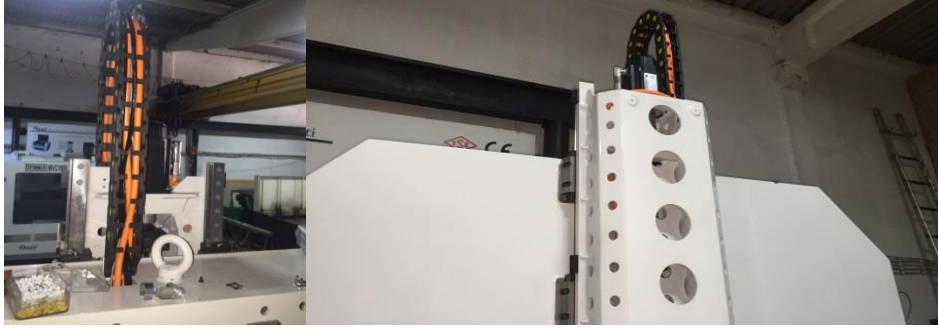
Bu kısımda, teze konu olan prototip CNC tezgâhta kullanılan ekipmanlardan bahsedilmiştir. Hassas takım tezgâhları uygulamalarında, mil etrafında dönen silindirik bilyalı vidalar kullanılmaktadır. Boşta bilya olmadığından daha yüksek devir sayılarına erişebilmektedirler. Prototip CNC tezgâhta Y eksenleri için vidalı miller kullanılmıştır.



Şekil 2.22. Kızaklar ve sonsuz vidalardan bazı görüntüler

Sayısal denetimli tezgâhların çoğu düz yatak yüzeylerine sahiptir. Bu yüzeyler genellikle sertleştirilmiş ve bütün malzemeler içinde en düşük sürtünme katsayısına sahip olan PTFE-Teflon ile kaplanmışlardır. Bu malzemenin yüzeyi yağ tutacak şekilde hafif gözenekli yapıya sahiptir. Düz yüzeylerin yük taşıma özellikleri diğer yüzeylere göre oldukça daha iyidir. Sürtünme direncini azaltmak ve daha az güç harcamak için, kayma hareketi sağlayan düz yataklar yerine dönme hareketi sağlayan masuralı yataklar da kullanılır. Prototip CNC tezgâhta Z eksenini için kızak

mekanizması kullanılmıştır. Şekil 2.22’de kullanılan kızak mekanizması görünmektedir.



Şekil 2.23. Esnek kablo kanal görüntüleri

Prototip CNC tezgâhta hareket eksenlerindeki kablo vb. diğer ekipmanların hasar görmemesi ve işleme sırasında herhangi bir problem oluşmaması için esnek kablo kanal mekanizması Şekil 2.23’teki gibi kullanılmıştır.



Şekil 2.24. Prototip CNC’de kullanılan Y eksen motorlarının farklı açılardan görüntüleri

Tablo 2.3. Y eksen motoru özellikleri

Parametre	Değeri
Akım	4,72 Arms
Hız	3000 rpm
Güç	1,99 kW
Moment	8,43 Nm

Prototip CNC tezgâhta aynı özelliklere sahip iki adet AC Servo motor kullanılmıştır. Bu motorlar CNC tezgâhın Y eksenini boyunca simultane olarak hareket etmesini sağlamaktadır. Şekil 2.24’te Y eksenini için kullanılan motorların resimleri ve Tablo 2.3’te motorların parametre değerleri gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Prototip CNC’de kullanılan Z eksen motorun farklı açılardan görüntüleri

Tablo 2.4. Z eksen motoru özellikleri

Parametre	Değeri
Akım	4,3 Arms
Hız	3000 rpm
Güç	1,85 kW
Moment	7,67 Nm

Prototip CNC tezgâhta kullanılan Z eksen motorunun resimleri Şekil 2.25’te ve Tablo 2.4’te motorun parametre değerleri gösterilmiştir. Z ekseninde kullanılan AC Servo motor frenli olarak tercih edilmiştir. Bunun nedeni herhangi bir ani güç kesintisinde Z ekseninin kalıba (işlenen parçaya) çarpmasının engellenerek spindle motorun veya kalıbın zarar görmesinin önüne geçilmesidir.

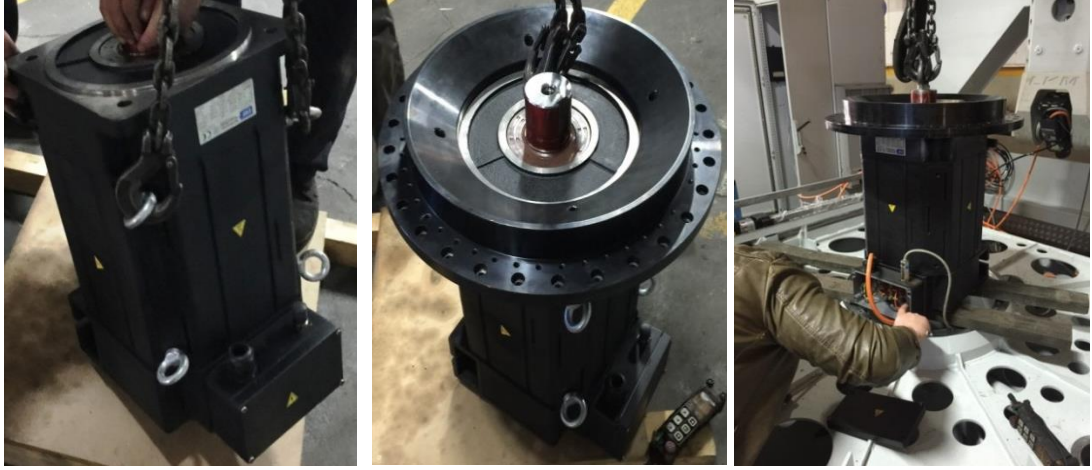


Şekil 2.26. Prototip CNC’de kullanılan A eksen motor görüntüleri

Tablo 2.5. A eksen motoru (Spindle motoru döndüren motor) özellikleri

Parametre	Değeri
Akım	2,76 Arms
Hız	3000 rpm
Güç	1,12 kW
Moment	4,7 Nm

Prototip CNC tezgâhta kullanılan A eksen motorunun resimleri Şekil 2.26’da ve Tablo 2.5’te motorun parametre değerleri gösterilmiştir. A ekseninde kullanılan AC Servo motor 180 derecelik aralıkta çalışmaktadır. Kesici ucun (spindle)  $\beta$  açısı A eksen motoru ile sağlanmaktadır.



Şekil 2.27. Prototip CNC’de kullanılan C eksen motor görüntüleri

Tablo 2.6. C eksen motoru (Döner tabla motoru) özellikleri

Parametre	Değeri
Akım	5,5 Arms
Hız	10 rpm
Güç	0,942 kW
Moment	9000 Nm

Prototip CNC tezgâhta kullanılan C eksen motorunun resimleri Şekil 2.27’de ve Tablo 2.6’ta motorun parametre değerleri gösterilmiştir. C ekseninde kullanılan AC Servo motor 360 derecelik aralıkta çalışabilen güçlü bir servo motor kullanılmıştır. Döner tablanın istenen noktaya gitmesi ( $\alpha$  açısı) C eksen motoru ile sağlanmaktadır. Bu motor yüksek ağırlıklarda ve hassas konumlamaya uygun olarak tercih edilmiştir.



Şekil 2.28. Prototip CNC’de kullanılan spindle motor görüntüleri

Tablo 2.7. Spindle motor özellikleri

Parametre	Değeri
Akım	14,6 Arms
Hız	40000 rpm
Güç	6,5 kW
Moment	5,17 Nm

Prototip CNC tezgâhta kullanılan spindle motorunun resimleri Şekil 2.28’de ve Tablo 2.7’de motorun parametre değerleri gösterilmiştir. Prototip makinenin çalışma alanları ve hassas işleme parametreleri baz alınarak yüksek devirlerde çalışabilen sağlam bir spindle motor ihtiyacının olduğu belirlenmiştir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda yaklaşık olarak 40000 devir/dakika hızda çalışabilen bir spindle motor kullanılmıştır. Spindle motorun çok yüksek devirlerde çalışması sayesinde, küçük boyutlardaki karakter ve desenlerin işlenmesi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.29. Prototip CNC’de kullanılan takım değiştirme motor görüntüleri

Tablo 2.8. Takım değiştirme motor özellikleri

Parametre	Değeri
Akım	2,73 Arms
Hız	8000 rpm
Güç	0,59 kW
Moment	0,87 Nm

CNC takım tezgâhları otomatik takım değiştirme sistemleri ile donatılmıştır. Böylece, yazılan parça programı denetimi altında takımlar seçilebilir ve değiştirilebilir. Böyle bir sistem üretimi artırır ve insansız bir operasyon için potansiyel oluşturur. Birçok



CNC tezgâhında, takım bağlama elemanlarının bulunduğu ve bağlandığı taretli standart takım bağlama sistemleri kullanılmaktadır. Taret, içine kesici takımların yerleştirildiği tezgâh parçasıdır. Bunlar otomatik olarak döner. Yani iş parçasının işlenmesi için farklı bir takım bağlamak ve takımın yeni bir konuma dönmesini sağlamak için programlanabilir [61]. Prototip CNC tezgâhta kullanılan takım değiştirme motorunun resimleri Şekil 2.29’da ve Tablo 2.8’de motorun parametre değerleri gösterilmiştir.

Prototip makinede kullanılan motorları, yağlama ünitesi vb. elektronik aksamaları kontrol etmek için kullanılan motor sürücülerini, kontrol kartı ve diğer ekipmanların panoya yerleştirilmiş görüntüleri Şekil 2.30’daki gibidir.



Şekil 2.30. Motor sürücülerini ve pano iç görüntüleri

Prototipi gerçekleştirilen CNC makinede 1 adet 0,59 kW, 1 adet 6,5 kW, 1 adet 0,942 kW, 1 adet 1,12 kW, 1 adet 1,85 kW ve 2 adet 1,99 kW güç değerlerine sahip toplam

7 adet Servo motor kullanılmıştır. Prototip makinenin toplam gc değeri yaklaşık olarak 15 kW değerindedir.



### **3. PROTOTİP CNC MAKİNESİNİN YAZILIM ÇALIŞMASI**

Bu bölümde CAD-CAM-CNC konuları hakkında bilgiler, Koordinat Sistemleri, DXF veri formatı – NC format ve mekanik tasarımla uyumlu olarak geliştirilen özgün yazılım çalışmasına yer verilmiştir.

#### **3.1. CAD-CAM Sistemleri**

Bilgisayar Destekli Numerik Kontrol için kısa ad olarak kullanılan CNC tezgâh ve sistemleri, yazılı bir programa göre insanın hiçbir müdahalesi olmadan bir parçayı işleyen veya bir işi yapan sistemlerdir. 1970'lerin ortalarından başlayarak, bilgisayar destekli tasarım sistemleri, elektronik hazırlama ile elle hazırlanan taslakları yeniden üretebilme yeteneğinden daha fazla kabiliyet sağlamaya başladığında, şirketlerin CAD'a geçmesinin maliyet avantajı belirginleştirilmiştir. Neticede CAD işlemi tasarımcıya mühendislik hesaplamaları yapma olanağı sağlamıştır. Bu geçiş sırasında, hesaplamalar elle ya da bilgisayar programları çalıştıran kişilerce gerçekleştirilirdi. CAD, taslak, tasarımcı ve mühendislik rollerinin birleşmeye başladığı mühendislik endüstrisinde devrim olarak tanımlanmaktadır. CAD, bilgisayarların endüstride başlamış olduğu yaygın etkinin bir başka örneğidir. Mevcut bilgisayar destekli tasarım yazılım paketleri 2D vektör tabanlı çekim sistemlerinden 3D katı ve yüzey modelleyicilerine kadar uzanmaktadır. Modern CAD paketleri aynı zamanda, üç boyutlu dönmelerin yapılmasına da sıklıkla izin vererek tasarlanmış bir nesnenin herhangi istenilen bir açıdan, hatta içeriden görünmesine izin vermektedir. Bazı CAD yazılımları dinamik matematiksel modelleme yeteneğine sahiptir ve bu durumda CAD olarak pazarlanabilmektedirler. CAD teknolojisi, küçük konut türlerinden (evler) en geniş ticari ve endüstriyel yapılara (hastaneler, fabrikalar vb.) kadar her türlü binanın tasarım ve taslağı hazırlanırken araç ve makine tasarımında kullanılmaktadır. CAD, esas olarak, 3B modellerin ve/veya 2B fiziksel bileşenlerin çizimlerinin ayrıntılı mühendisliği için kullanılır; ancak, bileşenlerin kuvvet ve dinamik analizi ile bileşenlerin üretim yöntemlerinin tanımlanmasına kadar, kavramsal tasarım ve ürün yerleşiminden mühendislik süreci boyunca da kullanılır. Nesnelere tasarlamak için de

kullanılabilir. Dahası, birçok CAD uygulaması artık gelişmiş işleme ve animasyon yetenekleri sunuyor, böylece mühendisler ürün tasarımlarını daha iyi görselleştirebiliyorlar. CAD, bilgisayar destekli teknolojiler kapsamında özellikle düşük maliyetli ürün geliştirme ve tasarım döngüsü kısaltılması gibi önemli bir teknoloji haline gelmiştir. CAD, tasarımcıların ekranda işi düzenler, geliştirmeleri, yazdırmaları ve ilerideki düzenlemeler için kaydederek çizimlerde zamandan tasarruf etmesini sağlamaktadır. CAD sistemindeki özellikler, gerilme mukavemeti, akma dayanımı, elektriksel veya elektro-manyetik özellikler gibi birçok ölçüm araçları için kullanılabilir. CNC tezgâhlarındaki ürünün işlenmesi için CAD olarak bilinen (Computer Aided Design) Bilgisayar Destekli Tasarım, bir ürünün tasarımına yönelik olup, ürünün imalat resmini oluşturur. Günümüzde CAD her çeşit makine, gemi, uçak, taşıt, beyaz eşya ve her çeşit ürünlerin tasarımında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. CAD, çizimlerinin yanı sıra tasarımın en ilerlemiş matematiksel (Sonlu Elemanlar) yöntemleriyle ürünlerin mukavemet, dinamik, ısı vb. bakımından analizlerini ve optimizasyonunu yapmakla beraber simülasyonlarını da gerçekleştirmektedir. Tüm bu işlemleri çok kısa zamanda gerçekleştirerek, yeni ürün çevrimleri ile ve bunların maliyetlerinin önemli şekilde azalmasını sağlamaktadır.

CAM'ın erken ticari uygulamaları, otomotiv ve havacılık endüstrisinde büyük firmalardaydı, örneğin Pierre Béziere 1960'lı yıllarda Renault'da araç gövdesi tasarımı ve aleti için CAD/CAM uygulamasını UNISURF geliştirmeye çalışıyordu. Tarihsel olarak, CAM yazılımının yetenekli CNC makineleri tarafından aşırı derecede katılım gerektiren bazı eksiklikleri olduğu görülmüştür. Fallows ilk CAD yazılımını oluşturdu ancak bu ciddi eksikliklere sahipti ve derhal gelişmekte olan aşamaya geri döndü. CAM yazılımı, her bir takım tezgâhi denetimi standart G kod setine eklendiğinde olduğu gibi, en az yetenekli makine için kod çıkarmaktadır. Artan esneklik için ya da bazı durumlarda, örneğin yanlışlıkla CAM yazılımını veya belirli araçları kurdukları için, CNC makinesi, program düzgün çalışmadan önce el ile düzenleme gerektirir. Genellikle, CAD operatörünü, verileri çok çeşitli yazılımlar tarafından desteklenen IGES veya STL veya Parasolid biçimleri gibi yaygın veri formatlarından birinde vermeye zorlamak gerekirdi. CAM yazılımının çıktısı genellikle basit bir G-kodu / M kodlu bir metin dosyasıdır.

CAM yazılımları ve makineleri karmaşıktıkça, CNC makinisti işgücünden uzaklaştırmak yerine, bir bilgisayar mühendisi ve mühendisinin yaklaşımına erişmek için bir makine üreticisi veya makine operatörünün becerileri gelişir.

Üretim ortamı gittikçe daha da karmaşıklaşır. Bu durum Ms tarafından CAM ve PLM araçlarına duyulan ihtiyaç NC programcısı veya makinist, modern uçak sistemlerinin pilotu tarafından bilgisayar yardımına olan ihtiyaca benzemektedir. Modern makineler bu yardım olmadan doğru biçimde kullanılamaz.

Günümüzdeki CAM sistemleri, torna, 5 eksen işleme ve tel EDM dahil olmak üzere tüm takım tezgâhlarını desteklemektedir. Bugünün CAM kullanıcıları, daha yüksek ilerleme oranları, daha iyi takım ömrü ve yüzey bitirme ve optimize edilmiş Z eksen derinlik kesikleri için optimize edilmiş takım eksen eğilimi ve ayrıca tarama hareketlerinin belirtimi gibi kesintisiz operasyonları sürükleyerek aerodinamik araç yolları oluşturabilir. Kullanıcıların hedeflerine uygun kullanım kolaylığı sağlamak için, modern CAM çözümleri tek başına bir CAM sisteminden tamamen entegre çok CAD 3D çözüm setine ölçeklenebilir. Bu çözümler parça planlama, mağaza dokümantasyonu, kaynak yönetimi gibi imalat personelinin tüm ihtiyaçlarını karşılamak için oluşturulmuştur.

CAM olarak isimlendirilen (Computer Aided Manufacturing) Bilgisayar Destekli İmalat, esasen imalata yönelik bir sistemdir. CAM, CAD sisteminde oluşturan üretim resimlerine göre oluşturulacak ürünün işlenmesi için takım yolunu oluşturur ve bunu CNC tezgâh ve sistemlerinin çalışması için NC programına dönüştürür. NC programının esası G kodlarıdır. Günümüzde CAM sistemi CAD-CAM altında entegre olarak çalışır. Özetlenecek olursa CAD, CAM, CNC sistemleri arasında çok yakın ilişkili kavramlardır. Günümüzde CAD-CAM-CNC şeklinde bütünleşmiş durumundadır. Bunun sonucu olarak üretim ve ürün yenilik çevrimleri çok kısa zamanda gerçekleştirilerek, çok geniş, kaliteli ve ucuz ürün yelpazesi meydana getirilmektedir. Üretim alanında çalışan herhangi bir kimsenin, CNC tezgâhları ve bunların programlanması hakkında az veya sistemi kontrol edebilecek bilgiye ihtiyacı vardır. Örneğin tasarımcı açısından, CNC tezgâhta işlenecek iş parçasının uygun bir şekilde boyutlandırılması ve toleranslarının belirtilmesi için CNC ile ilgili yeterli bilgilere sahip olunması önemlidir. Yöneticiler, atölye şefleri, ustalar, kalite kontrol

operatörleri, bakım çalışanları ve benzeri personel açısından yeni tezgâh alınması, yerleştirilmesi, işleme konulması, planlama, kontrol, bakım vb. gibi işlemlerini verimli ve eksiksiz yerine getirmesi için CNC tezgâhına hâkim olmaları çok önemlidir. Operatörler ve CNC tezgâhları ile direkt çalışanlar yüksek bir verim elde etmek için, bu tezgâhların çalışma ilkelerini ve özellikle G programlama sistemini iyi bilmeleri gerekir.

CNC tezgâhlarda bir parçanın işlenmesi parçanın NC programında açıklanır. Buna göre program, bir parçanın tam olarak işlenmesi için tüm bilgileri içeren ve bunları tezgâhların kontrol ünitesine giriş olarak veren bir belgedir. Genelde bir programda dört çeşit bilgi vardır.

