

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**TAKIM TEZGÂHLARI İÇİN SARSINTI VE İVME
SINIRLANDIRMALI YÖRÜNGE PLANLAMA
ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ VE DOĞRULANMASI**

ETHEM KELEKÇİ

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TAKIM TEZGÂHLARI İÇİN SARSINTI VE İVME
SINIRLANDIRMALI YÖRÜNGE PLANLAMA
ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ VE DOĞRULANMASI

ETHEM KELEKÇİ

Doç. Dr. Selçuk KIZIR
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Zafer BİNGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Serdar KÜÇÜK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Şeref Naci ENGİN
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Raşit KÖKER
Jüri Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 05.11.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İmalat sanayinin önemli yapı taşlarından biri olan Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrollü (CNC) takım tezgâhlarının çalışma performansını artırmaya yönelik akademik ve endüstriyel çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir.

Bu doğrultuda yapılan tez çalışmasında, takım tezgâhlarının kontrolüne ilişkin yapılan güncel bilimsel çalışmalar ışığında, bu alanda literatüre katkı sağlayan yeni matematiksel algoritma ve yöntemlerin yer aldığı yüksek performanslı kontrol ünitesi yazılımı geliştirilmiştir. Ayrıca, ülkemiz üretim sanayinde çok yaygın kullanılan CNC takım tezgâhlarında doğrudan kullanılabilir seviyede yerli bir kontrol ünitesi ortaya çıkarmak çalışmanın önemli bir hedefi olmuştur.

Bu çalışmanın konusunun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar olan süreçte bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Selçuk Kızır'e, çalışmalarına çok önemli destekler veren Turkuaz Elektromekanik firmasına ve Batuhan Kından'a,

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu - Bilim İnsanı Destekleme Birimine (TÜBİTAK-BİDEB) sağladığı lisansüstü bursu ile çalışmalarına yaptığı katkıdan dolayı,

Uzun ve zorlu bu süreçte her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Fatma Cömertoğlu Kelekçi'ye, doktora çalışmam sırasında dünyaya gelen ve varlığı ile enerji veren oğlum Tuna'ya,

Ayrıca hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ve bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan aileme,

İçtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Kasım – 2021

Ethem KELEKÇİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	4
1.1. CNC Tezgâhlarında Eğri Uydurma Yöntemleri	10
1.2. CNC Tezgâhlarında Köşe Yumuşatma Yöntemleri	15
1.3. CNC Tezgâhlarında Kesici Takım İlerleme Hız Planlaması	17
1.4. CNC Tezgâhlarında Yörünge İnterpolasyon İşlemleri	20
1.5. CNC Tezgâhlarında Kinematik Konfigürasyon	21
2. CNC-FREZE TEZGÂHI G-KOD FONKSİYONLARININ ÇIKARILMASI	26
2.1. G00/G01 Doğrusal Hareket Komutları	27
2.2. G02/G03 Dairesel Hareket Komutları	31
2.2.1. Dairesel hareketin merkez noktasının tespit edilmesi	32
2.2.2. Dairesel hareketin başlangıç noktasının ve dairese hareket miktarının hesaplanması	35
2.3. G06.2 NURBS Eğrisel Hareket Komutu	40
2.3.1. NURBS eğrileri	42
2.3.2. NURBS eğrisinin boyu	51
2.4. G05.1 Hassas İşleme Komutu	57
2.4.1. G1 nokta bulutu analizi	58
2.4.2. Düzgün dağılımlı (uniform) düğüm vektörü yöntemi	61
2.4.3. Universal düğüm vektörü yöntemi	62
2.4.4. Kiriş uzunluğuna (chord length) bağlı düğüm vektörü yöntemi	63
2.4.5. Merkezci (centripetal) düğüm vektörü yöntemi	63
2.4.6. Yöntemlerin karşılaştırılması	64
3. HIZ PLANLAMA VE YÖRÜNGE İNTERPOLASYON ALGORİTMALARI	69
3.1. G01 Komutu için Yörünge Planlamasının Yapılması	69
3.2. G02/G03 Komutları için Yörünge Planlamasının Yapılması	82
3.3. Eğrisel Fonksiyonlar İçin Yörünge Planlamasının Yapılması	90
3.3.1. Eğrilik yarıçapı ve kiriş hatası (chord error)	91
4. CNC KONTROL ÜNİTESİ YAZILIM VE DONANIM GELİŞTİRME İŞLEMLERİ	98
4.1. Operatör Panel Arayüzünün Geliştirilmesi	98
4.2. TwinCat Yazılım İşlemleri	107
4.2.1. EtherCat protokolü	107
4.2.2. TwinCat programı	111
4.2.2.1. IO terminal EtherCat bağlantısının kurulması	113

4.2.2.2. Motor sürücü EtherCat bağlantısının kurulması	116
4.2.2.3. TwinCat PLC yazılımı.....	120
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	133
5.1. AC Servo Motor Yörünge Takibi ve Senkronizasyon Testleri	133
5.2. Endüstriyel 3-Eksen CNC-Freze Tezgâhı Kontrolü.....	143
5.2.1. Kaba talaş kaldırma işlemi	147
5.2.2. Slot açma işlemi	149
5.2.3. Konik küre açma işlemi	151
5.2.4. Genel finiş işlemi	155
5.2.5. Uygulama değerlendirmeleri.....	158
5.3. Endüstriyel 4-Eksen CNC-Freze Tezgâhı Kontrolü.....	158
5.3.1. Kinematik dönüşüm işlemleri	160
5.3.1.1. İleri kinematik dönüşümü.....	161
5.3.1.2. Ters kinematik dönüşümü	162
5.3.2. Kütük parçaya küresel form verme uygulaması.....	171
5.3.3. Dairesel cep boşaltma uygulaması	174
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	176
KAYNAKLAR	180
EKLER.....	187
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	194
ÖZGEÇMİŞ	195

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	(a) CNC-Freze (b) CNC-Torna (c) CNC- Kalıp (d) CNC-Lazer	5
Şekil 1.2.	CNC-Freze tezgâhı genel yapısı.....	5
Şekil 1.3.	CNC tezgâhında ürün işleme adımları	6
Şekil 1.4.	Post-Processor yapısı.....	7
Şekil 1.5.	Operatör panelleri (a) Mazak SmoothX (b) Fanuc (c) Haas (d) Siemens 828D (e) Mitsubishi M70	9
Şekil 1.6.	(a) Quintic spline fonksiyonu ile eğri uydurma yöntemi (b) quintic-spline eğrisi	11
Şekil 1.7.	Bezier fonksiyonu ile eğri uydurma	11
Şekil 1.8.	Yengeç ve kelebek formlarının Bezier eğrisi ile çıkarılması	12
Şekil 1.9.	Dörtlü Bezier segmentlerinin G3 interpolatif takım yollarına dönüştürülmesi	12
Şekil 1.10.	(a) Nokta bulutu (b) Kuadratik B-spline fonksiyonu ile eğri uydurma işlemi	13
Şekil 1.11.	Kelebek figürünün beşinci dereceden B-spline eğrisine dönüştürülmesi	14
Şekil 1.12.	Nokta bulutlarının NURBS eğrilerine dönüştürülmesi.....	14
Şekil 1.13.	Nokta bulutlarının kontur hatası sınırlaması altında NURBS eğrisine dönüştürülmesi.....	14
Şekil 1.14.	Köşe yumuşatması ile sert geçişlerin düzenlenmesi	15
Şekil 1.15.	Global yörünge ve köşe yumuşatma işlem sonuçları	16
Şekil 1.16.	(a) NURBS eğrisi (b) kesici takım hız profili	18
Şekil 1.17.	(a) NURBS kelebek eğrisi (b) CSFA yöntemi temelinde çıkarılan kesici takım hız profili.....	19
Şekil 1.18.	Pythagorean-hodograph yıldız eğrisi (b) C2 sürekliliğinde oluşturulan kesici takım hız profili.....	19
Şekil 1.19.	NURBS kelebek eğrisinin CNC-Freze tezgâhı üzerinde işlenmesi	20
Şekil 1.20.	NURBS eğrileri için kesici takım ilerleme hızı düzeltme işleminin uygulanması	21
Şekil 1.21.	5-eksen CNC-Freze tezgâhı konfigürasyonları (a) ZA'B'-YX (b) B'C'-ZYX (c) ZXC'-B'Y (d) A'B'-XYZ	22
Şekil 1.22.	Kesici takım kartezyen uzay yörüngesi ve oryantasyon yörüngesinin çıkarılması işlemi	23
Şekil 1.23.	(a) CNC-Freze eksen yerleşimi (b) komut satırına karşılık gelen konum ve oryantasyonun gösterimi	23
Şekil 1.24.	Aktif ve pasif RTCP'nin kesici takım yörüngelerine etkisi	24
Şekil 1.25.	Senkronizasyonun sağlanması için doğrusal ve açısal hızların optimize edilmesi	25
Şekil 2.1.	G00/G01 doğrusal hareket komutu.....	28
Şekil 2.2.	G01 X12 Y7 Z-2 komutuna ilişkin eksen hareketleri	30
Şekil 2.3.	G01 X30 Y-50 komutuna ilişkin eksen hareketleri.....	30
Şekil 2.4.	G01 X50 komutuna ilişkin eksen hareketleri.....	31
Şekil 2.5.	İki noktası ve yarıçapı bilinen dairenin merkez noktaları	33