- Geometrik bilgiler. Parçanın şeklini ifade eden bilgilerdir.
- Hareket bilgileri. Takım veya parçanın yaptığı hareketlerin şeklini ve yönünü içeren bilgilerdir. Genelde CNC sistemlerin programlanmasında parça ilerleme hareketi olsa dahi, bu hareketler takım tarafından yapıldığı varsayılır.
- Teknolojik bilgiler. Takımı, ilerleme hızını ve kesme hızını içerir.
- Yardımcı bilgiler. İş milinin hangi yönde dönmesini, takım değiştirmesini, kesme sıvısının kullanılması vb. işlemleri içerir.

Genelde CNC tezgâhları için program oluşturmak için üç yöntem vardır:

- ISO kod (G kodu) sistemine dayanan, direkt programlama.
- APT gibi programlama dili.
- Grafik etkileşime dayanan programlar. Bunlar; CAM adını taşıyan programlar ve bazı firmaların özel olarak geliştirdikleri ve genelde diyalog esasına dayanan programlama yöntemi şeklinde olabilirler.

Programlama sistemleri ne olursa olsun şimdiki haliyle CNC tezgâhları ISO (dosya biçimi) yani G koduna göre çalışırlar. Buna göre diğer yöntemlerle önce takım yolu oluşturulur, daha sonra postprosesör denilen bir sistemle yol bilgileri G kodlarına dönüştürülür ve bu şekilde tezgâha verilir.

Direkt veya manuel programlama da denilen yöntemde program, direkt G kodları ile yazılır. Program, kontrol ünitesinin kontrol panosunu kullanarak direkt tezgâha

aktarılır veya herhangi bir belge gibi bir bilgisayarda yazılır ve sonra direkt kablo, disket, taşınabilir bellekle tezgâha verilir. Direkt programlama genelde karmaşıklık derecesi az olan parçalara uygulanır.

APT (Automatically Programmed Tools) aslında bir programlama dilidir. Bu yöntemde parçanın geometrisi Point (nokta), Line (düz çizgi), Circle (Daire), Surface (yüzey) vb. gibi geometrik komutlarla açıklanır. Teknolojik komutlarla takım ve kesme koşulları belirlenir ve bunlara dayanarak takım hareket komutları ile takım yolu oluşturulur. Daha sonra bu yol bir son işlemci (postprosesörle) G kodlarına dönüştürülür. Günümüzde CAM sistemlerin ortaya çıkması ile bu yöntem artık kullanılmaz hale gelmiştir. Bununla beraber APT programlama dili CAM programlama sisteminin esasını oluşturur.

CAM programlama yönteminde parçanın geometrisi direkt parça resim üzerinde açıklanır. Bu nedenle bu çeşit programlama yöntemine grafik etkileşim programlama denilir. Parça resmi genelde bir CAD programının yardımıyla çizilir. Daha sonra APT programlama dilinde de kullanılan geometrik, teknolojik ve takım hareket komutları ile takım yolu oluşturulur. Ancak burada geometrik, teknolojik ve takım hareket komutları program içinde algoritma şeklinde hazır bulunurlar. Dolayısıyla bunların kullanılması için programlama dili değil de, program menüsünde bulunan bir takım komutları seçerek veya diyalog kutularına gereken bilgileri girerek gerçekleşir. Dolayısıyla CAM programları hiçbir programlama dili bilmeyen kişiler tarafından kullanılabilir. Bu husus, günümüzde bu tip programların yaygın bir şekilde kullanılmasının temel nedenidir.

Yukarıda bahsedildiği üzere 3 boyutlu karmaşık parçaların programlanmasında CAM adını taşıyan Bilgisayar Destekli İmalat programlama sistemi ile çok daha çabuk yapılabilmektedir. Bir ürün esas tasarım ve üretim olmak üzere iki kademedeyi meydana getirilir. CAM sistemleri ürünün tasarımını yapmaz; yalnızca üretimi için NC programlarını oluşturur. Buna göre CAM sistemlerinin kullanılması için ürünlerin tasarımını yapan bir CAD sistemine ihtiyaç vardır. CAD olarak bilinen Bilgisayar Destekli Tasarım, bir ürünün tasarımına yönelik olup, ürünün resmini oluşturur. Günümüzde tüm Mühendislik-Mimarlık alanlarında uygulanan CAD sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ürün üretiminde tasarım ve üretim arasında daha

önceleri iş hazırlığı denilen proses planlama denilen bir kademe daha vardır. Bu kademe ile ilgili CAPP (Bilgisayar Destekli Proses Planlama) denilen bilgisayar programları da bulunur. Ancak bu programlar yeteri kadar gelişmemiş ve bu nedenle daha az kullanılmaktadırlar. Bu nedenle proses planlama, NC programın düzenlenmesi sırasında CAM programcısı tarafından kendi bilgisine göre yapılır. Teknolojinin gelişmesi ile CAD-CAM ve CNC sistemleri ile CAD-CAM-CNC adını taşıyan bütünleşik bir sistem meydana getirilmiştir. Bu bütünleşmede CAD-CAM programını içeren bir bilgisayardan, CNC sistemine NC programı göndermek çok kolay bir hal almıştır.

Özetlenirse günümüzdeki mevcut herhangi bir CAD-CAM programı ile aşağıdaki işlemler yapılabilir.

- 2D düzeyinde teknik resim kurallarına göre parça üretim ve montaj resimleri meydana getirilir.
- Tel kafes modelleri oluşturulur.
- Yüzey modelleri oluşturulur.
- Matematiksel ve serbest denilen yüzeyler meydana getirilir.
- Katı nesnelere çizilir.
- 2 veya 3 boyutlu resimler parametrik olarak çizilebilir ve bu şekilde çizimde otomasyon sağlanır.
- Tüm çizimler değiştirilebilir, kesme, kopyalama, yapıştırma gibi işlemler yapılabilir.
- İçerisinde somun, civata vb. gibi standart parça kütüphaneler bulunur. Bu parçalar direkt olarak çizilen resimlere yerleştirilebilir.
- Ürünün imalat yoluyla fiziksel prototipi yapılmadan simülasyon yapılır.
- Başka CAD programları ile resim alışverişinde bulunur.
- Resimler direkt CAM sistemine veya başka bir sisteme gönderilebilir.
- Parçaların kütle özellikleri hesaplanır.
- İçerdikleri çeşitli programlarla mukavemet, şekil, değiştirme, titreşim vb. gibi hesaplar FEA analizleri yapılır.
- İçerdikleri programlama parçaların teknik ve ekonomik kurallara göre optimizasyonu yapılabilir.

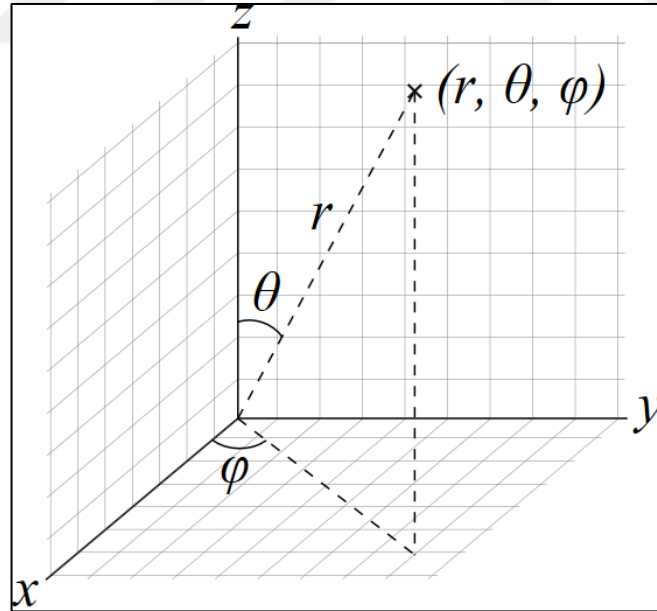


- Parçanın işlenmesi için oluşturulan çizime göre takım yolu ve buna bağlı NC programı oluşturulabilir.
- C, C++, Visual Basic gibi programlama dilleri programa dâhil edilebilir.

CAD-CAM sistemlerinde yukarıda bahsedilen uygulamaların yaygın bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir [54,55].

### 3.1.1. CNC koordinat sistemleri

Koordinat sistemi, bir noktanın veya geometrik elemanın konumunu hatasız şekilde belirlemek için çoklu olarak sayıların veya koordinatların kullanıldığı sistemdir. Örnek olarak Öklid mesafesi gösterilebilir. Koordinatların sıraları önemlidir. Bazen "x-koordinatı" gibi bazen de bir harfle konumlarına göre tanımlanırlar. Koordinatlar, temel matematikteki reel sayılar olarak, karmaşık sayılar ya da soyut bir sistemin elemanları olabilirler. Analitik geometrideki koordinat sisteminin kullanılması geometri problemlerinin sayılarla ifade edilmesini sağlar. Bu durum analitik geometrinin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 3.1. Küresel koordinat sistemi kesit görüntüsü

Küresel koordinat sistemi başta fizik olmak üzere temel bilimlerde yaygın olarak kullanılır. Öklid uzayındaki her noktaya üç sayı atar: koordinat mesafesi  $r$ , kutup açısı  $\theta$  ve azimut açısı  $\varphi$  olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.1'de küresel koordinat sisteminin kesit görüntüsü görülmektedir.

Bir koordinat sisteminin en basit örneği, sayı çizgisini kullanarak gerçek sayılarla çizgide noktaların tanımlanmasıdır. Bu sistemde, keyfi bir 0 noktası (orijin) belirli bir satırda seçilir. P noktasının koordinatı 0'dan P'ye işaretli uzaklık olarak tanımlanır; buradaki işaretli mesafe, P hattının hangi tarafına bağlı olarak pozitif veya negatif olarak alınan mesafedir. Her noktaya benzersiz bir koordinat verilir ve her gerçek sayı benzersiz bir noktanın koordinatını verir.

Bilindiđi üzere aslında tüm gerçek nesnelere üç boyutludur. Bu nesnelere çizmek için CAD sistemlerinde başlangıcında, teknik resimde kullanılan 2 boyutlu (2B) ortografik çizim yöntemi uygulanmıştır. Bu sistemde herhangi bir ürünün üstten, alttan ve yan taraftan 2 boyutlu görünüşleri çizilir. İki boyutlu sistemde bir çizim düz çizgiler, daire, yay gibi iki boyutlu geometrik elemanlardan meydana gelir. Buna göre CAD sistemlerinin 2B düzeninde resim oluşturma esasları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

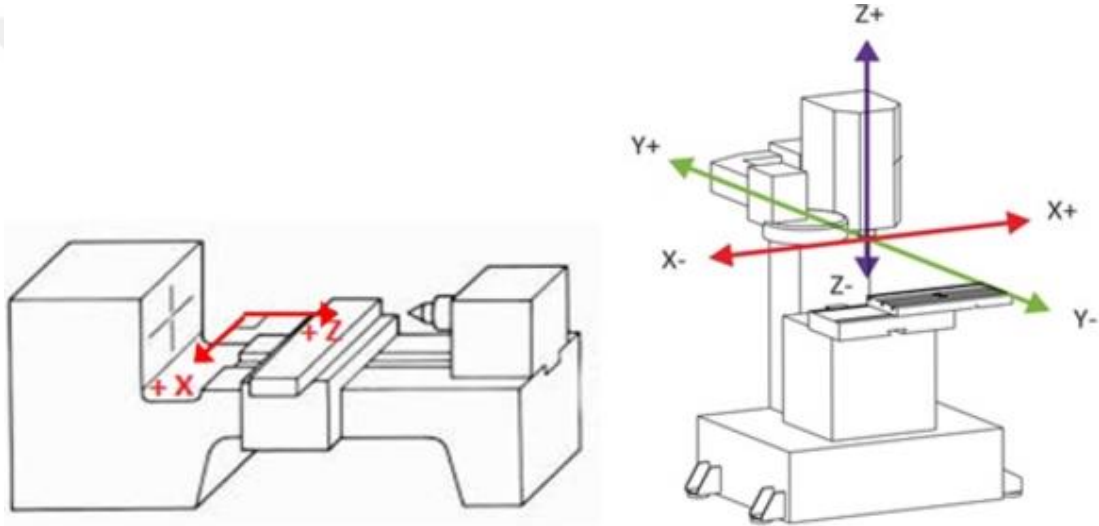
- Önce komutlar yardımıyla geometrik elemanlar çizilir.
- Sonra düzenlemelerle parça resmi meydana getirilir.

2B boyutlu çizimleri çizmek için birçok CAD sisteminde Sketch (Taslak) denilen tasarım penceresi bulunur. İlgili pencerede 2B çizimleri çizmek için tüm komut araçları bulunur.

İlk CAD sistemlerinde resimler yalnızca iki boyutlu (2B) çizilebiliyordu. 1970'lerin sonlarında üç boyutlu görüntü veren perspektif çizimler çizilmeye başlanmıştır. Üç boyutlu çizimler önce tel kafes modeli, sonra yüzey modelleme ve özellikler 1990'lardan sonra gerçek hayattaki nesnelere temsil eden katı modelleme denilen sistemler çizilmeye başlanmıştır. Buna göre başlangıçta yüzey modelleme tel kafes ve katı modelleme yüzey modellemeye dayanarak oluşturuluyordu. Günümüzde gerek yüzey, gerek katı modelleme, direkt 3B boyutlu olarak çizilmektedir. Bu çizimlere renk, gölgeleme, çeşitli bakış açıları vererek görünüş olarak gerçek makine sistemleri oluşturulur. Ayrıca simülasyon ve animasyonla bu makineler gerçek gibi çalıştırılır, çalışmaları teste tabi tutulur ve üretilmeden önce bunların özellikleri belirlenir. Böylelikle yatırım maliyeti ile birlikte, makinelerin yenileme süreçleri de büyük ölçüde azalır.

Üç boyutlu nesnelerin yüzey ve katı modellerine dayanarak, CAM sistemleri geliştirilmiştir. Ayrıca yüzey modellemede, yüzeylerin alanları ve buna bağlı mühendislik hesaplarında kullanılan eylemsizlik momentleri hesaplanabilir. Katı modellemede nesnelerin hacmi, ağırlıkları ve kütleli eylemsizlik momentleri de hesaplanır. Kısaca üç boyutlu nesnelerin ekranda görüntülenmesi yalnızca nesne şekillerinin kolay anlaşılması bakımından değil, bilgisayarlı üretim ve mühendislik analiz alanlarında kullanılmasında da çok önemlidir.

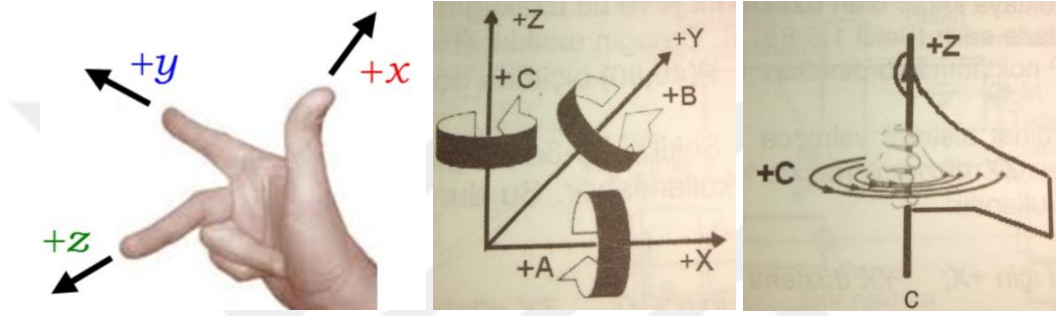
CNC sistemler Şekil 3.2’de gösterildiği gibi belirli bir koordinat sistemine göre çalışırlar.



Şekil 3.2. CNC tezgâhında kullanılan temel eksenlerin gösterimleri

CNC sistemlerde standart olarak kabul edilen koordinat sistemi Kartezyen koordinat sistemidir. Koordinat sistemine parçayı işlemek için takım yolu tayin edilir. Parçanın geometrisini açıklayan takım yolu parça üzerindeki önemli noktalardan meydana gelir. Burada CNC tezgâhlarının koordinat sistemini incelemeden önce, koordinat sistemleri hakkında bilgi verilecektir. Koordinat sistemi bir noktanın düzlemde veya uzayda tam olarak yerini tayin eden bir araçtır. İki eksenli koordinat sisteminde X ve Y düzlemlerindeki koordinatlar bulunmaktadır. İki eksenli koordinat sisteminin yanı sıra üç eksenli Kartezyen koordinat sistemi de vardır. Üç eksenli koordinat sisteminin eksenleri X, Y, Z simgeleri ile ifade edilirler. XY, YZ ve XZ olmak üzere üç düzlem içerirler. XY düzleminde  $Z=0$ , XZ düzleminde  $Y=0$  ve YZ düzleminde  $X=0$ ’dır. Çalışma düzlemleri de denilen bu düzlemler belirli kodlarla tanımlanmışlardır.

CNC sistemlerinde doğrusal hareketlerin yanı sıra dönme hareketleri de vardır. Buna göre CNC sistemlere ait koordinat sistemlerinde X, Y, Z ile gösterilen doğrusal hareket eksenlerinin yanı sıra, bu eksenlerin etrafında dönme eksenleri de ifade edilmiştir. Dönme eksenleri X eksenini etrafında A, Y eksenini etrafında B ve Z eksenini etrafında C ile ifade edilir. Üç eksenli koordinat sistemlerinde X, Y, Z eksenlerinin yönlerini tayin etmek için genelde sağ-el kuralı kullanılır. Bu kural; X eksenini esas alınırsa, Y eksenini buna dik ve Z eksenini XY düzleme diktir. Eksenlerin yönleri; başparmak +X yönünü, işaret parmağı +Y yönünün ve orta parmak +Z ekseninin yönünü gösterir.



Şekil 3.3. Koordinat düzleminde sağ-el kuralı gösterimi [54]

+A, +B, +C dönme yönleri Şekil 3.3'te gösterilen yine sağ-el kuralı ile tayin edilir. Buna göre eksen, başparmak eksenin pozitif yönünü gösterecek biçimde tüm elle kavranırsa, diğer parmakların uçları dönmenin pozitif yönünü gösterir. Şekil 3.3'te bu kural etrafındaki dönme eksenini C ile gösterilen Z eksenine uygulanmıştır.

Kartezyen koordinat sisteminin yanı sıra polar, silindirik ve küresel koordinat sistemleri de kullanılır. Bu koordinat sistemlerinin özelliği, bir noktanın yerini göstermek için eksenlerin yanı sıra açıların da kullanılmasıdır. Buna göre 2-boyutlu düzlemde uygulanan polar koordinat sisteminde bir noktanın koordinatları, orijinden noktaya kadar olan uzaklık R ve bu uzaklığın orijine X eksenini arasındaki açı A ile ifade edilir. Polar koordinat sistemleri XY, YZ ve ZX düzlemlerinde kullanılabilir.

CNC tezgâh ve sistemlerde; tezgâh, parça ve takım olmak üzere üç ayrı koordinat sistemi vardır. Tezgâhın kontrol edilen hareket yönlerine tezgâh eksenleri denir. Bir CNC tezgâhında; X, Y ve Z ile gösterilen üç doğrusal hareketin yanı sıra A, B, C ile simgelenen üç dönme hareketi olmak üzere toplam altı eksen olabilmektedir. Ayrıca ana eksen denilen X, Y, Z eksenlerine paralel olarak U, V, W ile ifade edilen yardımcı üç doğrusal eksen daha ilave edilebilir.

NC programında parçanın geometrisi, parça üzerindeki önemli noktalarının koordinatları ile açıklanır. Bu koordinatlar tezgâh koordinat sisteminden bağımsız olarak programcı tarafından seçilen parça koordinat sistemine göre ifade edilir. Bu koordinat sisteminin orijini parçanın sıfır noktasıdır. Parçanın sıfır noktası, parça üzerinde veya dışında herhangi bir noktada olabilir. Fakat eksen yönleri, tezgâh eksenleri yönünde olmalıdır.

Takım koordinat sisteminin orijini tayin eden takımın sıfır noktası, genelde milinin veya iş miline bağlı takım tutturma tertibatının alın yüzeyinde seçilir. Takımın koordinatları bu noktaya göre belirlenir. Takım boyutu temsil eden bu koordinatlar tornalamada Z ve X, frezelemede yalnızca Z'dir. Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere, bir CNC tezgâhında tezgâhın sıfır noktası, parçanın sıfır noktası, takımın sıfır noktası ve eksen sınır noktası olmak üzere dört önemli nokta vardır [54].

### **3.1.2. Autocad DXF veri formatı ve NC formatı**

Sayısal kontrol (NC-Numerical Kontrol) fikri, II. Dünya Savaşı sonlarında ABD Hava Kuvvetleri'nin ihtiyacı olan kompleks uçak parçalarının üretilebilmesi için ortaya atılmıştır. Çünkü bu tür parçaların o günkü mevcut imalat tezgâh ve teknikleri ile üretilebilmeleri mümkün değildi. Bu tarihten sonra pek çok takım tezgâh imalatçısı nümerik kontrollü tezgâh imalatına başladı. Nümerik kontrol metal ve diğer tür malzemelerin talaş kaldırma suretiyle işlenmesinde kullanılan her türlü takım tezgâhında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tezgâhlardan bazıları şunlardır:

- CNC Torna Tezgâhları
- CNC Freze Tezgâhları
- CNC İşleme Merkezleri
- CNC Matkap Tezgâhları
- CNC Taşlama Tezgâhları
- CNC Tel Kesme Tezgâhları
- CNC Zımbalı Deliciler
- CNC Alevle Kesme Tezgâhları
- CNC Lazer Kesme Tezgâhları
- CNC Presler ve Diğer Tür CNC Tezgâhlar

Nümerik Kontrol, takım tezgâhlarının sayı, harf vb. sembollerden meydana gelen ve belirli bir mantığa göre kodlanmış komutlar yardımıyla çalıştırılmasıdır. Sayısal komutlar, tezgâh kontrol üniteleriyle bilgisayarlar arasındaki özel bir dil olarak da söylenebilir. Komutlar, CNC tezgâhına bloklar halinde yüklenmektedir. Her blok tezgâhın anlayacağı bir dizi komuttan oluşmaktadır. NC programında bazı komutların anlamları aşağıdaki tanımlanmıştır.

➤ START	NC programının başlangıcı
➤ MM	Ölçü sistemi metrik
➤ 07	NC programının numarası
➤ TOOL 1	Kesici takım numarası
➤ TD	Kesici takım çapı
➤ FR	İlerleme
➤ SPINDLE ON	Tezgâh milinin saat ibresi yönünde döndürülmesi
➤ SP	Tezgâh mili devir sayısı
➤ SETUP < zcxyu	Program referans noktası tanıtımı
➤ GO f X	X ekseninde hızlı hareket
➤ GO f Y	Y ekseninde hareket
➤ GO f Z	Z ekseninde hızlı hareket
➤ GO Z	Z ekseninde hareket

Yukarıdaki ifadelerde olduğu gibi NC komutların her birinin karşılık geldiği anlama göre CNC tezgâh, istenen işlemleri sırasıyla gerçekleştirerek işleme vb. görevlerini yerine getirmektedir [56].

DXF ilk olarak Aralık 1982'de AutoCAD 1,0'ın bir parçası olarak tanıtıldı ve AutoCAD yerel dosya formatında, DWG (Drawing-Çizim) formatında verilerin tam olarak sunumunu sağlamayı amaçlamıştır. DXF formatı, Autodesk firması tarafından geliştirilen bir CAD veri dosya biçimidir. AutoCAD ortamı için gereken tüm bilgileri içeren bir ASCII metin (text file) dosyasıdır.

DXF koordinatları her zaman boyutsuzdur, böylece okuyucu veya kullanıcı çizim birimini bilmelidir veya sayfalarındaki metinsel yorumlardan çıkarması gerekmektedir. DXF dosyalarını okuyabilen tüm programların dosya içinde depolanan verilerin

tamamını algılayamayacağı unutulmamalıdır. Çünkü bazı programlar DXF formatındaki dosyalara ait bazı bilgileri tanımamaktadır.

DXF formatı veri transferi için ideal olmasa da alanında standart bir format haline gelmiştir. DXF AutoCAD yazılımı için düşünülmüş bir veri değişim formatı olduğundan AutoCAD versiyonlarına paralel olarak DXF versiyonları vardır. Örneğin, DXF 2010 versiyonu gibi.

DXF yapısında, her bölüm “0” grup koduyla başlar ve “SECTION” (BÖLÜM) kelimesi ile devam eder. Bunu “2” grup kodu ve bölümün ismi (örneğin “HEADER”, BAŞLIK) takip eder. Her bir bölümün elemanları, grup kodlarından ve onların değerlerinden oluşmaktadır. Her bölüm “ENDSEC” kelimesiyle son bulur. DXF'nin ASCII sürümleri herhangi bir metin editörü ile okunabilir. Bir DXF dosyasının temel organizasyonu aşağıdaki gibidir:

HEADER (Başlık) bölümü: Çizim hakkındaki genel bilgileri, her parametrenin değişken adı ve ilişkili bir değeri bu kısımda bulunmaktadır. Bir BDT veri tabanı sürüm numarası ve sistem değişkenlerinin sayılarından meydana gelir.

CLASSES (Sınıflar) bölümü: Bloklar, parçalar ve nesnelere kısımları için bilgi ve veri tabanını içermektedir.

TABLES (Tablolar) bölümü: Bu bölümde adlandırılmış öğelerin tanımları bulunmaktadır. Tablolar kendi aralarında sınıflandırılmıştır. Her birinin bir giriş değişken sayısından oluşabilen aşağıdaki tablolardan oluşmaktadır.

- Application ID - APPID (uygulama tanımlama tablosu)
- Block Record - BLOCK\_RECORD (blok referans tablosu)
- Dimension Style - DIMSTYLE (ölçülendirme stili tablosu)
- Layer - LAYER (katman tablosu)
- Linetype - LTYPE (çizgi tipi tablosu)
- Text style - STYLE (metin stili tablosu)
- User Coordinate System - UCS (kullanıcı koordinat sistemi tablosu)
- View - VIEW (görünüş tablosu)
- Viewport configuration - VPORT (görünüş konfigürasyonu tablosu)

BLOCKS (Bloklar) Bölümü: Bu bölüm, çizimdeki her bloğu oluşturan nesnelere açıklayan blok birimlerinden meydana gelir.

ENTITIES (Parçalar) Bölümü: Bu bölümde, blok referansları da dahil olmak üzere çizim birimleri bulunur.

OBJECTS (Nesneler) bölümü: Çizimdeki grafiksel olmayan nesnelere, sembol tablosu kayıtları veya sembol tabloları bu bölümde kaydedilmektedir. AutoLISP ve ObjectARX uygulamaları tarafından kullanılmaktadır.

THUMBNAILIMAGE (Küçültülmüş resim): DXF dosyası için ön izleme görüntüsünü içermektedir.

END OF FILE (Dosya Sonu) bölümü: DXF dosyasının bittiğini gösteren son bölümdür [57].

Bir DXF'nin veri formatı, "dosyanın her veri ögesinin bir grup kodu" olarak adlandırılan bir tamsayı numarasından gelmesi anlamına gelen "etiketli veri" biçimi olarak adlandırılır. Bir grup kodunun değeri, hangi veri ögesinin türünü izlediğini gösterir. Değeri, belirli bir nesne (kayıt) türü için bir veri ögesinin anlamını da belirtmektedir. Çizim dosyasındaki hemen hemen tüm kullanıcı tarafından belirtilen bilgiler DXF biçiminde temsil edilebilir.

DXF dosyası içerisinde bulunan ENTITIES (parçalar) yapısı kısaca aşağıda verilmiştir:

0 ENTITIES bölüm başlangıcı

SECTION

2

ENTITIES

0 Her işletmenin tanımı için bir giriş

<Parça (unsur) türü>

5

< Parça (unsur) numarası >



330

< Nesne belirlemede ad >

100

AcDbEntity

8

<Katman >

100

AcDb<Sınıf adı >

.

. <bilgi >

.

0

ENTITIES bölüm sonu

ENDSEC

DXF dosyası ENTITIES (parçalar) bölümünde bulunan çizgi (line) içerisindeki grup kodları ve anlamları aşağıda verilmiştir. Şekil 3.4'te AutoCAD ile çizilen bir çizginin DXF formatındaki ifadesi verilmiştir.

- 100 Alt sınıf belirleyici (AcDbLine)
- 39 Kalınlık (isteğe bağlı; varsayılan = 0)
- 10 Başlangıç noktası (WCS de X değerleri)
- 20 Başlangıç noktası (WCS de Y değerleri)
- 30 Başlangıç noktası (WCS de Z değerleri)
- 11 Bitiş noktası (WCS de X değerleri)
- 21 Bitiş noktası (WCS de Y değerleri)
- 31 Bitiş noktası (WCS de Z değerleri)

	<pre> LINE 5 116 330 1F 100 AcDbEntity 8 0 100 AcDbLine 10 20.0 20 50.0 30 0.0 11 60.0 21 90.0 31 0.0 0 </pre>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Şekil 3.4. Rastgele alınmış bir çizginin DXF formatındaki ifadesi

DXF dosyası parçalar (ENTITIES) kısmında bulunan yay (arc) içindeki grup kodları ve anlamları aşağıda verilmiştir. Şekil 3.5'te verilen bir Yay'ın DXF formatındaki ifadesi verilmiştir.

- 100 Alt sınıf belirleyici (AcDbCircle)
- 39 Kalınlık (isteğe bağlı; varsayılan = 0)
- 10 Merkez noktası (UCS de X değerleri)
- 20 Merkez noktası (UCS de Y değerleri)
- 30 Merkez noktası (UCS de Z değerleri)
- 40 Radüs
- 50 Açı başlangıcı
- 51 Açı bitişi

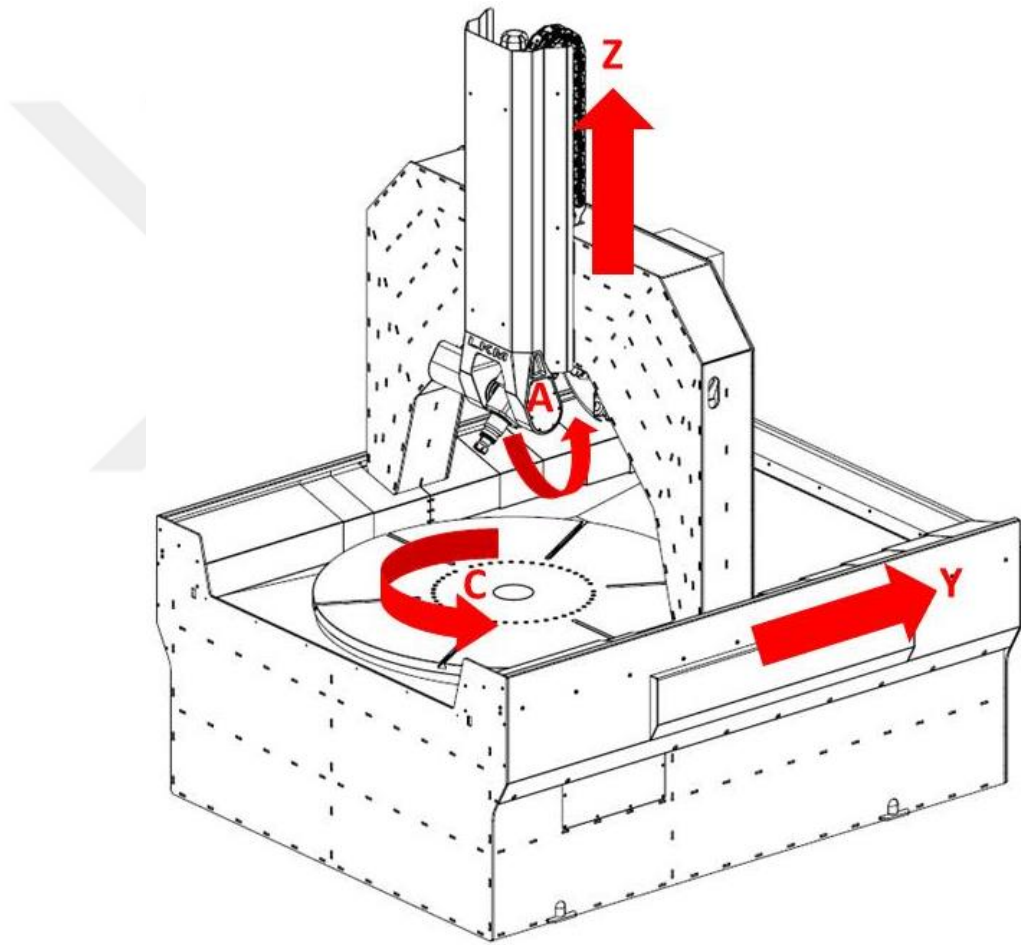
	<pre> ARC 5 180 330 1F 100 AcDbEntity 8 0 100 AcDbCircle 10 2209.21128711998 20 322.0692022287663 30 0.0 40 60 100 AcDbArc 50 251.6544247338646 51 352.729773596183 0 </pre>
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Şekil 3.5. Örnek bir yay çiziminin DXF formatındaki ifadesi

### 3.2. Prototipi Yapılan CNC'nin Matematiksel Modeli ve Yazılımı

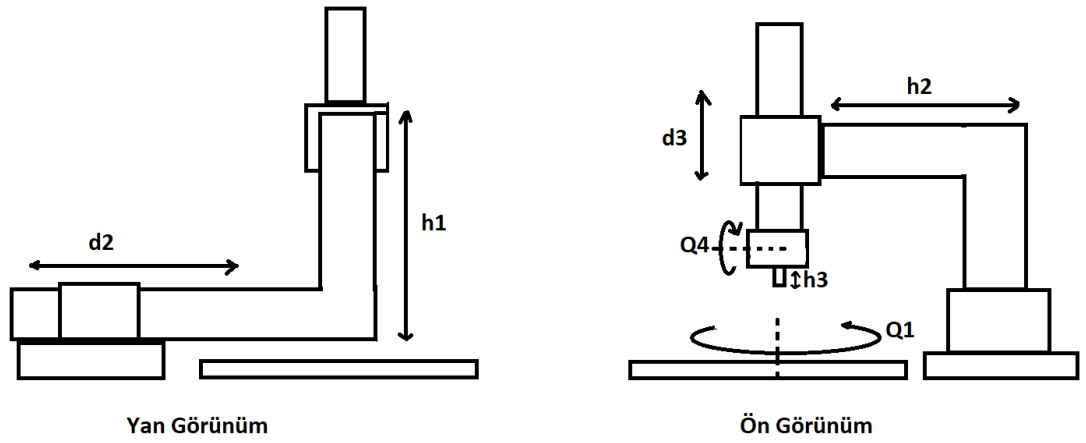
Tez çalışmamız kapsamında yazılım çalışmasının ilk aşaması olarak; öncelikle geniş kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve farklı bilgisayar destekli çizim programları incelenmiştir. Yapılan araştırmada, bilgisayar ortamında gerçekleştirilen çizimlerin matematiksel işleyiş altyapısının anlaşılması üzerine odaklanılmıştır. Bununla beraber, farklı çizim programlarının oluşturduğu DXF uzantılı dosyaların içeriği üzerine çalışmalar yapılmıştır. DXF uzantısını en yaygın olarak kullanan Autodesk firması bünyesinde bulunan Autocad programı incelenmiştir. Numeric Control olarak bilinen komut seti, takım tezgâhlarının çalışması için kullanılmaktadır. Bu yüzden NC ortamında oluşturulan yüzey dosyaları da incelenerek, DXF ve NC uzantılı dosyalarının birleşimi ile dönüştürülmüş NC dosyası elde edilmiştir. Dönüştürülen NC dosyası ile elde edilen koordinatların, matematiksel olarak eğrisel lastik yanağı

yüzeyini önemli ölçüde karşıladığı görülmüştür. Dönüştürülmüş NC koordinatları ilk olarak 3 eksen bir CNC makine üzerinde test edilerek yazılım çıktılarının makine ile uyumlu çalışıp çalışmadığı incelenmiştir. Geliştirilen yazılım algoritması sonucu elde edilen dönüştürülmüş NC koordinatları ve matematiksel denklemlerden elde edilmiş hedef NC koordinatları karşılaştırılarak, yazılım çıktısının doğru bir şekilde elde edildiği gözlenmiştir [58-60]. Prototipi gerçekleştirilen makinenin çalışma eksenleri Şekil 3.6’da ve gerçekleştirilen özgün yazılım algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.6. CNC makinenin çalışma eksenlerinin gösterimi

Prototipi gerçekleştirilen makinede kullanılan özgün yazılım çalışmaları için CNC tezgâhın çalışma eksenleri belirlenmiştir. Ayrıca CNC makinenin hareket eksenleri tanımlanarak Şekil 3.7’de gösterilmiştir. CNC makinenin hareket eksenleri kullanılarak D-H tablosu oluşturulmuş olup, Tablo 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. CNC makinenin hareket eksenlerinin gösterimi

Tablo 3.1. CNC makinenin D-H parametreleri

Eksen	d	Theta	a	Alfa	Sınırlar
1	0	$\theta_1$	0	0	$0^\circ - 360^\circ$
2	$d_2$	0	$h_1$	90	0 mm - 900 mm
3	$d_3$	0	$h_2$	180	0 mm - 600 mm
4	0	$\theta_4$	$h_3$	90	$(+90^\circ) - (-90^\circ)$

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & -\cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