Şekil 2.6.	Başlangıç noktasının 180° karşı noktaları	34
Şekil 2.7.	Merkez noktası seçimine ilişkin durum diyagramı	34
Şekil 2.8.	G02 ve G03 komutları için başlangıç açısı ve radyüs açısının gösterimi	36
Şekil 2.9.	G17 G02 X9.019 Y2.975 R5 komutuna ilişkin eksen hareketleri	37
Şekil 2.10.	G18 G02 X9.019 Z2.975 R5 komutuna ilişkin eksen hareketleri	38
Şekil 2.11.	G19 G02 Y9.019 Z2.975 R5 komutuna ilişkin eksen hareketleri	38
Şekil 2.12.	G17 G03 X14.94 Y1.749 Z2 R14.976 komutuna ilişkin eksen hareketleri	39
Şekil 2.13.	Dairesel hareketin 180°'den büyük olma durumu	39
Şekil 2.14.	Negatif ve pozitif radyüs değerinin kesici takım yörüngesine etkisi	40
Şekil 2.15.	Baz fonksiyonlarının özyinelemeli yapısı	44
Şekil 2.16.	Baz fonksiyon dereceleri	45
Şekil 2.17.	Uniform kübik baz fonksiyonları (düğüm vektörü: [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13])	47
Şekil 2.18.	NURBS eğrisinin segmentlerinin oluşturulması	48
Şekil 2.19.	NURBS eğrisinin Convex Hull özelliği	49
Şekil 2.20.	Yedi segmentli NURBS eğrisi (uniform baz fonksiyonlu)	50
Şekil 2.21.	Nonuniform kübik baz fonksiyonları (düğüm vektörü: [0 0 0 0 1 2 3 4 5 6 7 7 7 7])	51
Şekil 2.22.	Yedi segmentli NURBS eğrisi (nonuniform baz fonksiyonlu)	51
Şekil 2.23.	a-b zaman aralığında eksen fonksiyonları	52
Şekil 2.24.	Kübik baz fonksiyonlarının türev fonksiyonları	54
Şekil 2.25.	(a) NURBS eğrisi (b) NURBS eğri boyuna karşılık gelen eksen hareketleri	55
Şekil 2.26.	Ağırlık vektörünün NURBS eğrisine etkisi (a) X-Y uzayı (b) X-Y-Z uzayı	55
Şekil 2.27.	Nokta bulutu analizi işlem adımları	60
Şekil 2.28.	Düğüm vektörü yöntemlerinin karşılaştırılması	65
Şekil 2.29.	Merkezcil yöntem için oluşturulan kübik baz fonksiyonları	65
Şekil 2.30.	Düğüm vektör yöntemlerinin NURBS eğrisine etkisi	67
Şekil 3.1.	Jerk ve ivme sınırlandırılmalı hız profili	72
Şekil 3.2.	Hız profil türleri	73
Şekil 3.3.	Hız profil seçim algoritması	74
Şekil 3.4.	(a) Kesici takım yörüngesi (b) hareket boyuna ilişkin elde edilen eksen yörüngeleri (G01 X15 Y20 Z10 F3000)	77
Şekil 3.5.	Hedef jerk, ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri (G01 X15 Y20 Z10 F3000)	78
Şekil 3.6.	(a) Hedef profiller sonucunda ortaya çıkan eksen yörüngeleri (b) hedef ve gerçekleşen yer değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması	78
Şekil 3.7.	(a) Kesici takımın izleyeceği doğrusal hareket yörüngesi (b) bu yörünge için oluşturulan hız profili (G01 X40 Y25 Z10 F3000, G01 X50 Y90 Z65, G01 X10 Y120 Z-30)	80
Şekil 3.8.	Eksen yörüngeleri ve eksenel hız/ivme grafikleri (G01 X40 Y25 Z10 F3000, G01 X50 Y90 Z65, G01 X10 Y120 Z-30)	80
Şekil 3.9.	(a) Kesici takımın izleyeceği doğrusal hareket yörüngesi (b) bu yörünge için oluşturulan hız profili (G01 X40 Y20 Z20 F3000, G01 X80 Y35 Z30, G01 X115 Y55 Z40)	81

Şekil 3.10. Eksen yörüngeleri ve eksenel hız/ivme grafikleri (G01 X40 Y20 Z20 F3000, G01 X80 Y35 Z30, G01 X115 Y55 Z40).....	82
Şekil 3.11. β açısı aralıklarının gösterimi (a) Norm1 (b) Norm – 1 durumları için.....	83
Şekil 3.12. Hedef jerk, ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri (G02 X9.019 Y2.975 R14.976 F1800).....	85
Şekil 3.13. G02 X9.019 Y2.975 R14.976 F1800 komutuna ilişkin eksen hareketleri.....	85
Şekil 3.14. Hedef ve gerçekleşen yer değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması (G02 X9.019 Y2.975 R14.976 F1800).....	86
Şekil 3.15. Kartezyen uzayda işlenecek dairesel yörünge ve kesici takım hız profili.....	87
Şekil 3.16. Önerilen yöntem ve B-spline eğri uydurma yöntemi ile çıkarılan yörüngelerin karşılaştırılması.....	87
Şekil 3.17. Kartezyen uzayda işlenecek helisel yörünge ve CNC tezgâhının ve kesici takım hız profili.....	88
Şekil 3.18. Eksen yörüngeleri (a) dairesel hareket (b) helisel hareket için.....	89
Şekil 3.19. Önerilen interpolasyon yönteminin klasik yöntemle karşılaştırması (a) dairesel yörünge (b) helisel yörünge için.....	89
Şekil 3.20. Eğrilik yarıçapı ve giriş hatası.....	91
Şekil 3.21. Denklem 3.13 parametrelerine göre elde edilen NURBS eğrisi.....	94
Şekil 3.22. Eğrilik grafiği ve eşik değeri üzerindeki bölgesel maksimum/minimum noktalarının bulunması.....	94
Şekil 3.23. Hedef jerk, ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri (Şekil 3.21'deki NURBS eğrisi için).....	95
Şekil 3.24. Hedef ve gerçekleşen yer değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.....	96
Şekil 3.25. NURBS kelebek eğrisi ve eğrilik grafiği.....	97
Şekil 3.26. NURBS kelebek eğrisine ilişkin kesici takım hız profili.....	97
Şekil 4.1. Geliştirilen operatör paneli.....	98
Şekil 4.2. Operatör panel arayüzü.....	99
Şekil 4.3. Operatör panel arayüzü bölümleri.....	99
Şekil 4.4. Operatör panel yazılımında G-M komut sınıflandırması.....	100
Şekil 4.5. NC dosyası okuma ve sınıflandırma işlemleri.....	101
Şekil 4.6. Makine (M), parça (A) ve bağıl (R) sıfırı referans noktaları.....	102
Şekil 4.7. Operatör panel arayüzünde parça ve bağıl sıfırlama işlemleri.....	103
Şekil 4.8. Operatör panel arayüzünde esnek yörünge inceleme işlemleri.....	106
Şekil 4.9. EtherCat çalışma yapısı.....	108
Şekil 4.10. EtherCat bağlantı yapısı.....	108
Şekil 4.11. EtherCat bağlantı yapısı (açık-kapalı).....	109
Şekil 4.12. Dağıtılmış saat kullanımı.....	110
Şekil 4.13. EtherCat frame yapısı.....	110
Şekil 4.14. TwinCat arayüzü.....	111
Şekil 4.15. ADS haberleşme protokolünün kullanımı.....	113
Şekil 4.16. CNC kontrol ünitesi haberleşme sistemi.....	113
Şekil 4.17. EtherCat bağlayıcıları.....	114
Şekil 4.18. EtherCat bağlayıcı ile IO terminal kurulumu.....	115
Şekil 4.19. EtherCat bağlayıcısına ait XML dosyasının TwinCat yazılımına eklenmesi.....	115
Şekil 4.20. IO terminaline bağlı modüllerin kontrolü.....	116

Şekil 4.21. Servo sürücüsüne ait XML dosyasının TwinCat yazılımına eklenmesi.....	117
Şekil 4.22. TwinCat yazılımı ile servo sürücünün kontrol edilmesi	118
Şekil 4.23. Master PC ile servo sürücü arasındaki fiziksel bağlantının kurulumu	118
Şekil 4.24. Servo sürücü PDO haritalandırması (mapping)	119
Şekil 4.25. TwinCat yazılımında PDO haritalarının kullanımı	119
Şekil 4.26. CNC kontrol ünitesi PLC yazılımı (ana program)	120
Şekil 4.27. CNC kontrol ünitesi PLC yazılımı (fonksiyon programları)	121
Şekil 4.28. AC servo motor pozisyon kontrol kapalı çevrim yapısı.....	122
Şekil 4.29. AC servo motor hız kontrol kapalı çevrim yapısı	122
Şekil 4.30. Sürücü kontrol parametreleri.....	123
Şekil 4.31. Sysmac Studio sürücü yapılandırma işlemi	124
Şekil 4.32. Sürücü yapılandırılması iterasyon işlemlerinin sonlanması.....	124
Şekil 4.33. CNC kontrol ünitesi ikili ping-pong buffer mekanizması.....	125
Şekil 4.34. Pozisyon, hız ve ivme vektörlerinin buffer mekanizmasına aktarılması	126
Şekil 4.35. Operatör panel arayüzünde otomatik mod seçimi.....	126
Şekil 4.36. İşlenen komut satırının gerçek zamanlı operatör panel arayüzünde takibi.....	127
Şekil 4.37. (a) JOG modunda manuel eksen kontrolü (b) eksen konumlarının gerçek zamanlı takibi	128
Şekil 4.38. (a) INC modunda hassas eksen kontrolü (b) eksen konumlarının gerçek zamanlı takibi	129
Şekil 4.39. (a) Eksenlerin referans noktalarına gönderilmesi işlemi (b) eksen konumlarının gerçek zamanlı takibi.....	129
Şekil 4.40. Tezgâhın makine sıfırına gönderilmesi işlemi	130
Şekil 4.41. CNC kontrol ünitesi el kumandası	131
Şekil 4.42. Manuel spindle kontrol işlemi.....	132
Şekil 5.1. Endüstriyel AC servo motorlu test düzeneği.....	133
Şekil 5.2. Fiziksel bağlantıların yapılması	134
Şekil 5.3. Üçgensel yörünge takibi sonuçları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz.....	134
Şekil 5.4. Üçgensel yörünge takibi hataları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz	135
Şekil 5.5. Üçgensel yörünge takibi için (a) ortalama konum hata değerinin tespiti (b) maksimum konum hata değerinin tespiti.....	135
Şekil 5.6. 10° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi sonuçları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz.....	136
Şekil 5.7. 10° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi hataları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz.....	136
Şekil 5.8. 25° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi sonuçları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz.....	136
Şekil 5.9. 25° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi hataları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz.....	137
Şekil 5.10. 50° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi sonuçları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz.....	137
Şekil 5.11. 50° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi hataları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz.....	137
Şekil 5.12. Sinüzoidal yörünge takibi için (a) ortalama konum hata değerinin tespiti (b) maksimum konum hata değerinin tespiti	138