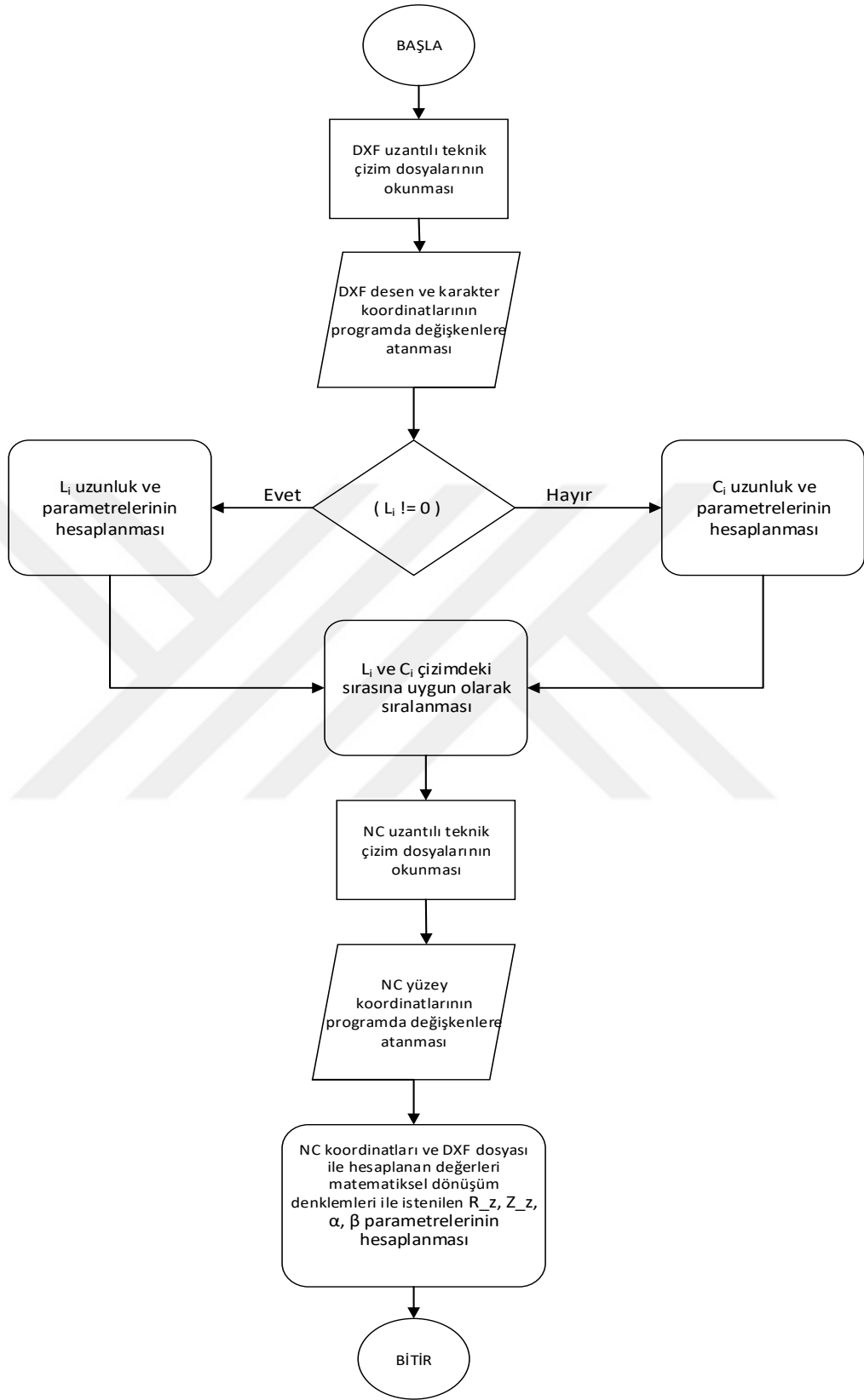
$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & h_2 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & h_3 \times \sin(\theta_4) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & -h_3 \times \cos(\theta_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$T = T_1 \times T_2 \times T_3 \times T_4 \quad (3.5)$$

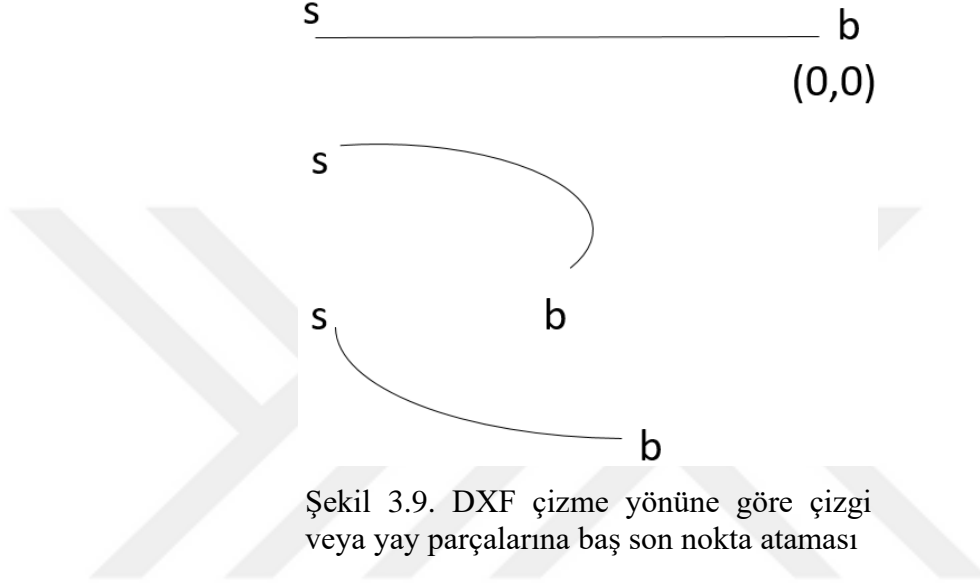
$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \times \cos(\theta_4) & -\cos(\theta_1) \times \sin(\theta_4) & -\sin(\theta_1) & d_2 \times \cos(\theta_1) + h_2 \times \sin(\theta_1) + h_3 \times \cos(\theta_1) \times \sin(\theta_4) \\ \cos(\theta_4) \times \sin(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \times \sin(\theta_4) & \cos(\theta_1) & d_2 \times \sin(\theta_1) - h_2 \times \cos(\theta_1) + h_3 \times \sin(\theta_1) \times \sin(\theta_4) \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & h_1 - d_3 - h_3 \times \cos(\theta_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

CNC makine için belirlenen hareket eksenleri kullanılarak D-H tablosu çıkarıldıktan sonra ileri kinematik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir CNC makine için ileri kinematik hesaplamaları Denklem (3.1)-Denklem (3.6) ile bulunmuştur. Kullanılan matematiksel denklemlerin matematiksel dönüşüm denklemlerinde kullanılması sayesinde özgün yazılım çalışmaları tamamlanmıştır.



Şekil 3.8. Matematiksel dönüşüm yazılımı akış diyagramı gösterimi

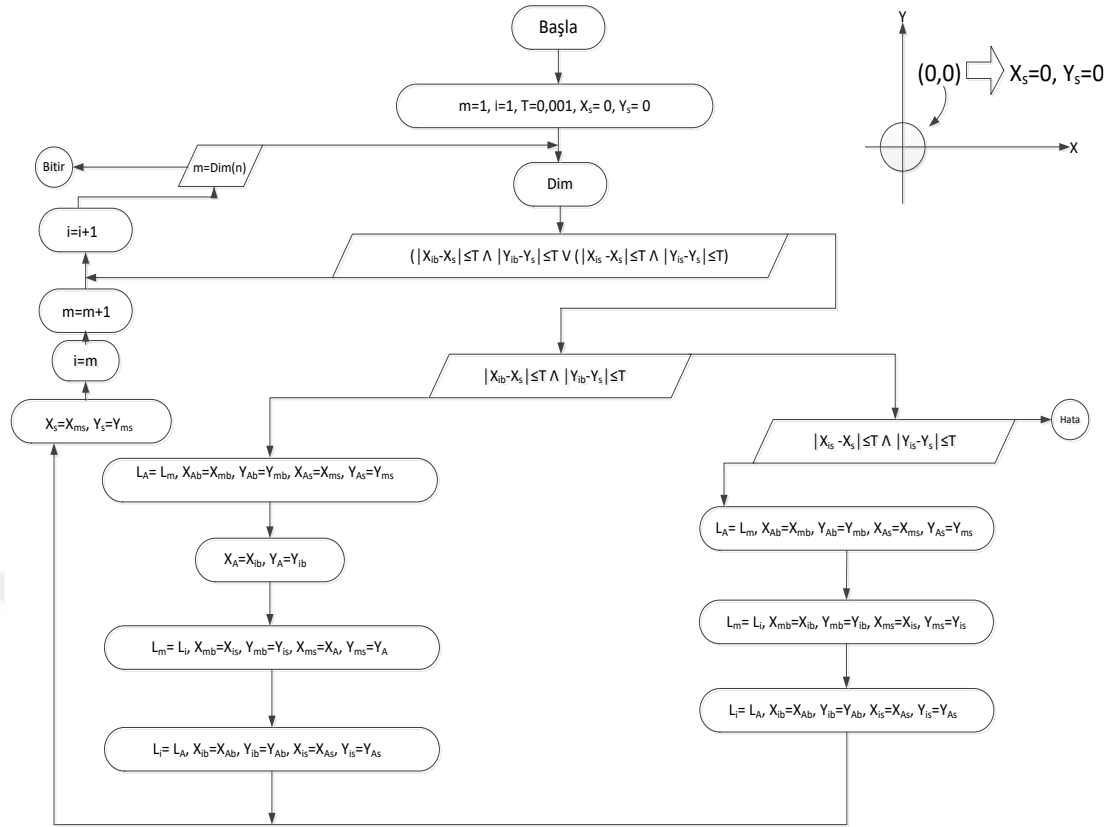
DXF uzantılı dosyada çizilen parçalar rastgele olarak sıralama yapılmadan verilmektedir. Ayrıca çizilen parçanın baş ve son noktalarının bilinmesi parçaları birbirine eklemeye önce gerekmektedir. CAD programlarında her zaman çizim yönü saat yönünün tersinde belirlenmiştir. Yani çizim ekranını yavaşlatarak bir çizim yapacak olursak çizim soldan başlayarak sağ tarafa doğru ekranda belirmeye başlar. Bu sebeple baş ve son noktalar belirlenmesi DXF çizim yönüne göre yapılmaktadır.



Şekil 3.9. DXF çizme yönüne göre çizgi veya yay parçalarına baş son nokta ataması

Şekil 3.9' da görüldüğü gibi DXF dosyasında baş ve son noktalar soldan sağa doğru atanmaktadır. Oysa ki parçalar birbirine eklenirken baş ve son noktaları bu şekilde tayin edilmemesi yazılım çalışmalarında problem oluşturmaktadır. Bu yüzden geliştirilen zincir algoritması ile hem parçaların baş ve son noktaları doğru tayin edilmiş hem de parçalar sıralanarak indisler atanmıştır. Parçaların birisinin son noktası bir diğer parçanın baş noktası olacağından aralarında çok küçük bir tolerans verilerek parçalar sıralanmıştır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi zincir akış diyagramı oluşturulmuştur.

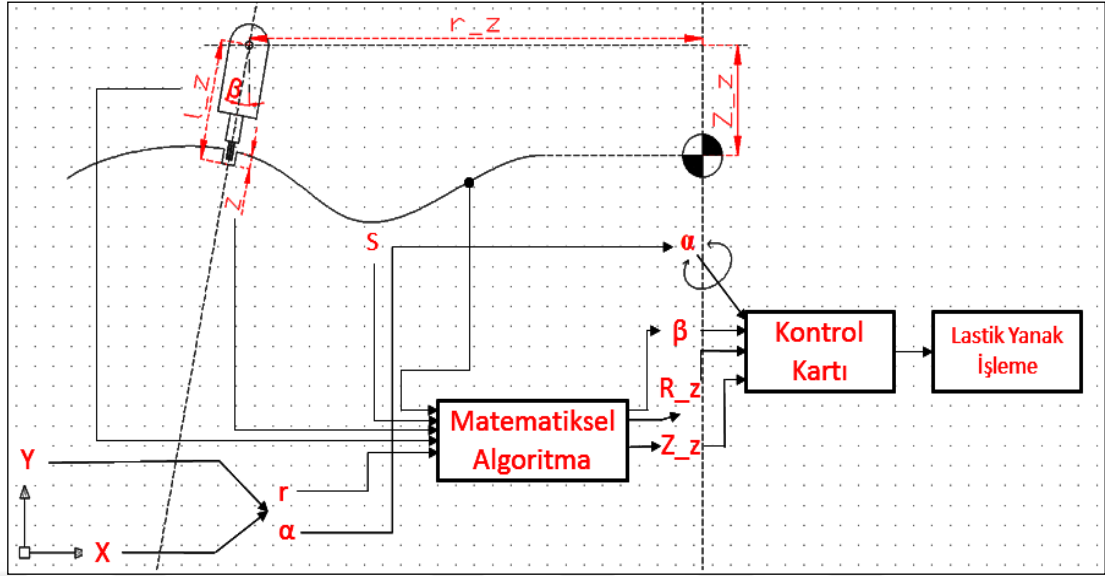




Şekil 3.10. Zincir akış diyagramı

Parçalar zincir algoritması ile sıralandıktan sonra CNC makinesinin aynı zamanda ters kinematikliğini belirleyen matematiksel dönüşüm algoritması oluşturulmuştur. Matematiksel dönüşüm algoritmasındaki amaç, CAD/CAM programları ile çizilen harf, desen vb. karakterlerin koordinatlarını alarak, bu karakterlerin dönüştürülmüş NC programı ile çizilmiş lastik yanak yüzeyine en hassas biçimde işlenmesidir.

Şekil 3.11’de sistem için geliştirilen algoritmanın görsel çizimi verilmiştir ve geliştirilen prototip makinede karakterlerin işleneceği yüzey ve CNC takım ucunun izlemesi istenen yörünge gösterilmiştir.



Şekil 3.11. CNC makinesi genel akış diyagram gösterimi

Matematikselsel problemin tanımına başlamadan önce birkaç matematikselsel basit eşitliklerin ve parametrelerin açıklımlarının bilinmesi; ayrıca, DXF, NC uzantılı dosyalardan koordinatların doğru olarak elde edilmesi gerekmektedir. DXF uzantılı dosyadan okunan koordinatlar, aşağıda tanımlanan parametrelere atanmıştır:

$L_i$  =  $i$ 'nci noktadaki çizgisel uzunluk

$C_i$  =  $i$ 'nci noktadaki yay uzunluğu

$L_t$  = CNC makinesinde kullanılan uç işlevci takım boyu

$n$  = parça sayısı

$X_{ib}$  = X ekseninde  $i$ 'nci çizgi veya yay uzunluğun başlangıç noktası koordinatı

$Y_{ib}$  = Y ekseninde  $i$ 'nci çizgi veya yay uzunluğun başlangıç noktası koordinatı

$X_{is}$  = X ekseninde  $i$ 'nci çizgi veya yay uzunluğun bitiş noktası koordinatı

$Y_{is}$  = Y ekseninde  $i$ 'nci çizgi veya yay uzunluğun bitiş noktası koordinatı

$A_{ib}$  =  $i$ 'nci yay başlangıç açısı

$A_{is}$  =  $i$ 'nci yay bitiş açısı

$R_{im}$  = i'inci yay yarıçap uzunluğu

$X_{im}$  = i'inci yay merkezi X noktası koordinatı

$Y_{im}$  = i'inci yay merkezi Y noktası koordinatı

$Z_{im}$  = i'inci yay merkezi Z noktası koordinatı

$X_{nc}$  = Yüzey için NC dosyasından alınan X koordinatı

$Y_{nc}$  = Yüzey için NC dosyasından alınan Y koordinatı

$Z_{nc}$  = Yüzey için NC dosyasından alınan Z koordinatı

Makine için gerekli parçalar çizgi ve yay olmak üzere iki farklı şekilde okunmaktadır. Eğer DXF dosyasından okunan bir çizgi ise,  $X_{ib}$ ,  $X_{is}$ ,  $Y_{ib}$ ,  $Y_{is}$ ,  $Z_{ib}$ ,  $Z_{is}$  koordinatları okunmakta ve  $L_i$  uzunluğu Denklem (3.7)'deki Öklid uzaklık metodundan elde edilmektedir. Yapılan çalışmada, parça boyutlarının uzunlukları Öklid uzaklık mesafesi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$L_i = \sqrt{(X_{is} - X_{ib})^2 + (Z_{is} - Z_{ib})^2} \quad (3.7)$$

Eğer DXF dosyasından okunan bir yay ise,  $A_{ib}$ ,  $A_{is}$ ,  $X_{im}$ ,  $Y_{im}$ ,  $Z_{im}$ ,  $R_{im}$  parametreleri dosyadan elde edilir ve yay için gerekli olan  $X_{ib}$ ,  $Z_{ib}$ ,  $X_{is}$ ,  $Z_{is}$  ve  $C_i$  parametreleri Denklem (3.8)–Denklem (3.12)'de gösterildiği gibi elde edilir.

$$X_{ib} = X_{im} + R_{im} \times \left( \cos(A_{ib}) \times \frac{\pi}{180} \right) \quad (3.8)$$

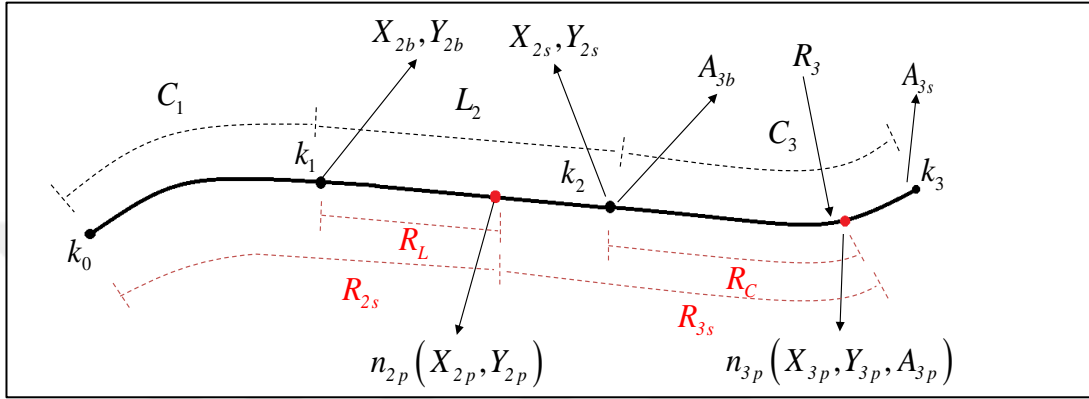
$$Z_{ib} = Z_{im} + R_{im} \times \left( \sin(A_{ib}) \times \frac{\pi}{180} \right) \quad (3.9)$$

$$X_{is} = X_{im} + R_{im} \times \left( \cos(A_{is}) \times \frac{\pi}{180} \right) \quad (3.10)$$

$$Z_{is} = Z_{im} + R_{im} \times \left( \sin(A_{is}) \times \frac{\pi}{180} \right) \quad (3.11)$$

$$|C_i| = \frac{2\pi R_{im}}{360} \times (A_{is} - A_{ib}) \quad (3.12)$$

Problemin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.12'deki gibi bir yüzey yörüngesi oluşturulmuş ve matematiksel dönüşüm algoritması sonucunda koordinatlar elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Örnek bir DXF yanak profili görüntüsü

$n = 3$  parçalı bir yörünge için matematiksel dönüşüm hesaplamaları aşağıda verilen denklemler kullanılarak yapılabilir.  $R_L$  ve  $R_C$  parçalar üzerindeki noktaların uzunluğunu göstermektedir.  $R_L$  çizgi üzerindeki,  $R_C$  ise yay üzerindeki uzunluğu temsil etmektedir.  $R_{2s}$  ve  $R_{3s}$  ise,  $k_0$  noktasının sırasıyla  $n_{2p}$  ve  $n_{3p}$  noktalarına olan uzaklığını göstermektedir.

$L_2$  doğrusal çizgi uzunluğu, Denklem (3.13) Öklid uzaklık metodu kullanılarak bulunmuştur.