Şekil 5.13. İki motorlu test düzeneği sistemi	139
Şekil 5.14. Üç motorlu sistemde fiziksel bağlantıların yapılması	139
Şekil 5.15. 42,832 satırlı NC dosyasının program çıktısı (uygulama 1)	140
Şekil 5.16. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata grafikleri (uygulama 1)	141
Şekil 5.17. 17,847 satırlı NC dosyasının program çıktısı (uygulama 2)	141
Şekil 5.18. 27,060 satırlı NC dosyasının program çıktısı (uygulama 3)	142
Şekil 5.19. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata grafikleri (uygulama 2)	142
Şekil 5.20. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata grafikleri (uygulama 3)	143
Şekil 5.21. 3-Eksen CNC-Freze tezgâhı açık versiyonu	144
Şekil 5.22. 3-Eksen CNC-Freze tezgâhı giydirilmiş versiyonu	144
Şekil 5.23. CNC tezgâhı elektrik panosu.....	145
Şekil 5.24. CNC kontrol ünitesi ile fiziksel sistem arasında kurulan bağlantı yapısı	146
Şekil 5.25. (a) İşlenecek kütük parça (b) işlenmiş parça	146
Şekil 5.26. Tarama başlığı (50 Ø)	147
Şekil 5.27. Kaba talaş kaldırma NC dosyasının program çıktısı	147
Şekil 5.28. Kaba talaş kaldırma işlemi için oluşan kesici takım yörüngesi ve eksen yörüngeleri	148
Şekil 5.29. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları (kaba talaş kaldırma)	148
Şekil 5.30. (a) Matkap başlığı (10.2 Ø) (b) radyuslu freze başlığı (10 Ø)	149
Şekil 5.31. Slot deliklerine ait program çıktısı	150
Şekil 5.32. Slot açma NC dosyasının program çıktısı	150
Şekil 5.33. Kesici takım yörüngesi/eksen yörüngeleri (a) slot delikleri (b) slot açma	150
Şekil 5.34. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları (a) slot delikleri (b) slot açma	151
Şekil 5.35. Konik küre kaba işleme NC dosyasının program çıktısı	151
Şekil 5.36. Kesici takım yörüngesi/eksen yörüngeleri (a) konik küre kaba (b)) konik küre finiş.....	152
Şekil 5.37. Konik küre finiş işleme NC dosyasının program çıktısı	152
Şekil 5.38. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları (a) konik küre kaba işleme (b) konik küre finiş işleme	153
Şekil 5.39. Nokta bulutunun NURBS eğrisine dönüştürülmesi	154
Şekil 5.40. NURBS eğrisine ilişkin hız, ivme ve jerk grafikleri	154
Şekil 5.41. Eksen hız ve ivme grafikleri (a) küre kaba işleme (b) küre finiş işleme	155
Şekil 5.42. Genel finiş işleme NC dosyasının program çıktısı.....	156
Şekil 5.43. (a) Kesici takım yörüngesi/eksen yörüngeleri (b) gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları	156
Şekil 5.44. Genel finiş işlemi (a) öncesi (b) sonrası	157
Şekil 5.45. 4-Eksen CNC-LKM tezgâhı	159
Şekil 5.46. CNC-LKM tezgâhı elektrik panosu	160
Şekil 5.47. CNC kontrol ünitesi ile fiziksel sistem arasında kurulan bağlantı yapısı	160
Şekil 5.48. İleri kinematik dönüşümü	161
Şekil 5.49. Ters kinematik dönüşümü	162

Şekil 5.50. Döner tabla için örnek çalışma senaryosu.....	164
Şekil 5.51. Kesici takım yönelim açıları	164
Şekil 5.52. A açısının tanjant bölgelerine ayrılması	165
Şekil 5.53. (a) Saat yönünde (G02) dairesel hareket ve yönelim açıları (b) saat yönü tersinde (G03) dairesel hareket ve yönelim açıları.....	166
Şekil 5.54. Örnek bir nokta bulutundan elde edilmiş NURBS eğrisi üzerinde doğru A açılarının bulunması.....	166
Şekil 5.55. 4-Eksen NC dosya yörüngesinin ileri kinematik işlemlerle kartezyen uzay yörüngesine dönüştürülmesi.....	167
Şekil 5.56. Planlanan yörüngenin NC dosya yörüngesi ile karşılaştırılması.....	168
Şekil 5.57. (a) 4-Eksen NC dosya verileri (b) ters kinematik dönüşüm işlemi sonrası elde edilen 4-Eksen yörüngesi	168
Şekil 5.58. 4-Eksen CNC-LKM tezgâhı özelinde CNC kontrol ünitesi çalışma yapısı	170
Şekil 5.59. (a) Kaba işleme program çıktısı (b) finiş işleme program çıktısı.....	171
Şekil 5.60. (a) Kütük parça (b) kaba işleme ürün çıktısı (c) finiş işleme ürün çıktısı	171
Şekil 5.61. Kaba işleme uygulamasına ait bir bölümünün interpolasyon işlem detayları.....	172
Şekil 5.62. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları (a) küre kaba işleme (b) küre finiş işleme	173
Şekil 5.63. (a) Dairesel cep boşaltma işlemi program çıktısı (b) ürün çıktısı	174
Şekil 5.64. Dairesel cep boşaltma uygulamasına ilişkin gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları	175

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. CNC-Freze tezgâhı G-kodları	8
Tablo 1.2. CNC-Freze tezgâhı M-kodları.....	9
Tablo 2.1. Başlangıç ve bitiş noktalarına göre bölge seçim işlemi.....	33
Tablo 2.2. Seçilen düzleme göre değişken değiştirme yönteminin uygulanması.....	37
Tablo 2.3. Dairesel hareketin 180°'den büyük olması durumunda bölge seçim işlemi	39
Tablo 2.4. NURBS eğri boylarının karşılaştırılması	56
Tablo 2.5. Nokta bulutu analiz algoritması	59
Tablo 2.6. NURBS eğri boylarının karşılaştırılması	68
Tablo 3.1. Hız, ivme ve jerk denklemleri.....	73
Tablo 3.2. Komut satır geçişlerine uygun V_e/s değerlerinin bulunması	83
Tablo 4.1. Operatör panel arayüzünde bulunan kontrol butonları.....	104
Tablo 4.2. CNC çalışma modlarına göre kontrol türleri.....	121
Tablo 5.1. Yörünge takibi hata değerleri.....	138
Tablo 5.2. Eksenel yörünge takibine ilişkin RMSE ve MSE hata değerleri (3-Eksen CNC-Freze Tezgâhı tüm uygulamaları)	157
Tablo 5.3. Eksenel yörünge takibine ilişkin RMSE ve MSE hata değerleri	175

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

L_{seg}	: Segment uzunluğu
k_i	: Doğrusal hareket interpolasyon parametresi
x_i	: Kartezyen uzay x yörüngesi
y_i	: Kartezyen uzay y yörüngesi
z_i	: Kartezyen uzay z yörüngesi
T_s	: Eksen veri yenileme hızı
F	: Kesici takım ilerleme hızı (mm/dk)
V	: Kesici takım ilerleme hızı (mm/s)
xc_1	: Dairesel hareketlerde x ekseninde 1. merkez noktası
yc_1	: Dairesel hareketlerde y ekseninde 1. merkez noktası
xc_2	: Dairesel hareketlerde x ekseninde 2. merkez noktası
yc_2	: Dairesel hareketlerde y ekseninde 2. merkez noktası
x_{e1}	: Başlangıç noktasının 180° karşısındaki 1. x noktası
x_{e2}	: Başlangıç noktasının 180° karşısındaki 2. x noktası
y_{e1}	: Başlangıç noktasının 180° karşısındaki 1. y noktası
y_{e2}	: Başlangıç noktasının 180° karşısındaki 2. y noktası
θ_{02}	: G02 komutuna ilişkin daireysel hareket başlangıç açısı
θ_{03}	: G03 komutuna ilişkin daireysel hareket başlangıç açısı
θ	: Dairesel hareket açısı miktarı
R	: Dairesel hareket yarıçapı
α_i	: Dairesel hareket interpolasyon parametresi
L_{rad}	: Dairesel hareket uzunluğu
K	: G06.2 komutu düğüm vektörü
P	: G06.2 komutu NURBS eğri derecesi
α	: G06.2 komutu α döner eksen kontrol noktaları
β	: G06.2 komutu β döner eksen kontrol noktaları
X	: G06.2 komutu X eksen kontrol noktaları
Y	: G06.2 komutu Y eksen kontrol noktaları
Z	: G06.2 komutu Z eksen kontrol noktaları
C_u	: NURBS eğri fonksiyonu
$B_{i,p}$: NURBS eğrisi baz fonksiyonları
w_i	: NURBS eğrisi ağırlık vektörü
P_i	: NURBS eğrisi kontrol noktaları
u	: NURBS eğri parametresi
t_i	: Baz fonksiyon parametresi
t_0	: Kübik birinci baz fonksiyonun başlangıç noktası
t_1	: Kübik ikinci baz fonksiyonun başlangıç noktası
t_2	: Kübik üçüncü baz fonksiyonun başlangıç noktası
t_3	: Kübik dördüncü baz fonksiyonun başlangıç noktası
t_4	: Kübik beşinci baz fonksiyonun başlangıç noktası
$f_i^{(u)}$: NURBS eğrisi segment fonksiyonu

M	: Baz fonksiyon matrisi
$m_{i,j}$: Baz fonksiyon matris elemanları
$S(f, h)$: Komposit Simpson fonksiyonu
h	: Komposit Simpson fonksiyon parametresi
x_k	: Komposit Simpson fonksiyon parametresi
a	: Komposit Simpson fonksiyonu başlangıç noktası
b	: Komposit Simpson fonksiyonu bitiş noktası
$B'_{i,p}$: NURBS eğrisi baz fonksiyon türevi
$f'_i(u)$: NURBS eğrisi segment fonksiyon türevi
dx_{10}	: X ekseninde birinci doğrusal hareket segmentinin bitiş ve başlangıç noktası arasındaki
dy_{10}	: Y ekseninde birinci doğrusal hareket segmentinin bitiş ve başlangıç noktası arasındaki fark değeri
dz_{10}	: Z ekseninde birinci doğrusal hareket segmentinin bitiş ve başlangıç noktası arasındaki fark değeri
dx_{21}	: X ekseninde ikinci doğrusal hareket segmentinin bitiş ve başlangıç noktası arasındaki fark değeri
dy_{21}	: Y ekseninde ikinci doğrusal hareket segmentinin bitiş ve başlangıç noktası arasındaki fark değeri
dz_{21}	: Z ekseninde ikinci doğrusal hareket segmentinin bitiş ve başlangıç noktası arasındaki fark değeri
$\theta_{(deg)}$: Nokta bulutu analizine ilişkin açı değeri
Q_i	: Nokta bulutu içindeki veri noktaları
L_{x1}	: X eksenindeki hareket boyunun birinci doğrusal hareket boyuna oranı
L_{y1}	: Y eksenindeki hareket boyunun birinci doğrusal hareket boyuna oranı
L_{z1}	: Z eksenindeki hareket boyunun birinci doğrusal hareket boyuna oranı
L_{*1}	: * eksenindeki hareket boyunun birinci doğrusal hareket boyuna oranı
L_{x2}	: X eksenindeki hareket boyunun ikinci doğrusal hareket boyuna oranı
L_{y2}	: Y eksenindeki hareket boyunun ikinci doğrusal hareket boyuna oranı
L_{z2}	: Z eksenindeki hareket boyunun ikinci doğrusal hareket boyuna oranı
L_{*2}	: * eksenindeki hareket boyunun ikinci doğrusal hareket boyuna oranı
$V_{xMaxGap}$: X ekseninde iki doğrusal hareket arasındaki maksimum hız farkı
$V_{yMaxGap}$: Y ekseninde iki doğrusal hareket arasındaki maksimum hız farkı
$V_{zMaxGap}$: Z ekseninde iki doğrusal hareket arasındaki maksimum hız farkı
$V_{*MaxGap}$: * ekseninde iki doğrusal hareket arasındaki maksimum hız farkı
α_{xMax}	: İki doğrusal hareket arasında X eksen motoru için izin verilen maksimum açısal hız farkı
α_{yMax}	: İki doğrusal hareket arasında Y eksen motoru için izin verilen maksimum açısal hız farkı
α_{zMax}	: İki doğrusal hareket arasında Z eksen motoru için izin verilen maksimum açısal hız farkı
α_{*Max}	: İki doğrusal hareket arasında * eksen motoru için izin verilen maksimum açısal hız farkı
C_x	: X eksen motoruna bağlı aktarım organına ilişkin katsayı
C_y	: Y eksen motoruna bağlı aktarım organına ilişkin katsayı
C_z	: Z eksen motoruna bağlı aktarım organına ilişkin katsayı
C_*	: * eksen motoruna bağlı aktarım organına ilişkin katsayı

V_{ex}	: X eksenine ilişkin bulunan ilerleme hız değeri
V_{ey}	: Y eksenine ilişkin bulunan ilerleme hız değeri
V_{ez}	: Z eksenine ilişkin bulunan ilerleme hız değeri
V_{e*}	: * eksenine ilişkin bulunan ilerleme hız değeri
V_e	: İşleme alınan nihai ilerleme hız değeri
j_1	: Beş bölge jerk grafiğinin birinci bölgesi
j_2	: Beş bölge jerk grafiğinin ikinci bölgesi
j_3	: Beş bölge jerk grafiğinin üçüncü bölgesi
j_4	: Beş bölge jerk grafiğinin dördüncü bölgesi
j_5	: Beş bölge jerk grafiğinin beşinci bölgesi
a_1	: Beş bölge ivme grafiğinin birinci bölgesi
a_2	: Beş bölge ivme grafiğinin ikinci bölgesi
a_3	: Beş bölge ivme grafiğinin üçüncü bölgesi
a_4	: Beş bölge ivme grafiğinin dördüncü bölgesi
a_5	: Beş bölge ivme grafiğinin beşinci bölgesi
f_1	: Beş bölge hız grafiğinin birinci bölgesi
f_2	: Beş bölge hız grafiğinin ikinci bölgesi
f_3	: Beş bölge hız grafiğinin üçüncü bölgesi
f_4	: Beş bölge hız grafiğinin dördüncü bölgesi
f_5	: Beş bölge hız grafiğinin beşinci bölgesi
J_m	: Maksimum jerk değeri
A_m	: Maksimum ivme değeri (hızlanma)
D_m	: Maksimum ivme değeri (yavaşlama)
V_{max}	: Maksimum ilerleme hız değeri (mm/s)
t_a	: Hızlanma süresi
t_c	: Sabit hızlı ilerleme süresi
t_d	: Yavaşlama süresi
$V(k_i)$: k_i parametresine karşılık gelen ilerleme hız değeri
$L'(k_i)$: Doğrusal hareket birinci türevi
$A(k_i)$: k_i parametresine karşılık gelen ivme değeri
$L''(k_i)$: Doğrusal hareket ikinci türevi
s_1	: Beş bölge yer değiştirme grafiğinin birinci bölgesi
s_2	: Beş bölge yer değiştirme grafiğinin ikinci bölgesi
s_3	: Beş bölge yer değiştirme grafiğinin üçüncü bölgesi
s_4	: Beş bölge yer değiştirme grafiğinin dördüncü bölgesi
s_5	: Beş bölge yer değiştirme grafiğinin beşinci bölgesi
$\beta^{(c)}$: Dairesel hareket komut geçiş kriterine ilişkin açı değeri
$V(\alpha_i)$: α_i parametresine karşılık gelen ilerleme hız değeri
$R'(\alpha_i)$: Dairesel hareket birinci türevi
$A(\alpha_i)$: α_i parametresine karşılık gelen ivme değeri
$R''(\alpha_i)$: Dairesel hareket ikinci türevi
k_i	: Eğrilik değeri
ρ_i	: Eğrilik yarıçapı
δ_i	: Kiriş hatası
V_{u_i}	: u_i parametresine karşılık gelen ilerleme hız değeri
k_{min}	: Eğrilik grafiğine ilişkin bölgesel minimum noktaları
k_{max}	: Eğrilik grafiğine ilişkin bölgesel maksimum noktaları
$C'(u_i)$: NURBS fonksiyonu birinci dereceden türevi

$A(u_i)$: u_i parametresine karşılık gelen ivme değeri
$C''(u_i)$: NURBS fonksiyonu ikinci dereceden türevi
$C^{(m)}(u)$: NURBS fonksiyonu m. dereceden türevi
x_w	: İş parçası kartezyen uzay x eksen koordinatı
y_w	: İş parçası kartezyen uzay y eksen koordinatı
z_w	: İş parçası kartezyen uzay z eksen koordinatı
y_j	: Eklem uzayı y eksen koordinatı
z_j	: Eklem uzayı z eksen koordinatı
l_{tool}	: İş mili pivot uzunluğu
θ_a	: Eklem uzayı a eksen koordinatı
θ_c	: Eklem uzayı c eksen koordinatı
A_{in}	: Kesici takım yönelim açısı değeri (iç)
A_{out}	: Kesici takım yönelim açısı değeri (dış)