CNC ucu bir çizgi üzerinde işlem yapacak ise,  $R_L$  uzunluğu Denklem (3.14)-Denklem (3.15) kullanılarak bulunmuştur.

$$L_2 = \sqrt{(X_{2s} - X_{2b})^2 + (Z_{2s} - Z_{2b})^2} \quad (3.13)$$

$$R_{2s} = \sqrt{(X_{nc})^2 + (Y_{nc})^2} \quad (3.14)$$

$$R_L = R_{2s} - k_1 \quad (3.15)$$

$$X_{2u} = \frac{X_{2s} - X_{2b}}{|L_2|} \quad (3.16)$$

$$Z_{2u} = \frac{Z_{2s} - Z_{2b}}{|L_2|} \quad (3.17)$$

$$X_p = X_{2b} \mp X_{2u} \times R_L \quad (3.18)$$

$$Z_p = Z_{2b} \mp Z_{2u} \times R_L \quad (3.19)$$

$$X_{nu} = Z_{2u} \quad (3.20)$$

$$Z_{nu} = -X_{2u} \quad (3.21)$$

$$R_z = X_p + (L_t + Z_{nc}) \times X_{nu} \quad (3.22)$$

$$Z_z = Z_p + (L_t + Z_{nc}) \times Z_{nu} \quad (3.23)$$

Eksenler için gerekli  $R_z$  ve  $Z_z$  uzunlukları Denklem (3.16)-Denklem (3.23) ile bulunmuştur. Eğer CNC ucu bir yay üzerinde işlem yapacak ise,  $R_c$  uzunluğu Denklem (3.24)-Denklem (3.26) ile bulunabilir.

$$R_c = |R_{3s} - k_2| \quad (3.24)$$

$$|C_3| = \frac{2\pi R_3}{360} \times (A_{3s} - A_{3b}) \quad (3.25)$$

$$R_c = \frac{2\pi R_3}{360} \times (A_{3p} - A_{3b}) \quad (3.26)$$

$$A_{3p} = \frac{360 \times R_C + 2\pi R_3 \times A_{3b}}{2\pi R_3}$$

$$X_{3p} = X_{3m} + R_3 \times \cos(A_{3p}) \quad (3.27)$$

$$Z_{3p} = Z_{3m} + R_3 \times \sin(A_{3p})$$

$$X_{nu} = \frac{(X_p - X_{3m})}{R_{3m}} \quad (3.28)$$

$$Z_{nu} = \frac{(Z_p - Z_{3m})}{R_{3m}} \quad (3.29)$$

$$R_z = X_p + (L_t + Z_{nc}) \times X_{nu} \quad (3.30)$$

$$Z_z = Z_p + (L_t + Z_{nc}) \times Z_{nu} \quad (3.31)$$

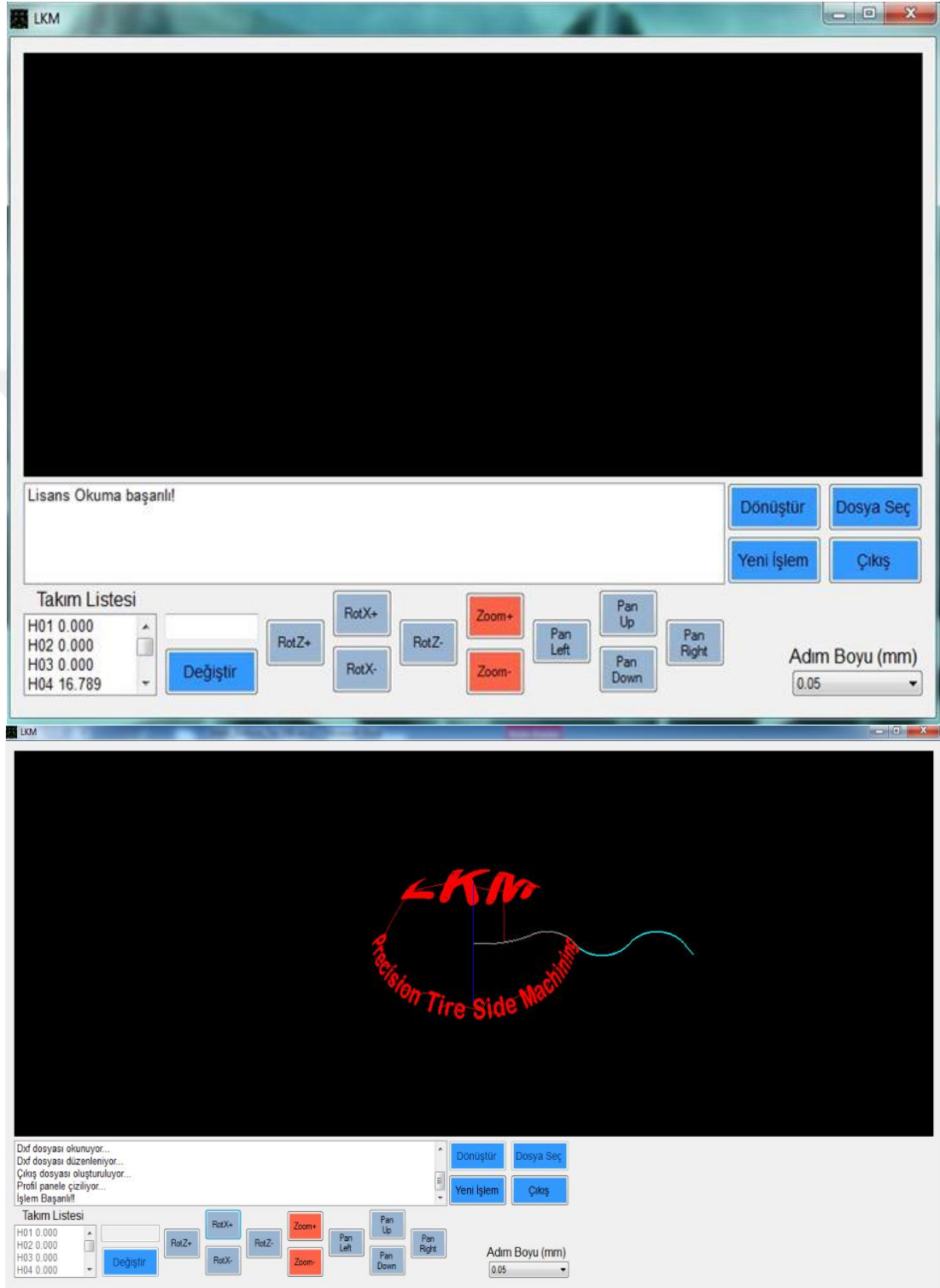
Eksenler için gerekli olan  $R_z$ ,  $Z_z$  Denklem (3.27)-Denklem (3.31) kullanılarak  $\alpha$  ve  $\beta$  açıları ise sırasıyla Denklem (3.32)-Denklem (3.33)'deki gibi elde edilir.

$$\beta = \begin{cases} -90, & \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) = 0 \text{ ise} \\ \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) - 90, & \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) > 0 \ \& \ \& \ \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) < 270 \text{ ise} \\ 0, & \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) = 270 \text{ ise} \\ \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) - 450, & \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) > 270 \ \& \ \& \ \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) < 360 \text{ ise} \\ 90, & \arctan 2(Z_{nu}, X_{nu}) = 360 \text{ ise} \end{cases} \quad (3.32)$$

$$\alpha = \arctan 2\sqrt{(X_{nc})^2 + (Y_{nc})^2} \quad (3.33)$$

Çıktı olarak CNC tezgâhında  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  koordinatları yerine,  $R_z$ ,  $Z_z$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  parametreleri kullanılmıştır. Denklemlerdeki işlemlerin yazılıma entegre edilmesiyle 3 boyutlu yazı ve desenlerin eğrisel lastik yanak yüzeyine işlenmesi gerçekleştirilmiştir. Yazılım algoritmasında elde edilen çıktılar, C# programlayıcı kullanarak elde edilmiştir. C# programlayıcı ile Şekil 3.13'deki gibi bir arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen bu arayüzde operatör tarafından CNC makinesinin kontrolünün kolay ve farklı yüzeyler için uygulanabilir olması sağlanmıştır. Geliştirilen arayüz ile sistemin gerçek zamanlı çalışması başarıyla test edilmiştir. Şekil 3.14'te kullanılan örnek bir yanak profilinin

DXF dosyası, NC dosyası ve yazılım ile elde edilen dönüştürülmüş NC uzantılı dosya (NC takım yolu) örnek bir lastik kalıbı tasarımı için görülmektedir.



Şekil 3.13. Matematiksel dönüşüm algoritması arayüz gösterimleri

0	%	%
SECTION	00001 ( )	00001 ( )
2	G17 G80 G49 G021 G40	G17 G80 G49 G021 G40
HEADER	G251	G251
9	G08 P1	G08 P1
\$ACADVER	G05 P10000 Q3	G05 P10000 Q3
1	T00 M6	T00 M6
AC1015	T00	T00
9	G00 G90 X123.943 Y205.904 S20000 M03	R10.000 Z150.583 A0.000 C58.957
\$ACADMAINTVER	G43 Z20. H00	R20.000 Z150.583 A0.000 C58.955
70	Z10.4	R30.000 Z150.583 A0.000 C58.954
6	G01 Z-.2 F1000.	R40.000 Z150.583 A0.000 C58.954
9	X120.404 Y207.998	R50.000 Z150.583 A0.000 C58.954
\$DWGCODEPAGE	X117.425 Y209.693	R60.000 Z150.583 A0.000 C58.954
3	X115.905 Y210.54	R70.000 Z150.583 A0.000 C58.955
ANSI_1252	X113.296 Y211.954	R80.001 Z150.583 A0.000 C58.954
9	X123.678 Y231.409	R90.000 Z150.583 A0.000 C58.954
\$INSBASE	X124.836 Y230.788	R100.000 Z150.583 A0.000 C58.954
10	X128.536 Y228.749	R110.000 Z150.583 A0.000 C58.954
0.0	X132.635 Y226.395	R120.000 Z150.583 A0.000 C58.954
20	X124.15 Y211.898	R130.000 Z150.583 A0.000 C58.954
0.0	X124.162 Y211.842	R140.000 Z150.583 A0.000 C58.954
30	X124.189 Y211.821	R150.000 Z150.583 A0.000 C58.954
0.0	X124.205 Y211.8	R160.000 Z150.583 A0.000 C58.954
9	X124.218 Y211.789	R170.001 Z150.583 A0.000 C58.954
\$EXTMIN	X124.546 Y211.591	R180.000 Z150.583 A0.000 C58.954
10	X126.151 Y210.638	R190.000 Z150.583 A0.000 C58.954
-0.939693	X127.749 Y209.672	R293.359 Z115.922 A-38.620 C58.954
20	X129.339 Y208.695	R282.446 Z123.339 A-29.789 C58.954
-0.984808	X130.921 Y207.706	R270.524 Z128.993 A-20.959 C58.954
30	X132.497 Y206.704	R257.875 Z132.751 A-12.128 C58.954
0.0	X134.064 Y205.691	G00 G90 R244.365 Z134.545 A-3.006 C58.954 S20000 M03
9	X135.624 Y204.666	G43 R245.414 Z154.518 A-3.006 C58.954 H00
\$EXTMAX	X137.176 Y203.629	R244.910 Z144.931 A-3.006 C58.954
10	X134.273 Y199.327	G01 R244.354 Z134.346 A-3.006 C58.954 F1000.
13.0	X130.097 Y202.068	R244.349 Z134.346 A-3.003 C59.935
20	X124.691 Y205.457	R244.350 Z134.346 A-3.004 C60.752
12.984808	X123.943 Y205.904	R244.347 Z134.346 A-3.001 C61.167
30	X123.995 Y205.99	R244.349 Z134.346 A-3.002 C61.874
0.0	X120.454 Y208.085	R231.189 Z134.021 A5.828 C61.876
9	X117.474 Y209.78	R215.630 Z130.955 A16.470 C61.877
\$LIMMIN	X115.953 Y210.628	R215.628 Z130.954 A16.472 C61.591
10	X113.431 Y211.995	R215.627 Z130.954 A16.472 C60.668
0.0	X123.719 Y231.273	R215.629 Z130.955 A16.471 C59.636
20	X124.788 Y230.7	R237.426 Z134.428 A1.638 C59.634
0.0	X128.486 Y228.662	R237.482 Z134.430 A1.601 C59.625
9	X132.498 Y226.359	R237.488 Z134.430 A1.597 C59.617
\$LIMMAX	X124.061 Y211.945	R237.501 Z134.430 A1.588 C59.612
10	X124.05 Y211.836	R237.505 Z134.431 A1.585 C59.608
0.0	X124.118 Y211.75	R237.511 Z134.431 A1.581 C59.518
20	X124.166 Y211.703	R237.511 Z134.431 A1.581 C59.083
0.0	X124.495 Y211.505	R237.512 Z134.431 A1.581 C58.647
9	X126.089 Y210.558	R237.512 Z134.431 A1.581 C58.211
\$ORTHOMODE	X127.675 Y209.6	R237.512 Z134.431 A1.581 C57.776
70	X129.254 Y208.63	R237.512 Z134.431 A1.580 C57.340

(a)

(b)

(c)

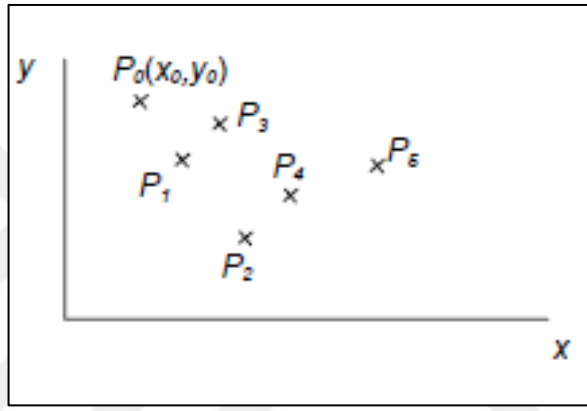
Şekil 3.14. (a). DXF uzantılı dosya (b). NC uzantılı dosya (c). dönüştürülmüş NC uzantılı dosya gösterimleri

Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) uygulamalarında birçok eğri yüzey yöntemleri kullanılmaktadır. Bezier eğrileri ve B-spline eğrileri de bilgisayar grafiklerinde ve CAD uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bézier eğrisi, yaygın olarak bilgisayar grafikleri ve benzer alanlarda çoğu zaman kullanılan parametrik eğri biçimidir. Eğri, belirlenen kontrol noktaları esas alınarak oluşturulmaktadır. Başlangıç ve bitiş noktalar eğri ile kesişirken, seçilen diğer noktalar çoğu zaman eğrinin üzerinde yer almamaktadır. Bu düşüncenin temelleri, ilk olarak, 1959 yılında, Paul de Faget de Casteljaou adında, Citroen firmasında çalışan bir Fransız otomotiv mühendisi



tarafından ortaya atılmıştır. Bu yıllarda, Renault firmasında silindir parçalarının keşişimi üzerine incelemeler gerçekleştiren başka bir Fransız otomotiv mühendisi Pierre Bézier de benzer bir yaklaşımla araştırmalarını gerçekleştirmiştir. İki çalışan da birbirlerinden bağımsız olarak aynı sonuçları elde etmesine rağmen, bu konuyla alakalı yayımlanan ilk makale Bézier tarafından yazıldığından, günümüzde bu eğri, Bézier eğrisi olarak bilinmektedir.

Bir seri kontrol noktasının (Bezier noktaları)  $P_i(x_i, y_i), i = 0, 1, 2, \dots, n$  olduğunu varsayalım. Şekil 3.15'te rastgele dağıtılmış noktaların gösterimi gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Bezier noktaları gösterimi [62]

Bu noktalar bilgisayar ekranına imleç yardımıyla konulabilir ve çekilerek konumları değiştirilebilir. Noktaların soldan sağa sıralanma zorunluluğu bulunmamaktadır. Her

bir noktanın koordinatını  $P_i = \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix}$  şeklinde iki elemanlı bir vektör ile gösterildiğini

varsayalım. Bu koordinatlar parametrik biçimde de  $P(u) = \begin{Bmatrix} x(u) \\ y(u) \end{Bmatrix}, 0 \leq u \leq 1$  şeklinde ifade edilebilir.

N'inci dereceden bir Bezier polinomu N+1 nokta ile belirlenir ve

$$P(u) = \sum_{i=0}^N \binom{n}{i} (1-u)^{n-i} u^i P_i \text{ şeklinde verilir. Burada } \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \text{ şeklindedir.}$$

$P(u)$  gerçekte bir Bernstein polinomudur. Bernstein 1912'de bu polinomların ağırlıklı bir toplamının  $N \rightarrow \infty$  için  $[0,1]$  değerleri aralısında üniform olarak bir sürekli fonksiyona yakınsayacağını belirtmiştir.

N=2 için  $P_0, P_1, P_2$  noktalarıyla tanımlanan  $P(u)$  kuadratik Denklem (3.34)'teki gibi bir ifadedir.

$$P(u) = (1-u)^2 \times P_0 + 2(1-u)u \times P_1 + (1)u^2 \times P_2 \quad (3.34)$$

NOT: N=2 için  $i=0, 1, 2$  ve  $\binom{2}{0} = 1, \binom{2}{1} = 2, \binom{2}{2} = 1$  dir.

Bu durumda Bezier eğrisinin parametrik denklemleri

$$x(u) = (1-u)^2 x_0 + 2(1-u)u x_1 + u^2 x_2 \quad (3.35)$$

$$y(u) = (1-u)^2 y_0 + 2(1-u)u y_1 + u^2 y_2 \quad (3.36)$$

Denklem (3.35) ve Denklem (3.36)'daki gibidir. Bu bağıntılardan;

$$u=0 \text{ için } x(0) = x_0, y(0) = y_0 \quad (3.37)$$

$$u=1 \text{ için } x(1) = x_2, y(1) = y_2 \quad (3.38)$$

Denklem (3.37) ve Denklem (3.38)'deki gibi olmaktadır. Buna göre  $u$  parametresi 0 ile 1 arasında değişirken başlangıç noktası ( $P_0$ ) ile üçüncü nokta ( $P_2$ ) arasında bir eğri çizilmektedir. Üç noktanın bir doğru üzerinde olması hali hariç ikinci nokta (aradaki  $P_1$  noktası) bu eğrinin üzerinde yer almayacaktır.

Aslında ikinci dereceden bir Bezier eğrisinin üzerindeki noktaların koordinatları, bu eğriyi ifade etmek için kullanılan üç noktanın koordinatlarının ağırlıklı ortalaması olmaktadır. Bir başka deyişle Bezier denklemlerini, değişkeni  $u$  olan üç polinomun ağırlıklı toplamı olarak ifade etmek mümkün olmaktadır. Buradaki ağırlık faktörlerini üç noktanın koordinatları belirleyebilmektedir.

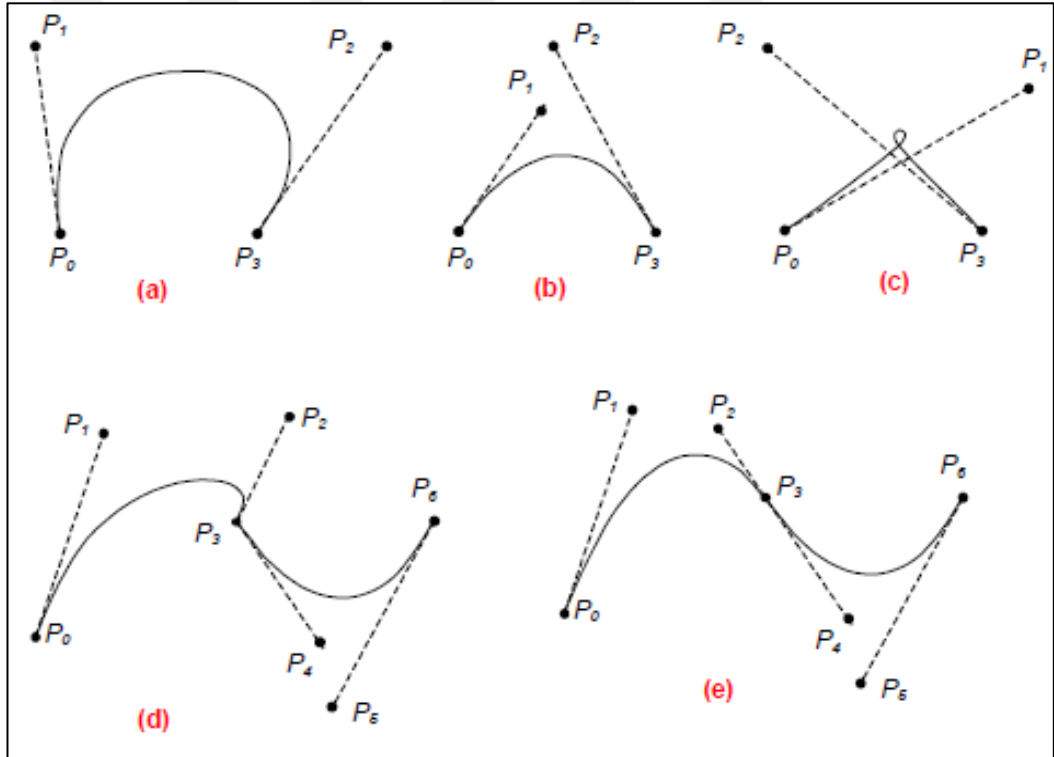
N=3 için kübik Bezier polinomları;

$$x(u) = (1-u)^3 x_0 + 3(1-u)^2 u x_1 + 3(1-u)u^2 x_2 + u^3 x_3 \quad (3.39)$$

$$y(u) = (1-u)^3 y_0 + 3(1-u)^2 u y_1 + 3(1-u)u^2 y_2 + u^3 y_3 \quad (3.40)$$

Denklem (3.39) ve Denklem (3.40)'daki gibi gösterilmektedir. Tekrar  $x(0)=y(0)=P_0$  ve  $x(1)=y(1)=P_1$  olduğu gözükmektedir ve  $(P_1, P_2)$  ara noktaları eğri üzerinde yer almayacağı görülmektedir. Şekil 3.16'daki örnek eğrilerde gösterildiği gibi ara noktaların konumlarını değiştirilmek eğriyi değiştirdiği görülmektedir. Bu şekildeki ilk üç eğri (a-c) dört nokta kullanılarak elde edilmektedir.