Kısaltmalar

ACC	: Acceleration (Hızlanma)
ADS	: Automation Device Specification (Otomasyon Cihaz Spesifikasyonu)
AUTO	: Automatic (Otomatik)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAE	: Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
CAM	: Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
CFC	: Continuous Function Chart (Sürekli Fonksiyon Şeması Düzenleyicisi)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
DCC	: Deceleration (Yavaşlama)
FBD	: Function Block Diagram (Fonksiyon Blok Diyagramı)
FCS	: Frame Check Sequence (Çerçeve Kontrol Dizisi)
FIR	: Finite Impulse Response (Sonlu Dürtü Yanıtı)
IL	: Instruction List (Talimat Listesi)
IO	: Input/Output (Giriş/Çıkış)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu)
LD	: Ladder Diagram (Merdiven Diyagramı)
MDI	: Manuel Data Input (Manuel Veri Girişi)
MSE	: Mean-Square Error (Ortalama Kareysel Hata)
NC	: Numeric Control (Sayısal Kontrol)
NURBS	: Non-Uniform Rational B-Spline (Düzgün Olmayan Rasyonel B-Spline)
PDO	: Process Data Object (Proses Veri Nesnesi)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)
POU	: Program Organization Units (Program Organizasyon Birimi)
REF	: Reference (Referans)
RMSE	: Root-Mean-Square Error (Ortalama Karekök Hatası)
RTCP	: Rotation Tool Center Point (İş Mili Merkez Noktası)
SDO	: Service Data Object (Servis Veri Nesnesi)
SFC	: Sequential Function Chart (Sıralı Fonksiyon Şeması)
ST	: Structured Text (Yapılandırılmış Metin)

TAKIM TEZGÂHLARI İÇİN SARSINTI VE İVME SINIRLANDIRMALI YÖRÜNGE PLANLAMA ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ VE DOĞRULANMASI

ÖZET

Yapılan tez çalışmasında, metal, ahşap ya da diğer katı malzemelerin şekillendirildiği veya işlendiği talaşlı imalat sanayinin önemli bir parçası olan takım tezgâhları için sarsıntı ve ivme sınırlandırılmalı yörünge planlama algoritmaları temelinde kontrol ünitesi yazılımı geliştirilmiştir. Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrollü (CNC) takım tezgâhları ISO standartlarına göre oluşturulan G ve M kodlarının yer aldığı Sayısal Kontrol (NC) dosyaları ile çalıştığı için, yapılan çalışmanın alt yapısı da G ve M kodları üzerine kurulmuştur. Bilgisayar tabanlı çalışan kontrol ünitesi yazılımı Visual Studio ortamında C# dili ile geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımda, önerilen yöntemlerle doğrusal, dairesel, helisel hareket komutlarına ilişkin yörünge planlama işlemleri yapılmakta ve G06.2 Düzgün Olmayan Rasyonel B-Spline (NURBS) komutları ile verilen düğüm vektörü, kontrol noktaları ve ağırlık vektörleri üzerinden NURBS eğrisel yörüngeleri oluşturulmaktadır. Ayrıca NURBS komutları bulunmayan NC dosyalar için, G05.1 komutuna ilişkin kenar yönetim algoritması uygulanarak kartezyen uzayda G01 nokta bulutu analizi yapılmaktadır. Kenar yönetimi kısıtlarına giren G01 komutlarından oluşan nokta bulutlarının daha hassas yörüngelere dönüştürülmesinde kullanılmak üzere NURBS eğri uydurma fonksiyonlarının çıkartılmaktadır. Tüm yörünge için yüksek hassasiyet ve yüksek hızda işlenmesi için özel kritik nokta analizi yapılmakta ve kritik noktalarda veya komut geçiş noktalarında olması gereken hız değerleri tespit edilmektedir. Çalışma kapsamında önerilen yöntemlerle, belirlenen hız değerlerine uygun, sabit jerkli ve jerk/ivme sınırlandırılmalı hız profilleri üretilerek yüksek performansta titreşimsiz üretim işlemi gerçekleştirilmektedir.

Geliştirilen kontrol ünitesi farklı eksen konfigürasyonlarına sahip iki endüstriyel CNC-Freze tezgâhı üzerinde uygulanarak çalışmanın endüstriyel yeterliliği test edilmiştir. Yapılan ürün işleme uygulamalarında NC dosyalarının hatasız bir şekilde tezgâh yörüngelerine dönüştürüldüğü ve EtherCat protokolü üzerinden eksen motorlarına veri kaybı olmadan ulaştırıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm uygulamalarda CNC-Freze tezgâhlarının hedeflendiği gibi titreşimsiz çalışması ve ürün çıktılarında yapılan ölçümlerde hataların mikron seviyelerde olması geliştirilen kontrol ünitesinin matematik ve yazılım alt yapısının güçlü ve kapsamlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: CNC Tezgâhı Kontrol Ünitesi, Eğri Uydurma, Jerk ve İvme Sınırlandırılmalı Hız Profili, NURBS, Yörünge Planlama.

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF JERK / ACCELERATION LIMITED TRAJECTORY PLANNING ALGORITHM FOR MACHINE TOOLS

ABSTRACT

In this thesis, a Computer Numerical Control (CNC) software is developed on the basis of jerk and acceleration limited trajectory planning algorithms for machine tools that are handling metal, wood, or other rigid materials by cutting, milling, turning, or other forms of deformations. Since CNC machine tools work with Numerical Control (NC) files including G and M codes created according to ISO standards, the structure of the study is built on G and M codes. The PC-Based software of the control unit is developed in a Visual Studio environment with C# language. In the developed software, the trajectory planning process related to linear, circular, and helical motion commands of CNC-Milling Machines is achieved with the proposed methods, and Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) trajectories can be created using node vector, control points, and weight vectors given by G06.2 NURBS command. In the case of NC files that do not support G06.2 command, G01 point cloud analysis in cartesian space is applied by the edge management algorithm related to the G05.1 command. After that NURBS curve-fitting procedure is implemented to the point clouds of G01 commands in the edge management criteria to produce a smoother trajectory. In order to provide high-precision and high-speed machine operations, required velocity values at critical points or command transition points are determined, and a high-performance and vibration-free production process is provided by a constant jerk and jerk/acceleration limited velocity profiles based on the proposed algorithms.

The industrial adequacy of the CNC software developed in this study is verified by the experimental applications on two industrial CNC-Milling machines with different axis configurations. During the experimental applications, it has been observed that the NC files are converted into machine trajectories without error and transmitted to the axis motors via the EtherCat protocol without data loss. In addition, the vibration-free operation of CNC-Milling machines in all applications and the micron errors in the measurements on the product outputs show that the mathematical and software structure of the developed control unit is robust and comprehensive.

Keywords: CNC Machine Control Unit, Curve Fitting, Jerk and Acceleration Limited Velocity Profile, NURBS, Trajectory Planning.

GİRİŞ

Takım tezgâhlarının çalıştırılmasının, durdurulmasının, takım değiştirilmesinin, eksen hareketlerinin ve buna benzer tezgâhın çalışması ile ilgili tüm işlemlerin bir kontrol ünitesi tarafından yönetildiği bilgisayar destekli sayısal kontrollü takım tezgâhları (CNC tezgâhları), otomotiv, mobilya, elektronik gibi pek çok sanayi dalında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tezgâh operasyonlarının yüksek hassasiyete sahip olması, tezgâhın çalışma temposunun her zaman yüksek olması ve aynı hassasiyette parça üretimini mümkün kılması, CNC tezgâhlarının imalat sanayinde yaygın kullanılmasının başlıca sebepleri arasında sıralanabilir. Belirtilen özelliklerin bir CNC tezgâhında bulunması tezgâhın kinematik ve dinamik yapılarının hedeflenen hareket kabiliyeti için yeterli olmasını ve kontrol ünitesinin yüksek performans göstermesini gerektirmektedir. Bu kapsamda bir CNC tezgâhı, tezgâhın mekanik yapısı ve kontrol ünitesi olmak üzere iki başlıkta değerlendirilebilir. CNC tezgâhlarının mekanik tasarımı ve üretimi tüm dünyada çok sayıda firma tarafından yüksek miktarlarda gerçekleştirirken, CNC kontrol üniteleri uluslararası etkinliği olan sınırlı sayıda firma tarafından üretilmektedir. Bu nedenle hem endüstriyel hem de akademik yenilikçi ve özgün çalışmalar, daha çok CNC kontrol üniteleri üzerinde yoğunlaşmıştır.

CNC tezgâhları kullanım özelliklerine göre CNC-Freze, CNC-Torna, CNC-Taşlama, CNC-Kalıp İşleme vb. gruplara ayrılmaktadır. Tez çalışması kapsamında öncelik verilen alan pek çok sanayi alanında yaygın olarak kullanılan CNC-Freze tezgâhları olmuştur. Fakat geliştirilen kontrol ünitesinin diğer CNC tezgâhlarına da uygulanabilmesi, tezgâh yapılarına uygun temel değişikliklerin kontrol ünitesine tanımlanması ile mümkün olacaktır. Tezgâhların eksen sayıları ve eksenler arası senkronizasyon farklılıkları kontrol ünitesi tarafında değişikliğe ihtiyaç olan yerler olarak ifade edilebilmektedir. Bunun dışında genel kontrol alt yapısı tüm CNC tezgâhları için benzer yapıda kurulmaktadır.

Titreşimsiz, yüksek hız ve yüksek hassasiyetli tezgâh hareketlerinin sağlanması tüm endüstriyel CNC tezgâhlarının temel hedefidir. Bu üç temel hedefe ise doğru yörünge

planlaması, doğru kinematik ve dinamik analizlerin yapılması (motor kapasitelerine uygun ivme ve jerk değerlerinin tespit edilmesi), uygun hız ve ivme profillerinin belirlenmesi (optimize edilmiş hız ve ivme profili), bu profillere uygun yörünge interpolasyonunun yapılması ve bu yörüngelerin senkronize olarak eksen motorlarına gönderilmesi işlemlerinin sonucunda ulaşılmaktadır.