Şekil 3.16'daki d ve e'de kübik Bezier eğrilerinin nasıl dört noktadan ileriye devam ettirilebileceği gösterilmektedir. Bu işlem için yedi kontrol noktası alınarak, ilk dört nokta ile bir eğri oluşturulurken dördüncü nokta ortak olmak üzere son dört nokta ile ikinci bir eğri elde edilmektedir. Şekil 3.16'daki d eğrilerinde  $P_3$  noktasında bir süreksizlik mevcuttur. Şekil 3.16'da e'de ise bu süreksizlik ortadan kaldırılmıştır. Bunun için  $P_2, P_3$  ve  $P_4$  noktalarının aynı doğru üzerinde yer alması yeterlidir [62].



Şekil 3.16. Dört ve yedi nokta ile tanımlanmış Bezier eğrilerinin gösterimleri [62]

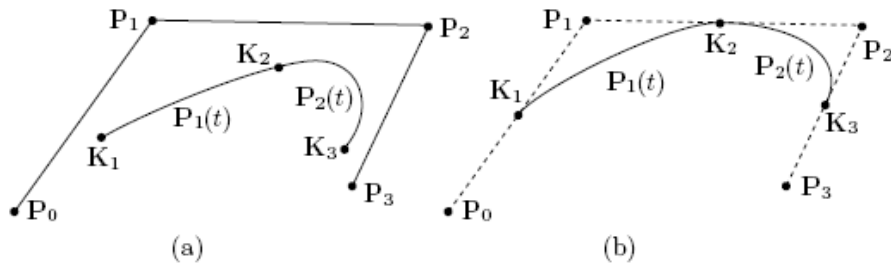
Eğriler ve yüzeyler için B-spline teknikleri 1940'ların başında önerilmiş ve 1970'lerde Rich Riesenfeld tarafından geliştirilmiştir. B-spline yapısı, Pierre Bezier tarafından geliştirilmiş olan Bezier eğrilerinin genelleştirilmiş bir halidir. "B" harfi "basis" kelimesini ifade etmektedir. B-spline eğrileri, Bezier eğrilerinde bulunan şu dezavantajları gidermek amacıyla geliştirilmiştir:

- Bezier eğrisinin derecesi, kontrol noktalarının sayısına bağlıdır.
- Bezier eğrileri sadece global kontrol sağlar, lokal kontrol sağlamaz.
- Bezier eğri parçalarının  $C^1$  sürekliliğini sağlamak kolay iken,  $C^2$  sürekliliğini sağlama konusunda yetersizdir.

B-spline eğrileri yerel kontrol sağlamaktadır. Şöyle ki, yerleri değiştirilen kontrol noktaları eğrinin sadece kontrol noktasından etkilenen komşuluklarını değiştirmektedir. Ayrıca B-spline eğriler ile, eğri parçalarının istenen derecede süreklilikleri sağlanabilmektedir [63, 64]. Örneğin iki eğri parçası  $C^2$  süreklilik ile birleştirildiğinde, eğrilerin birleştirme noktasındaki birinci ve ikinci türevlerinin eşit olması istenmektedir.

İki eğrinin birleşme noktasında  $C^n$  süreklilik istenmesi durumunda, her iki eğrinin de  $n$  dereceden polinomlar olması gerekmektedir.

B-spline eğrileri, kontrol noktaları ile tanımlanır ve hedeflenen bir nokta kümesine veya yüzeye yaklaşım yapmak için kullanılır. Ayrıca noktaların bulunduğu uzaydan bağımsız olarak tanımlanan düğüm vektörü olarak ifade edilen bir parametre uzayına ihtiyaç bulunur. Düğüm vektörü düzgün dağılımlı – uniform olabileceği gibi, hedef noktaları daha iyi yaklaşım yapmak üzere çeşitli metotlarla düzgün olmayan bir dağılım – nonuniform şeklinde de tanımlanabilir. Nokta kümesi enterpolasyonu ve yaklaşımı amaçlı uygulamalarda, düğüm vektörü hesaplama metotları sonraki aşamalarda anlatılmaktadır. Şekil 3.17’de ikinci derece uniform b-spline oluşum yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.17. İkinci derece b-spline gösterimleri [63, 64]

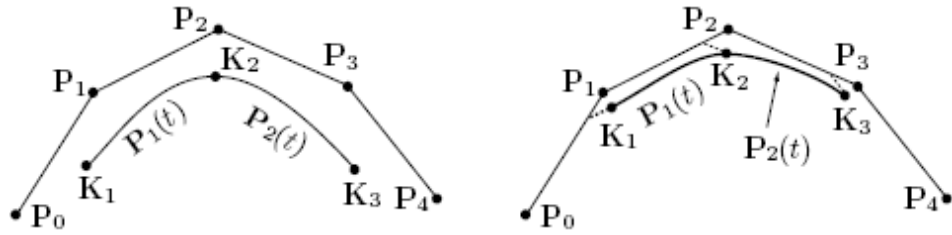
B-spline iki adet eğri parçasından oluşmaktadır.  $P_i(t)$  eğri parçası,  $P_{i-1}$ ,  $P_i$  ve  $P_{i+1}$  kontrol noktalarına göre oluşur. Denklem (3.41) ve Denklem (3.42)'de bu iki eğri parçasının ilk seviye denklemi gösteriliyor. Burada  $M$ ,  $3 \times 3$  boyutlarında baz matrisi ifade ediyor ve eğrilerin birleşim noktasındaki birinci derece türev sürekliliği gereksinimine göre hesaplanır. Baz matrisin, öz yinelemeli olarak, bilgisayarlaştırılmış hesaplama metodu sonraki aşamalarda anlatılmaktadır.

$$P_i(t) = (t^2, t, 1)M \begin{pmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2 \quad (3.41)$$

$$P_i(t) = \frac{1}{2}(t^2, t, 1) \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \end{pmatrix}, \quad (3.42)$$

$$= \frac{1}{2}(t^2 - 2t + 1)P_{i-1} + \frac{1}{2}(-2t^2 + 2t + 1)P_i + \frac{t^2}{2}P_{i+1}, \quad i = 1, 2$$

Üçüncü dereceden uniform B-spline yapılanması ise Şekil 3.18'de gösterilmektedir. Denklem (3.43)'te kübik uniform b-spline yapısı için ilk denklem gösterilmektedir. Bu denklemde  $M$ ,  $4 \times 4$  boyutlarında baz matrisi ifade etmektedir. Üçüncü derece spline segmentlerinin birleşme noktasında,  $C^2$  türev sürekliliği şartı sağlanmalıdır.



Şekil 3.18. Kübik uniform b-spline yapılanması gösterimleri [63, 64]

$$P_i(t) = (t^3, t^2, t, 1)M \begin{pmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

Bu şartları sağlayan, uniform düğüm vektörüne sahip b-spline yapısında,  $M$  matrisi aşağıdaki şekilde Denklem (3.44)-Denklem (3.46) ile hesaplanır: [63, 64]

$$\begin{aligned}
P_i(t) &= \frac{1}{6}(t^3, t^2, t, 1) \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{pmatrix}, \\
&= \frac{1}{6}(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1)P_{i-1} + \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4)P_i + \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)P_{i+1} + \frac{t^3}{6}P_{i+2}
\end{aligned} \tag{3.44}$$

Daha yüksek derecelerdeki uniform b-spline yapılandırmaları şu şekilde özetlenebilir [63, 64]:

$$P_i(t) = (t^3, t^2, t, 1)M \begin{pmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{i+n-1} \end{pmatrix} \tag{3.45}$$

M matrisini elemanları ise şu şekilde ifade edilir:

$$m_{ij} = \frac{1}{n!} \binom{n}{i} \sum_{k=j}^n (n-k)^i (-1)^{k-j} \binom{n+1}{k-j} \tag{3.46}$$

Denklem (3.47)'de uniform düğüm vektörüne sahip çeşitli derecelerdeki b-spline yapısı için geçerli baz matrisler gösteriliyor.

$$\begin{aligned}
M_1 &= \frac{1}{1!} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\
M_2 &= \frac{1}{2!} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\
M_3 &= \frac{1}{3!} \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\
M_4 &= \frac{1}{4!} \begin{pmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ -4 & 12 & -12 & 4 & 0 \\ 6 & -6 & -6 & 6 & 0 \\ -4 & -12 & 12 & 4 & 0 \\ 1 & 11 & 11 & 1 & 0 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{3.47}$$

B-spline eğrileri yalnızca belirli bir grup veri noktası için ifade edilen fonksiyonların sayısal türev ve integrasyonu için kullanılmaktadır. Bahsedilen iki tip eğri gerçek interpolasyon spline'ları olmamaktadır. Çünkü bu eğriler normal olarak veri noktalarının tamamından geçmemektedir. Bu anlamda bahsedilen bu eğriler en-küçük kareler eğrileri ile benzerlik göstermektedirler. Bunun yanı sıra Bezier eğrileri ve B-spline eğrileri veri noktalarının belirlediği poligon içerisinde kalma özelliğine sahip olmaktadır. Bununla birlikte bahsedilen spline eğrileri güzel bir geometrik özelliğe sahip olarak, noktalardan biri değiştirildiğinde eğrinin sadece bir kısmı değişerek yerel bir etki görülmektedir. Fakat kübik spline eğrilerinde veri setindeki noktalardan yalnız bir tanesi değiştiğinde başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar olan eğrilerin tümünün etkilendiği gözükmemektedir. Sonuç olarak, kübik spline eğrilerinde veri noktaları eğrilerin geçtiği noktalar olarak ifade edilirken, Bezier ve B-spline eğrilerinde ilgilenilen noktalar eğrinin şeklini belirlemek için kullanılan kontrol noktaları olarak ifade edilmektedir [65].

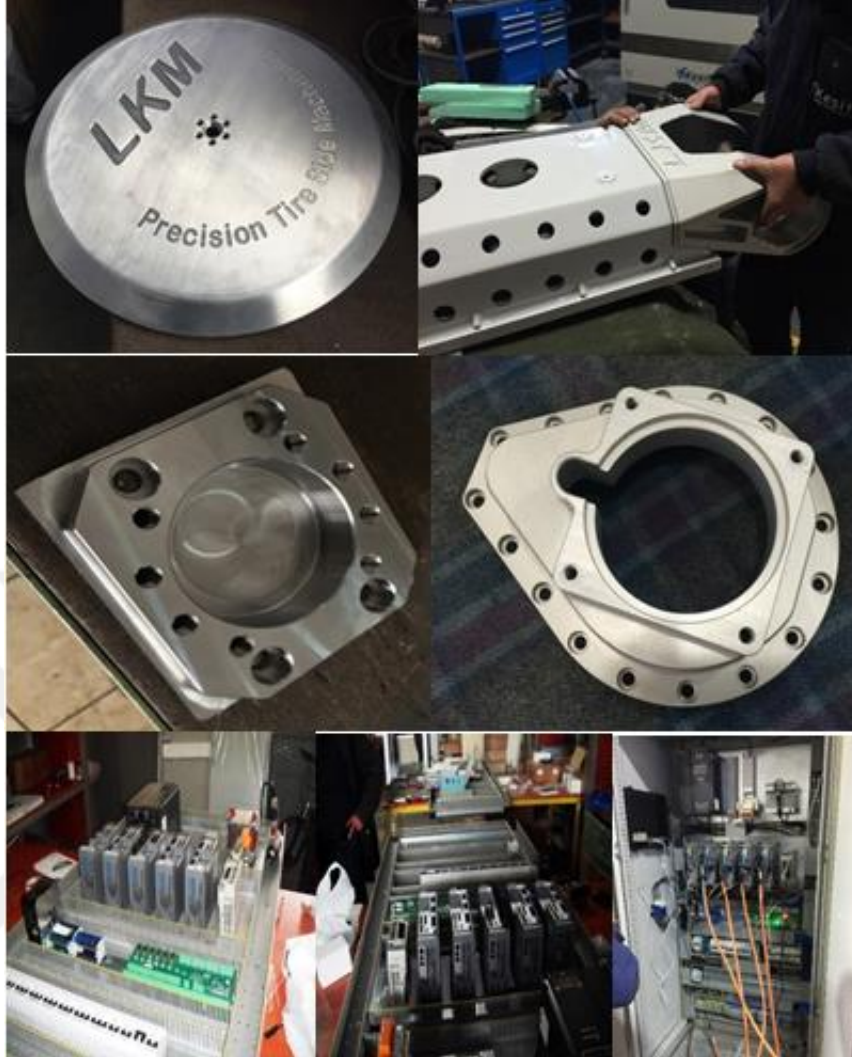
#### 4. DENEYSSEL UYGULAMALAR

Bu tez çalışması kapsamında prototip olarak imal edilen CNC makine, lastik sektörü başta olmak üzere birçok farklı sektörde kullanılabilir. Prototip imalat aşamalarından olan mekanik imalat çalışması Şekil 4.1’de ve parça imatları Şekil 4.2’de görülmektedir. Çalışma sonunda üretilen CNC makinesinin pano ve son prototip hali Şekil 4.3’te görülmektedir.



Şekil 4.1. Prototipi gerçekleştirilen CNC makinesinin prototip imalat aşama görüntüleri



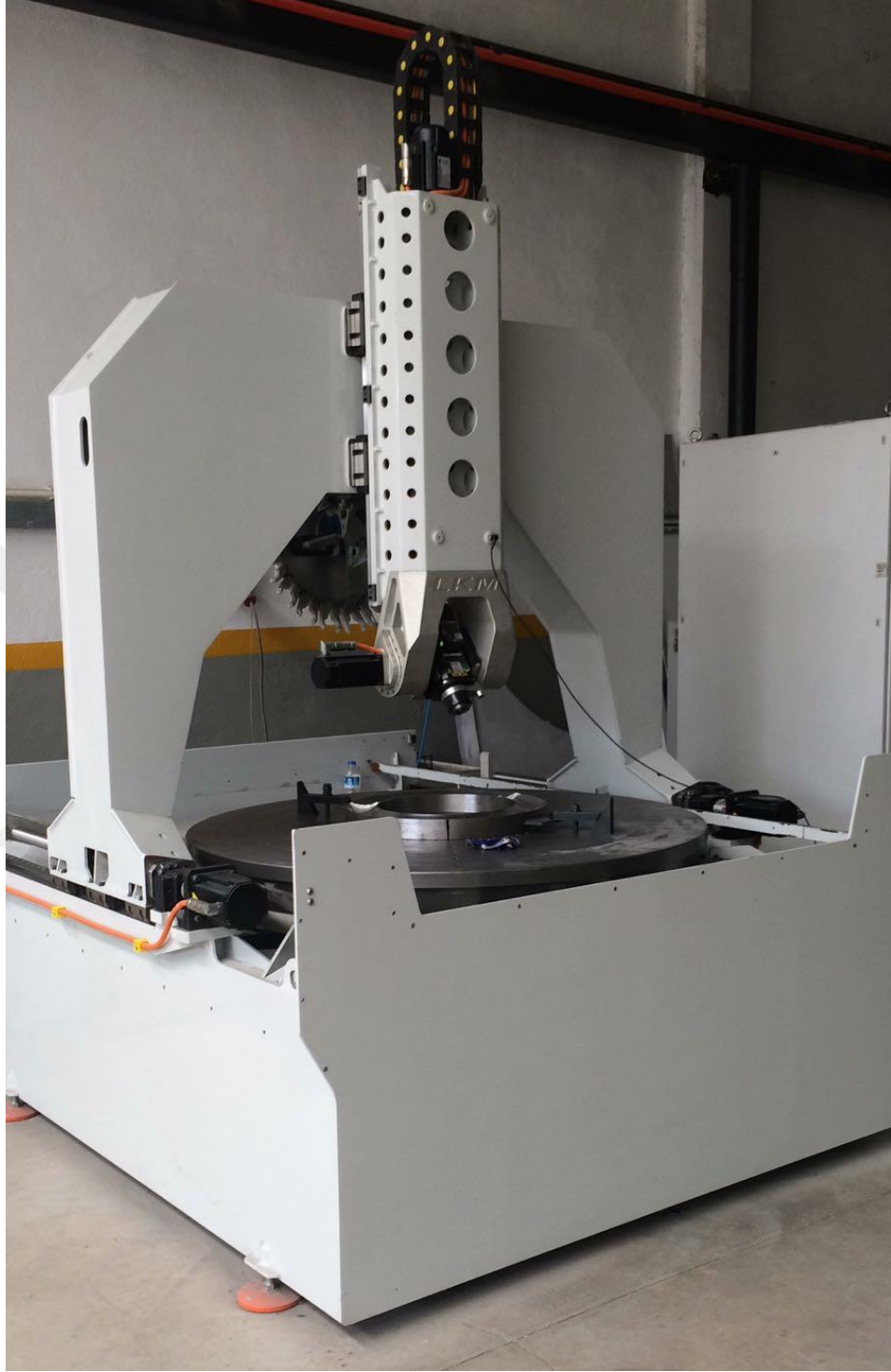


Şekil 4.2. Prototipi gerçekleştirilen CNC makinesinin prototip imalat aşamaları görüntüleri



(a)

Şekil 4.3. (a). CNC makinesinin prototip ön görünüşü (b). CNC makinesinin prototip nihai görüntüsü