Bu hedefler doğrultusunda yapılan çalışmada, yüksek performans, yüksek hassasiyet ilkesi temelinde, günümüz endüstriyel haberleşme protokolleri arasında neredeyse en hızlı ve güvenli yapıya sahip EtherCat protokolünü kullanan, günümüz kontrol ünitelerinden farklı olarak Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (PLC) veya hareket kontrolörü yerine bilgisayar tabanlı kontrol (PC Based Control) alt yapısının kurulduğu, doğrusal, dairesel, helisel ve Düzgün Olmayan Rasyonel B-Spline (NURBS) eğrisel yörüngelerinin sabit jerkli hız profilleri ile titreşimsiz tezgâh hareketlerini garanti eden özgün yüzey işleme algoritmalar ile oluşturulduğu, sahadan alınan bilgiler doğrultusunda veya özel isterlere göre operatör panelinin ve kullanıcı arayüzünün değiştirilebildiği, matematik altyapısı ve yazılımı güçlü, güncel ve geleneksel makine teorisine sahip bir CNC kontrol ünitesi geliştirilmiştir. Bu yenilikçi yönlerinin yanında temelde bir CNC tezgâhından beklenen doğrusal, dairesel, helisel, spiral, eğrisel hareketleri gerçekleştiren, ISO (International Organization for Standardization) standartlarına uygun yazılan G kodlarını ve yardımcı M kodlarını tanıyan, dokunmatik ekran ve diğer kontrol donanımlarından oluşan arayüz üzerinden, makine sıfır, parça sıfır, eksen tanımlama, parametre girme gibi tezgâh ayarlarının ve program yazma-değiştirme, spindle aç-kapat gibi tezgâh operatörünün manuel kullanımına yönelik tüm işlemlerin yapma kabiliyeti olan endüstriyel uygulamalara uygun bir çalışma yapılmıştır.

Kontrol üniteleri önemli derecede modern bilimsel çalışmalarda kullanılan mekanik, elektronik ve yazılımsal alt yapı gerektirmektedir. Güncel bilimsel çalışmaların yakından takip edilmesi, yeni geliştirilen yöntem ve teknolojilerin doğrudan uygulanabilmelerine imkân veren bir tez çalışması olması amaçlanmıştır. Böylelikle hem akademik anlamda güncel literatürün takip edilmesi ve literatüre katkı sağlayacak çözümler üretilebilmesi, hem de ülkemizde hizmet veren firmalara katkı sağlayarak CNC ithalatını azaltacak yerli üretim olması yönlerinden faydalı bir çalışma olduğu

düşünölmektedir. Bu tezde yapılan çalışmalar genel olarak altı ana başlık altında incelenmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde, CNC tezgâhlarının yapısı hakkında genel bilgiler verilmiş ve CNC kontrol ünitelerine yönelik literatürde yapılan çalışmalar alt başlıklar altında incelenmiştir.

İkinci bölümde, CNC-Freze tezgâhlarında hareket komutlarına ilişkin G-kod fonksiyonları çikartılmış ve tez çalışması kapsamında geliştirilen yörünge planlama algoritmaları hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, G-kod dosyası temelinde çikarılan yörüngelerin, CNC tezgâhında titreşimsiz ve yüksek hassasiyette işlenebilmesi için geliştirilen hız planlama ve yörünge interpolasyon algoritmalarına yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, geliştirilen operatör paneli, operatör panel arayüzü ve CNC kontrol ünitesi yazılımı hakkında detaylı anlatım yapılmıştır.

Beşinci bölümde, deney setlerinde ve endüstriyel CNC-Freze tezgâhlarında yapılan deneysel çalışmalara ilişkin sonuçlar verilmiştir.

Altıncı bölümde ise bu tez çalışması kapsamında elde edilen tüm sonuçlar özet şeklinde anlatılarak genel bir sonuç elde edilmiştir. Ayrıca ilerde yapılabilecek iyileştirmeler ve bu konu ile ilgili yapılabilecek çalışmalar hakkında fikirler sunulmuştur.

1. GENEL BİLGİLER

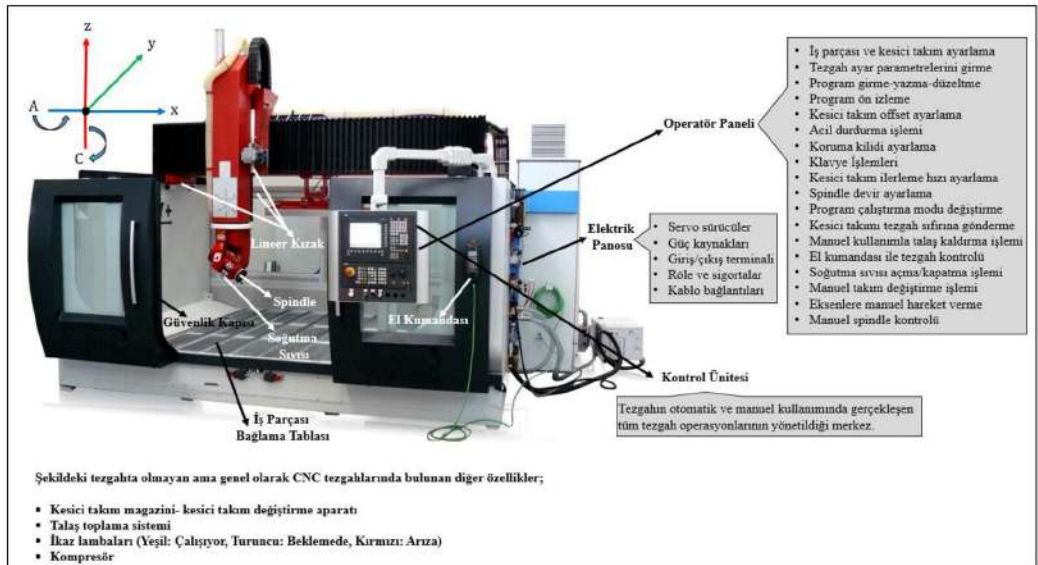
Kesici takımların, bir bilgisayar aracılığıyla otomatik olarak kontrol edilerek şekil verilecek iş parçasının üzerinde operasyonda bulunduğu talaşlı imalat işlemi, II. Dünya savaşının sonlarında ABD hava kuvvetlerinin ihtiyacı olan karmaşık uçak parçalarının üretimi için ortaya çıkmış ve Nümerik Kontrol (NC) ismini almıştır. Bu alanda kullanılan makineler de NC tezgâhlar olarak sınıflandırmıştır. 1952 yılında ilk olarak bir CINCINNATTI-HYDROTEL freze tezgâhını Nümerik Kontrol ile teçhiz ederek bu alandaki ilk başarılı çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonrasında NC makinelerin kullanımı yaygınlaşmaya başlayarak torna, freze, matkap, taşlama vb. takım tezgâhlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bütün NC takım tezgâhlarının kendilerine özgü kapasite, operasyon yetenekleri ve bir takım karakteristik özellikleri vardır. NC takım tezgâhlarında hafıza bulunmadığından bu tür tezgâhlarda blok verileri sıra ile okunarak işleme konulmaktaydı. Bu nedenle bir iş parçasının imalatı esnasında tezgâhın kontrol ünitesi (Machine Control Unit) bir bloktaki bütün verileri okuyarak tezgâhta gereken işlem operasyonları yerine getirilmekte ve operasyonlar tamamlandıktan sonra bir sonraki adıma geçilmekteydi. Bu işlem sırasıyla program sonuna kadar devam ettiği için uzun bir üretim süreci ortaya çıkmaktaydı.

Elektronik gelişmeler sonrasında NC makinelerin yerini daha kapsamlı üretime imkân veren CNC tezgâhları almaya başlamıştır. CNC tezgâhlarında temel düşüncenin takım tezgâhlarının sayı, harf vb. sembollerden meydana gelen ve belirli bir mantığa göre kodlanmış komutlar yardımıyla işletilmesi ve tezgâh kontrol ünitesi tarafından yönlendirilmesi olarak ifade edilebilmektedir. CNC kontrol ünitesi programların muhafaza edilebilmelerinin yanında parça üretiminin her aşamasında programı durdurma, programda gerekli olabilecek değişiklikleri yapabilme, programa kalınan yerden tekrar devam edebilmesini sağlamaktadır. CNC kontrol ünitesinde bilgisayar kullanımı sonucu diğer pek çok bilgisayar ve sistemleriyle iletişim kurabilme avantajına sahiptir. Ayrıca parça imalatına geçilmeden önce görüntü ünitesi yardımıyla grafik olarak ürün program çıktısı

görülebilmekte ve kesici aletlerin değiştirilmeleri her hangi bir manuel müdahale olmaksızın yapılabilmektedir. “CNC” kavramı bir tezgâhın üretim işlemlerinin bir kontrol birimi tarafından otomatik yapıldığını ifade etmektedir. Bu nedenle Şekil 1.1’de görüldüğü gibi tezgâh türüne göre CNC-Freze, CNC-Torna, CNC-Kalıp İşleme, CNC-Lazer vb. gruplara ayrılmaktadır.

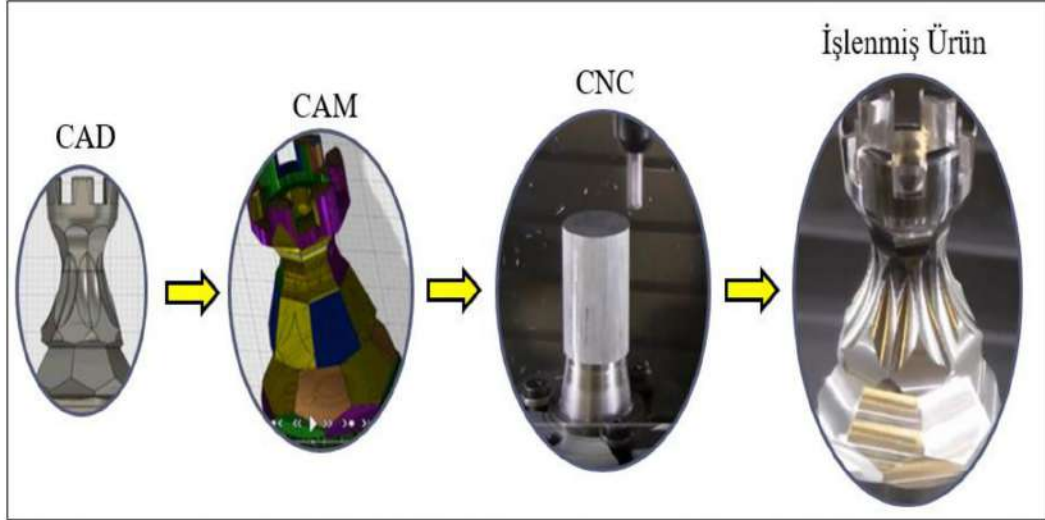


Şekil 1.1. (a) CNC-Freze (b) CNC-Torna (c) CNC- Kalıp (d) CNC-Lazer



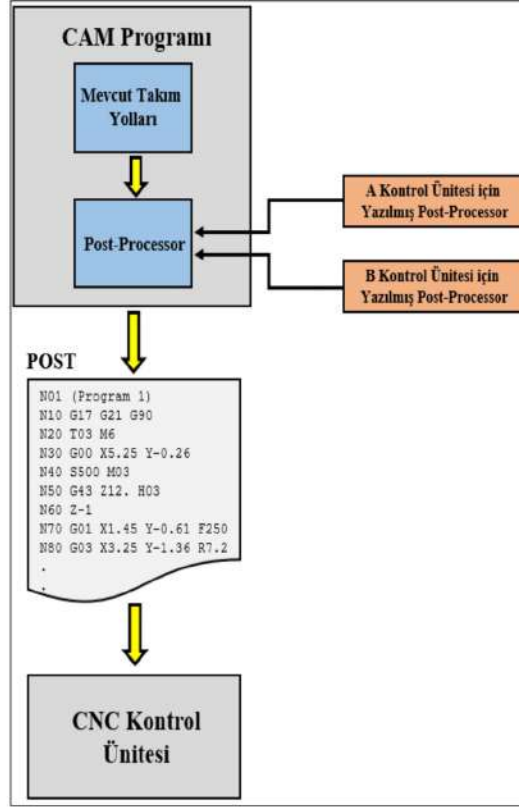
Şekil 1.2. CNC-Freze tezgâhı genel yapısı

Bu çalışmada öncelik verilen alan pek çok sanayi alanında yaygın olarak kullanılan CNC-Freze tezgâhları olduğu için, bir CNC tezgâhlarının genel yapısı, Şekil 1.2’de yer alan 5 eksen CNC-Freze tezgâhı üzerinde gösterilmiştir. CNC tezgâhları farklı gruplara ayrılrsa da temel kontrol yapıları benzerlik göstermektedir. Bir CNC tezgâhının kontrolü, ISO standartlarına uygun yazılan G kodları ve yardımcı M kodları temelinde gerçekleşmektedir. G-Kodları CNC tezgâhlarının temel hareket planlamasına ilişkin noktasal bilgileri içermektedir. G Kodları, genellikle Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ortamında tasarlanan bir ürünün CAM (Computer Aided Manufacturing) programlarında sanal işleme sonucunda text dosyası olarak alınan, CNC tezgâhlarının çalışma davranışlarını içeren bir programlama dilidir. M-Kod olarak tanımlanan yardımcı CNC kodları ile birlikte CNC tezgâhının kontrol ünitesine yüklenmektedir. Yüklenen bu dosya tezgâhın tüm üretim/işleme sürecini yönetmektedir. CAD programında tasarlanan bir ürüne ait ürün işleme adımları Şekil 1.3’te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. CNC tezgâhında ürün işleme adımları

G Kodlarının belli standartlara göre yazılması o kodların her CNC tezgâhında doğrudan uyarlanacağı anlamına gelmemektedir. Bu durumun nedenleri arasında her tezgâhın kendine özgü eksen takımının olması, komut isterlerinin kontrol ünite markalarına göre farklılık gösterebilmesi veya otomatik kesici takım değiştirme gibi yardımcı özelliklerinin olması gösterilebilir. Bu farklılıkların önüne geçmek için ise Şekil 1.4’te görüldüğü gibi Post-İşleyici (Post-Processor) yöntemi geliştirilmiştir. G kodu ile yazılmış bir program dosyası Post olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1.4. Post-Processor yapısı

Post-İşleyici bir G-Kod dosyasının CNC kontrol ünitesinin anlayacağı formata çevirme görevini üstlenmektedir. Örneğin, G-Kod standartlarına göre dairesel hareketlerin tanımlanmasında iki yöntem kullanılır. Tezgâh kontrol ünitesinin isteği doğrultusunda dairesel hareketler ya yarıçap (R) bilgisi ile ya da yarıçap merkez bilgileri (I, J, K) ile belirtilir. Bu seçim işlemi düzenleyen birim Post- İşleyicidir. Be nedenle G-kod dosyası oluşturulmadan önce CAM programlarında ya da harici post- işleyici programlarında CNC tezgâh konfigürasyonuna ve kontrol ünitesi özelliğine uygun post işleme yapılması gereklidir. Her kontrol ünitesinin G-kod işleme kapasitesi farklı olsa da endüstriyel CNC-Freze tezgâhlarında yaygın olarak kullanılan G ve M kodları Tablo 1.1 ve 1.2’de verilmiştir. Temelde G-kodları, hareket komutları, düzlem seçim komutları, hazır çevrim komutları, ilerleme seçim komutları ve kesici takım boy-çap telafi komutları olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflar arasında tezgâhın doğrudan çalışma performansına etki eden en önemli G-kodları ise hareket komutlarıdır. Bu hareket komutlarının analiz ve interpolasyon becerisi, tezgâhın doğru üretim yapmasına, titreşimsiz çalışmasına, ürün işleme hızına, enerji tüketimine, tekrarlanabilir çalışmasına ve kesici takımın ve iş milinin çalışma ömrüne doğrudan

etki etmektedir. Bu nedenle bir CNC tezgâhının yüksek performansta çalışabilmesi kontrol ünitesinin yazılım kalitesine bağlıdır.

Tablo 1.1. CNC-Freze tezgâhı G-kodları

G-KOD	AÇIKLAMA	G-KOD	AÇIKLAMA
G0	Boşta Hızlı İlerleme	G67	Kullanıcı Programı Çağırma İptali
G1	Doğrusal Kesme Hızıyla İlerleme	G73	Derin Delik Delme Çevrimi - Gagalayarak
G2	Saat Yönünde Dairesel Hareket	G74	Ters Diş Çekme Çevrimi
G3	Saat Yönünün Tersinde Dairesel Hareket	G76	Delikte Çap İşleme (Bütütme) Çevrimi
G4	Bekleme Zamanı	G80	Çevrim İptali
G10	Programlanabilir Bilgi Girişi Ve Değiştirme	G81	Punta Açma Ve Delik Delme Çevrimi
G17	X-Y Çalışma Yüzeyi Seçimi	G82	Delik Delme Çevrimi
G18	X-Z Çalışma Yüzeyi Seçimi	G83	Derin Delik Delme Çevrimi - Gagalayarak
G19	Y-Z Çalışma Yüzeyi Seçimi	G84	Diş Çekme Çevrimi
G20	İnç Ölçü Sistemi	G84.2	Sabit Diş Çekme Çevrimi
G21	Metrik Ölçü Sistemi	G84.3	Sabit Ters Diş Çekme Çevrimi
G28	Referans Noktasına Dönüş	G85	Çap İşleme Çevrimi
G30	2. Referans Noktasına Dönüş	G86	Çap İşleme Çevrimi
G31	Atlama Fonksiyonu	G87	Tersten Çap İşleme Çevrimi
G40	Takım Çapı (D) Kompanzasyonu İptali	G88	Çap İşleme Çevrimi
G41	Takım Çapı (D) Kompanzasyonu Sol	G89	Çap İşleme Çevrimi
G42	Takım Çapı (D) Kompanzasyonu Sağ	G90	Mutlak Ölçüm
G43	Takım Boyu Kompanzasyonu + Yönde	G91	Artımsal Ölçüm
G44	Takım Boyu Kompanzasyonu - Yönde	G92	İş Parçası Koordinatını Kaydırma
G49	Takım Boyu Kompanzasyonu İptali	G94	İlerleme Milimetre / Dakika
G52	İş Parçası Koordinatını Değiştirme Ve İptali	G95	İlerleme Milimetre / Devir
G54- G59	İş Parçası Koordinat Sistemi Tanımlama	G98	Çevrimde Başlangıç – Bitiş Emniyet Noktası
G65	Kullanıcı Programı Komutu	G99	Çevrimde Başlangıç – Bitiş Tanımlanan Nokta
G66	Kullanıcı Programı Çağırma		

Üretim anındaki hareket kontrol işlemlerinin iyi yönetilmesinin yanında, makine sıfır, parça sıfır, eksen tanımlama, parametre girme gibi tezgâh ayarlarının ve program yazma-değiştirme, spindle aç-kapat gibi tezgâh operatörünün kullanımına yönelik tüm işlemlerin yürütüleceği dokunmatik ekran ve gerekli diğer kontrol donanımlarından oluşan bir operatör paneline de ihtiyaç vardır.