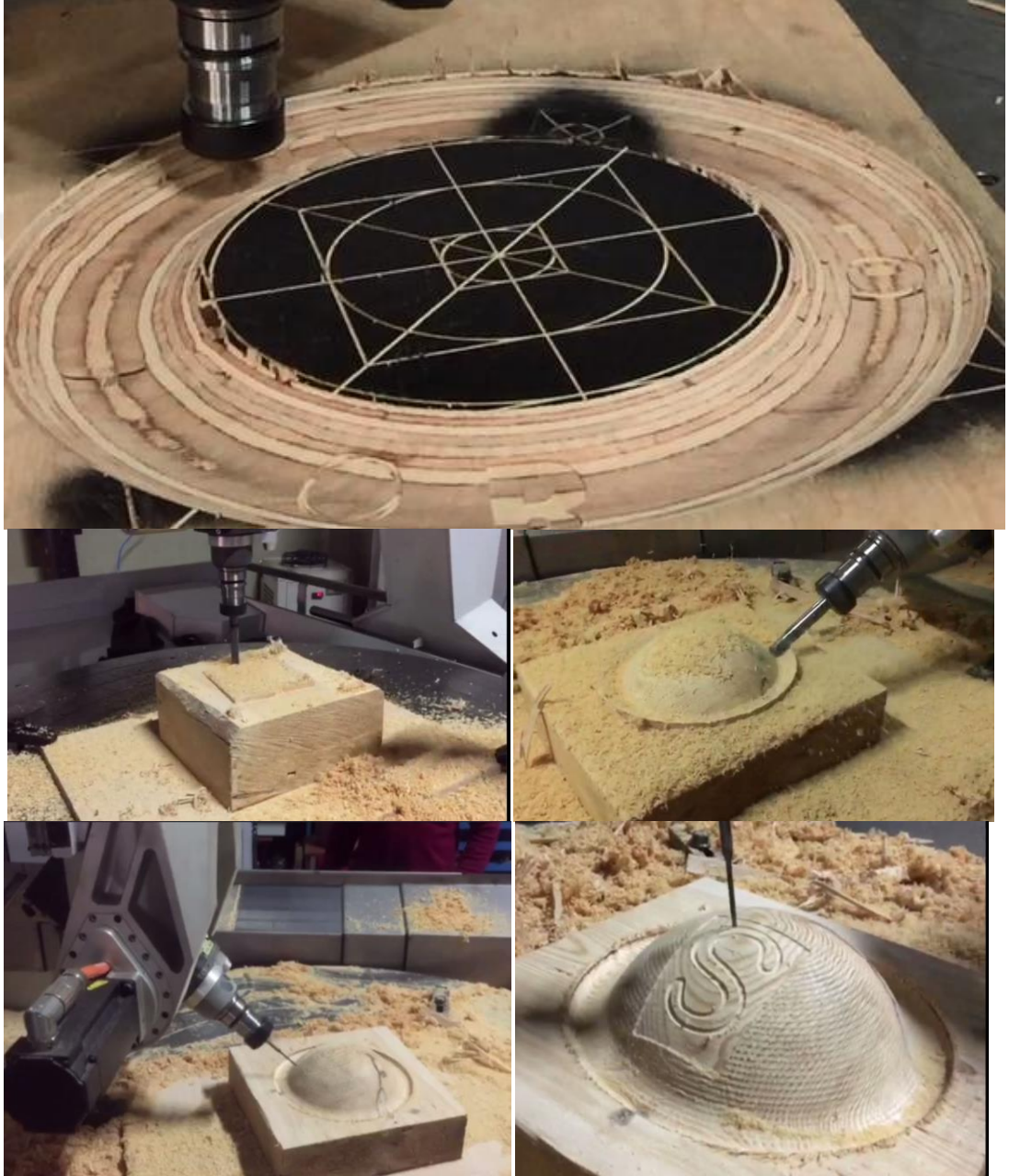


(b)

Şekil 4.3. (Devam) (a). CNC makinesinin prototip ön görünüşü (b). CNC makinesinin prototip nihai görüntüsü

#### 4.1. Prototipi Gerçekleştirilen CNC'de Yapılan Örnek Uygulamalar

Tez çalışması kapsamında mekanik olarak tasarlanan ve imal edilen sistem üzerinde, matematiksel algoritma geliştirilerek özgün NC takım yolu çalışması yapılmıştır. Prototip CNC tezgâh üzerinde farklı materyaller test edilmiş ve örnek sonuçları Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.8 ve Şekil 4.10'da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.4. Tahta yüzey üzerine işlenen örnek karakter görüntüleri

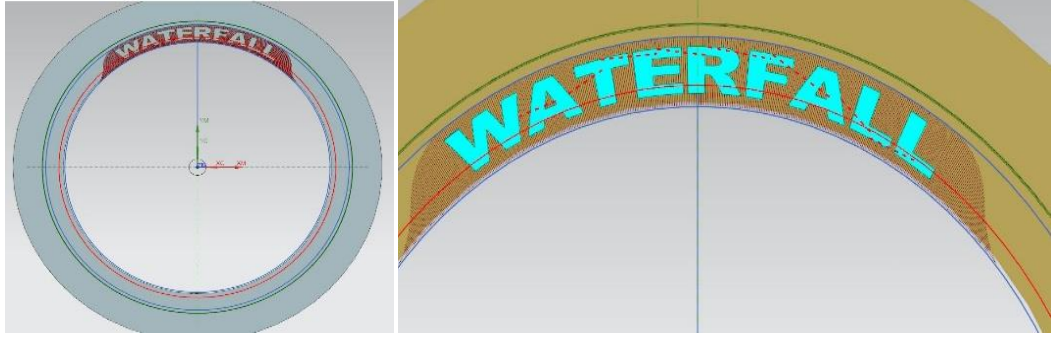
Prototip CNC makinede başlangıç uygulamaları olarak merkez koordinat noktalara doğru gidip gitmediği test edilmiştir. Merkez koordinat noktalarının doğrulukları test

edildikten sonra, tahta bir malzeme üzerinde ilk test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tahta blok parçanın işlenerek, küresel bir yüzey haline getirilmesi yapıldıktan sonra eğri yüzeye harf işlenmesi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel dönüşüm denklemlerinin yazılıma entegre edilmesiyle, eğri yüzey üzerine harf işleme işleminin başarıyla gerçekleştirildiği görülmüştür.

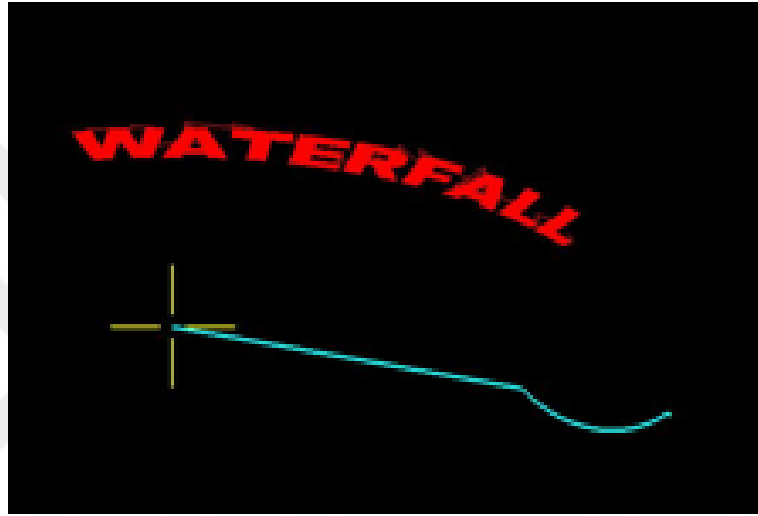


Şekil 4.5. Çelik yüzey üzerine işlenen örnek karakter görüntüleri

Tahta yüzey üzerinde işleme çalışmalarından sonra metal bir malzeme üzerinde harf işleme çalışması yapılmıştır. Prototip CNC tezgâhın çelik yüzeye işleme işleminin bittikten sonra, işlenen harfin ölçüm değerleri (kumpas ve komparatör ölçümleri) belirlenen ebatlarda olduğu gözlemlenmiştir. Karakter işleme işleminin doğrulu matematiksel dönüşüm denklemlerinin doğruluğunu kanıtlar nitelikte olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.6. Örnek CAD/CAM çizimi gösterimleri

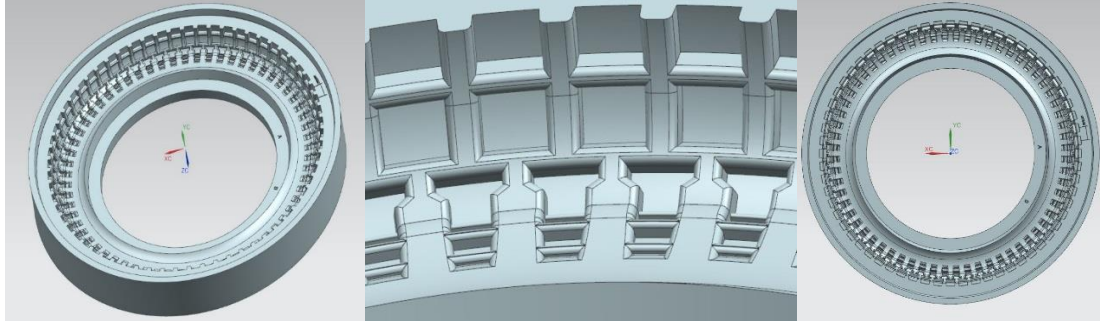


Şekil 4.7. Arayüz ile elde edilen çıktı görüntüsü



Şekil 4.8. CNC tezgâhı ile işlenen örnek karakter görüntüsü

Tahta yüzey üzerine işleme ve metal yüzeye karakter işleme çalışmalarından sonra metal bir kalıp üzerinde test işlemleri yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Gerçek bir lastik kalıbının yanak profili ve kalıba yazılmak istenen karakterin bilgisayar ortamındaki çizimi kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen yazılım çıktısının sonucunda prototip CNC tezgâhta lastik kalıbı üzerindeki test işleminin başarılı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.9. Örnek bir motosiklet lastik kalıp tasarımı için CAD/CAM çizim görüntüleri



Şekil 4.10. Prototip CNC makine ile örnek kalıp ve karakter işleme görüntüleri

Prototip CNC tezgâhta gerçek bir motosiklet lastiği kalıbı üzerine karakter işleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Motosiklet lastiğinin iki parçası ayrı ayrı işlendikten sonra bir araya getirilmiştir. Lastik sektöründe bazı lastiklerin kalıpları tek parça olarak imal edilerek üretilmektedir. Bazı lastiklerde ise lastik kalıpları çoklu parçalar olarak imal

edildikten sonra üretilmektedir. Traktör ve motosiklet lastikleri tek parça olarak (iki yüzey) üretilmektedir. Prototip CNC tezgâhta yazılım sayesinde işlenen motosiklet lastik kalıbı döküm olarak da üretilmiştir. Lastik kalıbındaki işlenen desenlerin gerçek bir lastikte üretilmesi de incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanıp imal edilen CNC lastik kalıbı desen makinasının, diğer CNC tezgâhlarından ayıran en önemli bir diğer özelliği ise, kesici motor (Spindle Motor) kafa devrinin çok yüksek olmasıdır. Normal bir CNC tezgâhın kafa devri 6000-8000 devir/dakika iken, kullanılan kesici motorun kafa devri yaklaşık olarak 40000 devir/dakika olarak çalışmaktadır. Yüksek devirli kesici motor kullanılmasının nedeni, kesici ucun kesme çapının 1mm'den bile küçük olmasıdır. Böylece karmaşık geometrilere sahip desen yapıları tezgâhta işlenirken, kalıba takımın çarpmadan işlemeye imkân vermesi ve kesici ucun küçük alanlarda çalışması mümkün olmaktadır. Aynı zamanda daha hassas işleme gerçekleştirmek için, prototip makinenin gövde yapısı çelik döküm konstrüksiyondan yapılmıştır. Tasarlanan rijit gövde yapısı ile kalıpların daha hassas işlenerek daha kaliteli ürünler ortaya çıkarıldığı görülmüştür. Şekil 4.4'te tahta yüzeye ve Şekil 4.5'te çelik yüzeye yapılan yazı karakterlerinin işlenmesi gösterilmiştir. Şekil 4.6'da örnek bir CAD/CAM çizimi gösterilirken, örnek CAD/CAM çiziminin yazılım arayüzü ile elde edilen çıktısı ise Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.8'de ise prototip CNC makinede lastik kalıp üzerine işlenen karakterlerin son hali görülmektedir. Şekil 4.9'da bir motosiklet lastiğinin CAD/CAM çizimi gösterilirken, Şekil 4.10'da ise prototip CNC makinede bir motosiklet lastik kalıp yüzeyinin işlenmiş son hali görülmektedir. Prototip makinede gerçekleştirilen deneyler 23000 d/d, 433 m/dk kesme hızı, 4 m/dk (0,17 mm/rev) kesme ilerleme hızı, 0,5 mm kesme derinliği ve 6 mm çaplı takımın konik ucu 0,2 mm çapında karbür takım kullanılarak kesme yağı ile gerçekleştirilmiştir. Prototip olarak üretilen CNC tezgâhta geliştirilen yazılım sayesinde lastik kalıbı üzerinde hem desen hem de karakter işlemleri yerine getirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, işlenen parçaların sanayi uygulamaları için (lastik kalıp sektörü) uygun parametrelerde olduğu gözlenmiştir.

## 4.2. Alınan Sonuçlardaki Başarı Oranları

Bu kısımda işlenen parçaların (tahta, çelik vb.) yüzey pürüzlülük değerleri ve CNC makinede işlenen karakter-desenlerin boyutsal ölçümleri hakkında bilgiler verilmiştir.

İşleme yöntemi, kesicinin çeşidi ve işlenen malzemeye göre, işleme esnasında fiziksel, kimyasal ve ısı faktörlerle, kesen ve kesilen arasındaki mekanik hareketlerin de etkisiyle işlenmiş yüzeylerde, genelde istenmediği halde tabii olarak bazı izler oluşmaktadır. Nominal yüzey çizgisinin altında ve üstünde düzensiz sapmalar meydana getiren bu duruma yüzey pürüzlülüğü denmektedir.

İşlenen yüzeylerin kalitesi, işleme performansı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Kaliteli işlenmiş bir yüzey, yorulma mukavemetini, korozyon direncini ve sürtünme ömrünü önemli derecede iyileştirmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ayrıca yüzey sürtünmesine neden olan temas, aşınma, ısı iletimi, yağ filminin tutulması ve dağıtılması kabiliyeti, kaplama veya direnç ömrü gibi parçaların çeşitli fonksiyonel özelliklerini de etkilemektedir. Bu nedenle istenilen yüzey tamlığı genel olarak belirlenmektedir ve ihtiyaç duyulan kaliteye ulaşmak için uygun işlemler seçilmektedir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen Prototip CNC makinede işlenen parçaların (yüzey pürüzlülüğü) Ra değeri 1,2 µm (mikrometre) civarında ve N7 kalitesinde yüzey elde edildiği belirlenmiş olup sanayi uygulamaları için uygun bir değer olduğu söylenebilir. Ayrıca prototip CNC makine üzerinde farklı malzeme çeşitleri için testler uygulanmıştır. Bu testler sonucunda işlenen parçaların doğrulukları kumpas ve komparatör yardımıyla ölçülerek hatasız bir şekilde işleme yaptığı belirlenmiştir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

CNC tezgâhlara olan ilgi, akademik ve endüstriyel alandaki gelişmelere bağlı olarak her geçen gün önemini daha da arttırmaktadır. Endüstriyel alandaki CNC makine ihtiyacını karşılamak ve yerli ürün üretimini artırmak için son yıllarda ülkemizde çok sayıda araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, lastik yüzeyine bazı desen ve karakterlerin işlenebilmesi için lastik kalıbı üzerine uygun bir şekilde işleme yapabilen bir CNC makinesinin tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın özgün yönlerinden birisi, lastik kalıp yüzeyinin eğimli olmasından dolayı işlenecek karakter ve desenlerin yüzeye hatasız olarak aktarabilen bir CNC makinesinin prototip imalatı gerçekleştirilmiştir.

Çalışma, mekanik tasarım ve yazılım olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Kapsamlı bir literatür taraması ile, benzer özelliklerde çalışan makinelerin kullanıldığı yazılımlar incelenmiş ve özgün bir matematiksel dönüşüm algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel dönüşüm algoritması kullanılarak eğrisel yüzeylere uygun NC takım yolu dosyası oluşturulmuştur. Daha sonra bu algoritma yazılımsal olarak C# programlayıcı diline çevrilerek optimize edilmiştir. DXF çizim dosyasından alınan karakter ve desen koordinatları ve NC yüzey koordinatları kullanılarak kalıp yüzeyindeki yörünge planına uygun olan yeni bir NC takım yolu dosyası oluşturulmuştur. Geliştirilen yazılım çalışmaları neticesinde makinede kullanılmak üzere C# programlayıcı ile yeni bir arayüz yazılım paketi geliştirilmiştir. Elde edilen bu arayüzün sade ve anlaşılır olması hem kullanıcının (operatörün) işini kolaylaştırmakta hem de ürünün ticarileşmesi açısından fayda sağlamaktadır. Prototipi gerçekleştirilen CNC makinede işlenmiş olan farklı malzeme örnekleri çeşitli testlere tabi tutularak gerekli optimizasyon işlemleri yapılmıştır. Daha sonra, geliştirilen matematiksel dönüşüm algoritması kullanılarak imal edilen prototip makinede örnek bir lastik kalıbı üzerinde nihai denemeler yapılmıştır. Yapılan deneme işlemlerinden sonra kumpas ve komparatör ölçüm aletleri kullanılarak, işlenen parçaların derinlik ve genişlik ölçümleri yapılmıştır. Kumpas ve komparatörde ölçülen değerlerin bilgisayar ortamında yapılan çizimlerle (çalışmada oluşturulan desen ve karakterlerin NC

dosyası) karşılaştırıldığında, makinenin işlemeyi neredeyse hatasız bir şekilde (sıfır hatayla) gerçekleştirdiği gözlenmiştir. Ayrıca, prototip makine üzerinde farklı malzeme çeşitlerinin işlenerek, iş parçaları üzerindeki yüzey kaliteleri de incelenmiştir. Prototip makinede işlenen örnek bir parçanın (yüzey pürüzlülüğü) Ra değerinin 1,2 µm (mikrometre) civarında olduğu ve yüzey kalitesinin ise N7 serisine karşılık geldiği sonucuna varılmıştır. Yapılan karşılaştırma ve değerlendirmeler neticesinde, işlenecek desen ve karakterlerin eğrisel yüzeylere aktarılması işleminde önemli oranda ve istenilen düzeyde bir başarı sağlanmıştır. Söz konusu CNC makinenin gelecekte başta lastik kalıbı olmak üzere endüstrinin çok çeşitli alanlarında da kullanılabileceği öngörülmektedir. Geniş bir literatür araştırması ve teorik çalışmaların sonucunda, ülkemizde benzeri olmayan ve yaklaşık değeri 2017 yılı itibari ile 1 Milyon TL olan kalıp işleme makinesinin özünü oluşturan yeni ve özgün bir yazılım çalışması yapılmıştır. Yerli katkı oranı yüksek olan bu yazılımın kullanılmasıyla, ülkemizin sanayi sektöründe kullanılabilecek prototip bir CNC tezgâh uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu CNC tezgâhın, ticari ürün haline gelmesi ve ithal ürüne göre daha uygun maliyette olması, yedek parça, bakım-onarım ile diğer öngörülmeyen maliyetlerin daha az olması gibi avantajların, gelecekte bu ürüne olan talebi önemli oranda arttıracakı düşünülmektedir. Sadece lastik kalıp sektörü baz alındığında, bu ürünün ithal muadilinin güncel değeri (2017 yılı itibari ile) ortalama 1,7 Milyon TL (yaklaşık 400000 Euro) civarındadır. Bu makinenin diğer bir üstünlüğü ise ithal muadiline göre daha uygun bir satış fiyatına sahip olmasının yanı sıra, hızlı servis ağı ve uygun yedek parça fiyatları ile ilerleyen zamanlarda ihracat açısından geniş bir potansiyele sahip olabilirdir. Tez konusu CNC tezgâhın ticari anlamda prototip üretimi sırasında köprü sisteminin ve diğer parçalarının döküm olarak üretilmesi sayesinde daha gürbüz bir sistem elde edilebilir. İleriki çalışmalarda, lastik kalıp makinesi üzerinde farklı koşullarda (devir, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, takım uçları vb.) yapılacak deneylerin yüzey pürüzlülüğü ve işleme hassasiyetine bağlı çeşitli parametreler uygulanarak daha da geliştirilebilir. Örneğin makineye X eksenini hareketi eklenerek lastik tabanına işlenmiş olan desenlerde çapak temizleme işlemi veya yüzey işleme fonksiyonu da kazandırılarak makinenin ticari değeri ve işlevselliği daha da artırılabilir. Ayrıca, 'Bezier eğrisi' ve 'B-Spline' matematiksel yöntemleri uygulanarak lastik kalıp makinesinin yüzey işleme kalitesinin daha da artırılması sağlanabilir. Sonuç olarak, ticari prototip CNC tezgâh

için Ball Bar testi yapılarak makinenin standartlaşması ve uluslar arası geçerliliği olan bir belgeye sahip olması sağlanabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Uyar E., Kavala D., 5 Eksen CNC İşleme Tezgahı Tasarımı ve PC Destekli Kontrolü – 1, *MakinaTek Dergisi*, 2010.
- [2] Kavala D., Beş eksenli CNC tezgah tasarımı ve kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2010, 283619.
- [3] Karabey Ö., Prototip 3 Eksenli CNC Freze Tasarımı ve Uygulaması, , Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2016, 414378.
- [4] Held M., *On the Computational Geometry of Pocket Machining*, 1rd ed., Springer Science & Business Media, New York, 1991.
- [5] Jerard R. B., Angleton J. M., Drysdale R. L., Sculptured surface tool path generation with global interference checking, *ASME Design Productivity International Conference*, Honolulu, Hawaii, February 1991.
- [6] Elberg G., Cohen E., Second-order surface analysis using hybrid symbolic and numeric operatör, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1993, **12**(2), 160-178.
- [7] Jerard R. B., Angleton J. M., Drysdale R. L., Su P., The use of surface point sets for generation, simulation and automatic correction of NC machining program, *Proceeding of NSF Design and Manufacturing Systems Conference*, Arizona, America, 8-12 January 1990.
- [8] Elber G., Accessibility in 5-axis milling environment, *Computer-Aided Design*, 1994, **26**(11), 796–802.
- [9] Elber G., Freeform surface region optimization for 3-axis and 5-axis milling, *Computer-Aided Design*, 1995, **27**(6), 465–469.
- [10] Elber G., Fish R., 5-Axis freeform surface milling using piecewise ruled surface approximation, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1197, **119**(3), 383–387.
- [11] Kim B. H., Chu C.N., Effect of cutter mark on surface roughness and scallop height in sculptured surface machining, *Computer-Aided Design*, 1994, **26**(3), 179–188.
- [12] Marciniak K., Influence of surface shape on admissible tool positions in 5-axis face milling, *Computer-Aided Design*, 1987, **19**(5), 233–236.
- [13] Vickers G.W., Quan K.W., Ball-mills versus end-mills for curved surface machining, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1989, **111**(1), 22–26.

- [14] Suresh K., Yang D.C.H., Constant scallop-height machining of free-form surfaces, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1994, **116**(2), 253–259.
- [15] Lin R.S., Koren Y., Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1996, **118**(1) 20–28.
- [16] Sarma R., Dutta D., The geometry and generation of NC tool paths, *ASME Journal of Mechanical Design*, 1997, **119**(2), 253–258.
- [17] Hwang Y.R., Liang C.S., Cutting error analysis for spindle-tilting type five-axis NC machines, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1998, **14**(6), 399–405.
- [18] Hwang Y.R., Ho M.T., Estimation of maximum allowable step length for five-axis cylindrical machining, *Journal of Manufacturing Processes*, 2000, **2**(1), 15–24.
- [19] Hwang Y.R., Cutting error analysis for table-tilting type four-axis NC machines, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2000, **16**(4), 265–270.
- [20] Yongzhang W., Xiongbo M., Liangji C., Zhenyu H., Realization Methodology of a 5-axis Spline Interpolator in an Open CNC System, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, **20**(4), 362-369.
- [21] Jeong S. I., Jin C. K., Seo H. Y., Kim J. D., Kang C. G., Mold structure design and casting simulation of the high-pressure die casting for aluminum automotive clutch housing manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, **84**(5-8), 1561-1572.
- [22] Sheltami K., Bedi S., Ismail F., Swept volumes of toroidal cutters using generating curves, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, **38**(7), 855-870.
- [23] Kim Y. J., Elber G., Bartoň, M., Pottmann H., Precise gouging-free tool orientations for 5-axis CNC machining, *Computer-Aided Design*, 2015, **58**, 220-229.
- [24] Sakarya N., Göloğlu C., Taguchi Yöntemi İle Cep İşlemede Kullanılan Takım Yolu Hareketlerinin Ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Belirlenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2006, **21**(4), 603-611.
- [25] Pınar A. M., Güllü A., Sayısal Denetimli Hidrolik Pozisyonlama Sisteminin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2010, **25**(1), 93-100.
- [26] Yan Y., Zhang L., Zhang K., Corner Smoothing Transition Algorithm for Five-axis Linear Tool Path, *Procedia CIRP*, 2016, **56**, 604-609.

- [27] Bohez E. L., Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, **42**(4), 505-520.
- [28] Lavernhe S., Tournier C., Lartigue C., Optimization of 5-axis high-speed machining using a surface based approach, *Computer-Aided Design*, 2008, **40**(10), 1015-1023.
- [29] Lee Y. S., Non-isoparametric tool path planning by machining strip evaluation for 5-axis sculptured surface machining, *Computer-Aided Design*, 1998, **30**(7), 559-570.
- [30] Mann S., Bedi S., Israeli G., Zhou X. L., Machine models and tool motions for simulating five-axis machining, *Computer-Aided Design*, 2010, **42**(3), 231-237.
- [31] Anotaipaiboon W., Makhanov S. S., Curvilinear space-filling curves for five-axis machining, *Computer-Aided Design*, 2008, **40**(3), 350-367.
- [32] Chiou J. C., Accurate tool position for five-axis ruled surface machining by swept envelope approach, *Computer-Aided Design*, 2004, **36**(10), 967-974.
- [33] Mahbubur R. M. D., Heikkala J., Lappalainen K., Karjalainen J. A., Positioning accuracy improvement in five-axis milling by post processing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1997, **37**(2), 223-236.
- [34] Liang H., Li X., Five-axis STEP-NC controller for machining of surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, **68**, 2791-2800.
- [35] Lin Z., Fu J., Shen H., Gan W., A generic uniform scallop tool path generation method for five-axis machining of freeform surface, *Computer-Aided Design*, 2014, **56**, 120-132.
- [36] Lin Z., Shen H., Gan W., Fu J., Approximate tool posture collision-free area generation for five-axis CNC finishing process using admissible area interpolation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, **62**, 1191-1203.
- [37] Roth D., Bedi S., Ismail F, Mann S., Surface swept by a toroidal cutter during 5-axis machining, *Computer-Aided Design*, 2001, **33**(1), 57-63.
- [38] Fan W., Lee C. H., Chen J. H., A realtime curvature-smooth interpolation scheme and motion planning for CNC machining of short line segments, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, **96**, 27-46.
- [39] Cha-Soo J., Kyungduck C., Yuan-Shin L., Optimizing tool orientations for 5-axis machining by configuration-space search method, *Computer-Aided Design*, 2003, **35**, 549-566.

- [40] So B. S., Jung Y. H., Kurfess T. R., Hwang S. M., 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **2**(5), 187–188.
- [41] Lartigue C., Thiebaut F., Maekawa T., CNC tool path in terms of B-spline curves, *Computer-Aided Design*, 2001, **33**, 307-319.
- [42] Gan W. F., Fu J. Z., Shen H. Y., Chen Z. Y., Lin Z. W., Five-axis tool path generation in CNC machining of T -spline surfaces, *Computer-Aided Design*, 2014, **52**, 51–63.
- [43] Zhao H., Zhu L. M., Ding H., A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments, *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 2013, **65**, 88–98.
- [44] Mörwalda T., Balzer J., Vincze M., Modeling connected regions in arbitrary planar point clouds by robust B-spline approximation, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, **76**, 141-151.
- [45] Hosseinkhani Y., Akbari J., Vafaeseifat A., Penetration–elimination method for five-axis CNC machining of sculptured surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, **47**(10), 1625-1635.
- [46] Lo C. C., Real-time generation and control of cutter path for 5-axis CNC machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, **39**(3), 471-488.
- [47] Sencer B., Altintas Y., Croft E., Feed optimization for five-axis CNC machine tools with drive constraints, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, **48**(7), 733-745.
- [48] So B. S., Jung Y. H., Kurfess T. R., Hwang S. M., 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization, *Journal of materials processing technology*, 2007, **187**, 2-5..
- [49] Altan T., Advanced techniques for die and mold manufacturing, *Annals of CIRP-Manufacturing Technology*, 1993, **42**(2), 707–716.
- [50] Souza A. F., Diniz A., Rodrigues A., Coelho R., Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, **71**(9-12), 1565-1577.
- [51] Souza A. F., Machado A., Beckert S. F., Diniz A. E., Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application, *Procedia CIRP*, 2014, **14**, 188-193.
- [52] Chu C. H., Song M. C., Luo V. C., Computer aided parametric design for 3D tire mold production, *Computers in Industry*, 2006, **57**(1), 11-25.

- [53] Chen H. C., Yau H. T., Lin C. C., Computer-aided process planning for NC tool path generation of complex shoe molds, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, **58**(5-8), 607-619.
- [54] Akkurt M., *CNC Takım Tezgahlarının Programlanması ve CAD-CAM Sistemleri*, 1rd ed., Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.
- [55] Kaya B., CAD/CAM sistemlerinden 5 eksen CNC kodlarına veri dönüştürülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2002, 121293.
- [56] Arslan H., *Bilgisayar Nümerik Kontrol Meslek Teknolojisi CNC*, 1rd ed., Milli Eğitim Bakanlığı Devlet Kitapları Baskısı, Ankara, 2002.
- [57] Culha S., CNC Torna Tezgahları için Kamera Görüntüsü ile Otomatik Parça Programlarının Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 321635.
- [58] Kuncan M., Kaplan K., Ertunç H. M., Küçükateş S., 5 Axis CNC Precision Tire Side Machining, *European Journal of Technic*, 2016, **6**(2), 117-123.
- [59] Kuncan M., Kaplan K., Ertunç H. M., 5 Axis CNC Tire Surface Prototype Machine, *3rd International Symposium On Innovative Technologies In Engineering and Science ISITES 2015*, Valencia, Spain, 3-5 June 2015.
- [60] Gökteş M., Dilipak H., Gültaş A., İki Boyutlu Profillerin İşlenmesinde Takım Yolu Ve Ofsetleme İçin Yeni Bir Algoritma Geliştirilmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2010, **25**(1), 179-187.
- [61] Oral A., CNC Takım Tezgahları ve CNC Programlama Ders Notları, <https://docslide.us/documents/cnc563db9f2550346aa9aa15439.html> (Ziyaret tarihi: 10 Haziran 2017).
- [62] Yükselen A. M., Bezier eğrileri, B-spline eğrileri Ders Notları, <http://web.itu.edu.tr/yukselen/HM504/02Ek-%20Bezier%20e%F0rileri.pdf> (Ziyaret tarihi: 11 Ağustos 2017).
- [63] Solomon D., *Curves and Surfaces for Computer Graphics*, 1rd ed., Springer, New York, 2006.
- [64] Balta C., Tersine Mühendislik Uygulamalarında Nokta Bulutu Verilerinden Örne Yüzey Ve Parametrik Yüzey Denklemlerinin Elde Edilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2016, 461896.
- [65] [http://web.itu.edu.tr/~orssi/thesis/2015/OguzhanCik\\_bit.pdf](http://web.itu.edu.tr/~orssi/thesis/2015/OguzhanCik_bit.pdf), (Ziyaret tarihi: 11 Ağustos 2017).



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Kuncan M.**, Kaplan K., Küçükateş S., Ertunç H. M., CNC lastik kalıbı işleme makine tasarımı, imalatı ve özgün NC takım yolu oluşturulması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, In Press.
- [2] **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Olive separation machine based on image processing, *Mechanika*, 2016, **22**(5), 438-443.
- [3] **Kuncan M.**, Kaplan K., Ertunç H. M., Küçükateş S., 5 Axis CNC Precision Tire Side Machining, *EJT - European Journal of Technic*, 2016, **6**(2), 117-123.
- [4] **Kuncan M.**, Kaplan K., Position Determination by Using Image Processing Method In Inverted Pendulum, *MEJT – Middle East Journal of Technic*, 2016, **1**(2), 56-63.
- [5] **Kuncan M.**, Kaplan K., Acar F., Kundakçı İ. M., Ertunç H. M., Fuzzy Logic Based Ball on Plate Balancing System Real Time Control by Image Processing, *IJNES - International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 2016, **10**(3), 28-32.
- [6] Kaplan K., Acar F., Kundakçı İ. M., **Kuncan M.**, Toprak E., İzgü A., Ertunç H. M., Process Control Methods Application in Training Set, *IJNES - International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 2016, **10**(2), 35-42.
- [7] Öztürk S., Karakuzu C., **Kuncan M.**, Erdil A., Fuzzy Neural Network Controller As A Real Time Controller Using Pso, *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 2017, **5**(1), 15-22.
- [8] **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Küçükyıldız G., Ocak H., Öztürk S., Image Processing Based on a Olive Separation Machine, *Proceedings of the 18th International Conference Mechanika*, Kaunas, Lithuania, 4-5 April 2013.
- [9] Köse F., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Development of Rope Climbing Robot Manipulator with Caterpillar, *Proceedings of the 18th International Conference Mechanika*, Kaunas, Lithuania, 4-5 April 2013.
- [10] Kaplan K., Bayram S., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Feature Extraction of Ball Bearings in Time-Space and Estimation of Fault Size with Method of ANN, *Proceedings of the 16th International Conference Mechatronika*, Brno-Czech Republic, 3-5 December 2014.

- [11] **Kuncan M.**, Kaplan K., Ertunç H. M., 5 Axis CNC Tire Surface Prototype Machine, *3. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science - ISITES*, Valencia, Spain, 3-5 June 2015.
- [12] Çubukçu A., Öztürk S., **Kuncan M.**, Kaplan K., Kuncan F., The Implementation of DC Motor Speed Control Using Image Processing and OPC Interface in the S7-1200, *3. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science - ISITES*, Valencia, Spain, 3-5 June 2015.
- [13] Tuncer U., Öztürk S., Kandilli İ., **Kuncan M.**, Elektropnömatik Bant Sistemin Gerçek Zamanlı Plc Kontrolü Ve Operatör Panel İle Gözlemlenmesi, *1. International Mediterranean Science and Engineering Congress - IMSEC*, Adana, Türkiye, 26-28 October 2016.
- [14] Kandilli İ., Güven A., Karakaş E., **Kuncan M.**, Güneş Enerjisi Kullanılarak Sulama Sistemleri İçin Yeni Bilgi Tabanlı Model, *1. International Mediterranean Science and Engineering Congress - IMSEC*, Adana, Türkiye, 26-28 October 2016.
- [15] Saraç G., Kandilli İ., **Kuncan M.**, Steril Kabin Ve Çeker Ocakların Kontrol Modülünün Tasarımı, *1. International Mediterranean Science and Engineering Congress - IMSEC*, Adana, Türkiye, 26-28 October 2016.
- [16] Saraç G., Kandilli İ., **Kuncan M.**, Uzaktan Erişimli Tavuk Çiftliği Otomasyonu, *1. International Mediterranean Science and Engineering Congress - IMSEC*, Adana, Türkiye, 26-28 October 2016.
- [17] Bakır A., Güney Ö.F., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., 3 Eksenli Robot Mekanizmasına Monte Edilmiş Bir Kamera Vasıtasıyla Farklı Rotasyon ve Boyutlardaki Geometrik Cisimlerin Tanımlanarak Vakum Tutucu ile Ayrılması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2012*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [18] Karakoç Y., Öztürk S., **Kuncan M.**, Hareket Eden Renkli Nesnelerin Takibinin PID ile Gerçekleştirilmesi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2012*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [19] Kaplan K., Bayram S., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Farklı Rulman Hatalarından Elde Edilen Titreşim Sinyalleri Üzerindeki Radyal Yüklerin Etkisi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2012*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [20] Tekinalp Z., Öztürk S., **Kuncan M.**, OPC Kullanılarak Gerçek Zamanlı Haberleşen Matlab ve PLC Kontrollü Sistem, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2013*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.
- [21] Bayram S., Kaplan K., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Bilyeli Rulmanlarda Zaman Uzunluğunda İstatistiksel Öznitelik Çıkarımı ve Yapay Sinir Ağları Metodu ile Hata Boyutunun Kestirimi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2013*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.

- [22] Ağyol E., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Özel Şifreli, Telefon Uyarımlı ve Android Uygulamalı Araç Güvenlik Sistemi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2013*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.
- [23] Demir M., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., 3 Eksenli Mini CNC Freze Tezgahı Tasarımı ve İmalatı, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2013*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.
- [24] Horoz E., Öten H. F., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Kamera Yardımı ile Ayırt Edilen ve Tanımlanan Cisimlerin 3 Eksenli Robot Mekanizması ile Taşınması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2013*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.
- [25] Bayram S., Kaplan K., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Rulman Hatalarının Dalgacık Dönüşümü Yöntemi Kullanarak Elde Edilen Katsayılara Etkisi, *IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı - SIU2014*, Trabzon, Türkiye, 23-25 Nisan 2014.
- [26] Ertuğrul İ., Ülker O., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., 8051 Mikrodenetleyici Kullanarak DC Motorun PID ile Pozisyon Kontrolü, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2014*, Kocaeli, Türkiye, 11-13 Eylül 2014.
- [27] Erdoğan Y., Dinçler T., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Güneş Panelleri için Yüksek Verimli Maksimum Güç Noktası İzleyicisi(MPPT) Tasarımı, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2014*, Kocaeli, Türkiye, 11-13 Eylül 2014.
- [28] Çubukçu A., Öztürk S., **Kuncan M.**, DC Motor Hız Kontrolünün Görüntü İşleme Ve OPC Kullanarak S7-1200' de Gerçeklenmesi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2014*, Kocaeli, Türkiye, 11-13 Eylül 2014.
- [29] Ağlar A. U., Öztürk S., **Kuncan M.**, S7 300 İle Profibus Üzerinden Sistemin Gerçek Zamanlı PID Katsayılarının Bulunarak PID İle Kontrolü, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2014*, Kocaeli, Türkiye, 11-13 Eylül 2014.
- [30] Çubukçu A., **Kuncan M.**, Kaplan K., Ertunç H. M., Zigbee Modülü Kullanılarak Ses Kontrollü Ev Otomasyonu Geliştirilmesi, *IEEE 23. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı - SIU2015*, Malatya, Türkiye, 16-19 Mayıs 2015.
- [31] Kaplan K., **Kuncan M.**, Ertunç H. M., Rulman Hata Boyutunun Uyarlanabilir Sinirsel-Bulanık Çıkarımı, *IEEE 23. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı - SIU2015*, Malatya, Türkiye, 16-19 Mayıs 2015.

## ÖZGEÇMİŞ

Melih KUNCAN, Ocak 1987, Türkođlu/Kahramanmaraş doğumludur. Orta ve lise öğrenimini Kahramanmaraş'ta tamamlamıştır. 2005 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında lisans derecesiyle ve 2011 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan 2013 yılında yüksek lisans derecesiyle mezun olmuştur. 2011 yılında, Siirt Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde ÖYP araştırma görevlisi olarak göreve başlamış ve halen görevine devam etmektedir. 2013 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitime başlamıştır.