Tablo 1.2. CNC-Freze tezgâhı M-kodları

M KOD	AÇIKLAMA	M KOD	AÇIKLAMA
M0	Program Durdurma	M30	Program Sonu
M1	İsteğe Bağlı Program Durdurma	M40	4. Ekseni Kapat
M2	Program Sonu	M41	4. Ekseni Aç
M3	İş Mili Saat Yönü Döndür	M45	Talaş Konveyörünü Aç
M4	İş Mili Saat Yönü Ters Döndür	M46	Talaş Konveyörünü Kapat
M5	İş Mili Stop	M61	X Eksen Karşı Ayna Görüntüsü Kapalı
M6	Otomatik Takım Değişirme	M62	Y Eksen Karşı Ayna Görüntüsü Kapalı
M7	Takım İçi Su Verme	M64	4. Eksen Karşı Ayna Görüntüsü Kapalı
M8	Soğutma Suyunu Aç	M71	X Eksen Karşı Ayna Görüntüsü Açık
M9	Soğutma Suyunu Kapat	M72	Y Eksen Karşı Ayna Görüntüsü Açık
M13	M3+M8	M74	4. Eksen Karşı Ayna Görüntüsü Açık
M14	M4+M8	M98	Alt Program Çağırma
M19	İş Mili Pozisyonlu Durdur	M99	Alt Program Sonu
M29	Kılavuz Çekme		



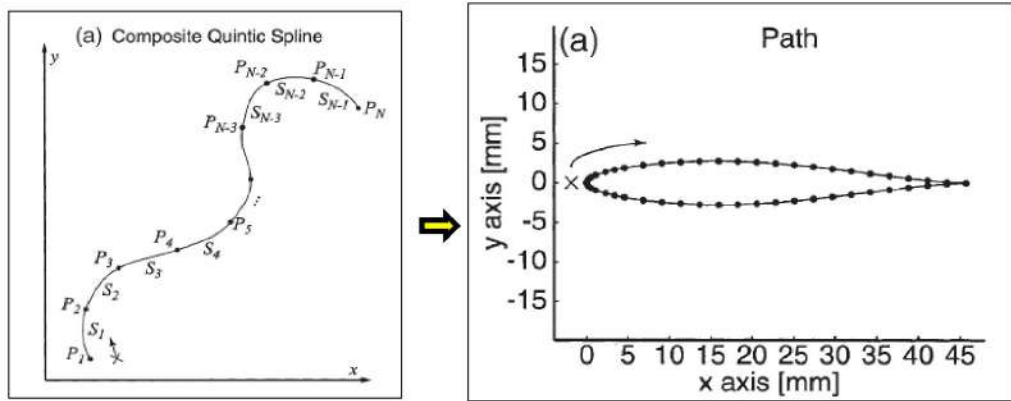
Şekil 1.5. Operatör panelleri (a) Mazak SmoothX (b) Fanuc (c) Haas (d) Siemens 828D (e) Mitsubishi M70

Operatör panel tasarımı ve panel üzerindeki arayüz yazılımının kalitesi de CNC kontrol üniteleri için önemli olan diğer önemli unsurdur. Endüstriyel kontrol ünitesi alanında hizmet veren önemli firmalar da operatör paneli tasarımına ve yazılımına çok önem vermektedirler. Çünkü operatör tarafından sıklıkla kullanılan bu panelin hem kullanıcı dostu, hem pratik hem de anlaşılır olması ürün tercihlerinde önemli rol oynamaktadır. CNC kontrol ünitesi olarak ülkemizde tercih edilen önemli firmalara ait güncel operatör panelleri Şekil 1.5'te verilmiştir. CNC tezgâhları endüstriyel üretim alanında büyük öneme sahip oldukları için, CNC tezgâhlarının performansını ve ürün işleme kabiliyetlerini artırmaya yönelik önemli akademik çalışmalar bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar eğri uydurma (curve fitting), köşe yumuşatma (corner smoothing), kesici takım ilerleme hız planlaması (feedrate scheduling) ve interpolasyon algoritmaları (interpolation methods) olmak üzere temelde dört bölümde incelenmiştir. Bunlara ek olarak farklı kinematik konfigürasyon çözümlerine ve özellikle 4 / 5 eksen CNC-Freze tezgahlarına yönelik yörünge planlama algoritmalarına ilişkin yapılan çalışmalar da literatürdeki diğer önemli ve güncel çalışmalar arasında bulunmaktadır.

1.1. CNC Tezgâhlarında Eğri Uydurma Yöntemleri

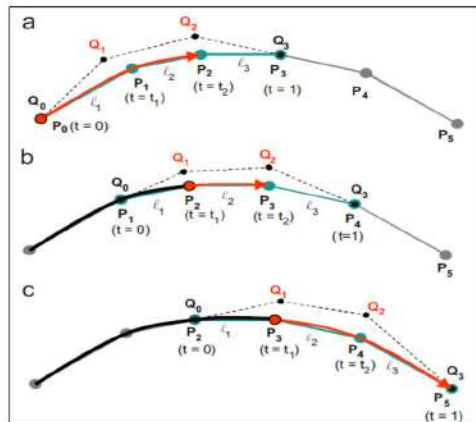
Genel anlamda bir ürün işleminde en çok karşılaşılan G-komutları G01 (doğrusal hareket) ve G02/G03 (daireysel hareket) komutlarıdır [1]. Literatürde, doğrusal hareketler temelinde titreşimsiz tezgâh hareketleri ile pürüzsüz ürün işlenmesine yönelik çok sayıda güncel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların ortak hedefi ise CNC tezgâhlarını maksimum hız ve maksimum hassasiyet ile kontrol etmektir. Hız ve hassasiyet kavramları birbirine göre ters orantılı oldukları için bu iki durum arasında optimum değerlerin elde edilmesine yönelik yeni yöntemler geliştirilmektedir. Fakat doğrusal hareketler kadar önemli olan bir diğer hareket tipi ise daireysel hareketlerdir. Çünkü neredeyse tüm ürün çıktılarının hatlarında bir yumuşaklık vardır. Bu yumuşak geçişler ise çoğu zaman daireysel hareketlerle sağlanır. CAM programlarında daireysel hareket seçeneği kapatılarak daireysel hareketler G01 komutları ile mikro boylardaki doğrusal hareketler üzerinden tezgâhta işlenebilmektedir. Bu yöntemde tezgâhın tüm üretim sürecinde G01 komutları kullanıldığı için kontrol kolaylığı ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle akademik çalışmalarda sıklıkla tercih edilen bir yöntem olmuştur. Mikro boylardaki doğrusal hareketler, yapılan çalışmalarda nokta bulutu olarak kullanılmakta

ve bu nokta bulutları özel eğri uydurma (curve fitting) yöntemleri ile hassas yörüngelere dönüştürülerek CNC tezgâhının üretim süreci kontrol edilmektedir [2-3]. Erkokmaz ve Altintas [4] G-kod dosyasında verilen G01 noktalarını kompozit quintic-spline eğri uydurma yöntemi ile hassas yörüngelere dönüştürerek CNC tezgâhı üzerindeki eksen motorlarının hız, ivme ve jerk kapasitelerini aşmayan kontrol işlemi yapmışlardır. Şekil 1.6-a'da yer alan kompozit quintic-spline eğri uydurma yöntemi ile Şekil 1.6-b'de görülen nokta bulutları hassas bir yörüngeye dönüştürülerek tezgâh üzerinde işlenmiştir.



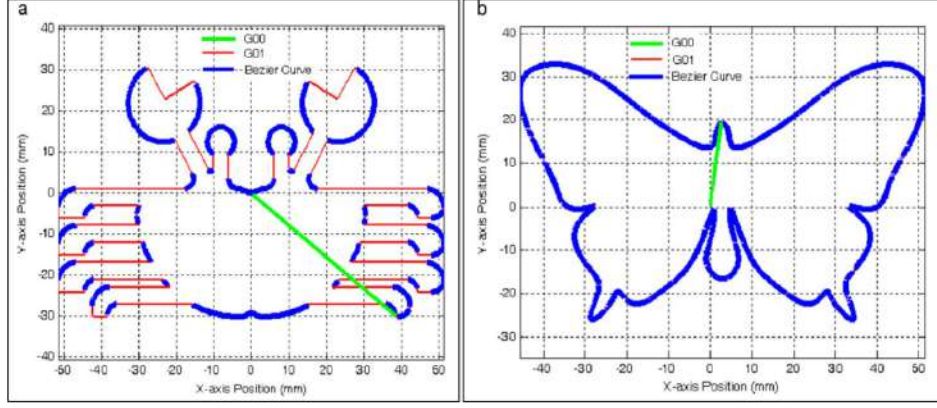
Şekil 1.6. (a) Quintic spline fonksiyonu ile eğri uydurma yöntemi (b) quintic-spline eğrisi [4]

Yau ve Wang [5] Bezier eğrisi fonksiyonlarını kullanarak iki boyutlu uzaydaki (X-Y) nokta bulutlarını hassas yörüngelere dönüştürmüştür. Bezier eğrileri Şekil 1.7'de görülen kontrol noktalarını (Q_0, Q_1, Q_2) kullanarak istenilen veri noktalarından (P_0, P_1, P_2) geçen eğrilerin oluşturulması için kullanılmıştır.



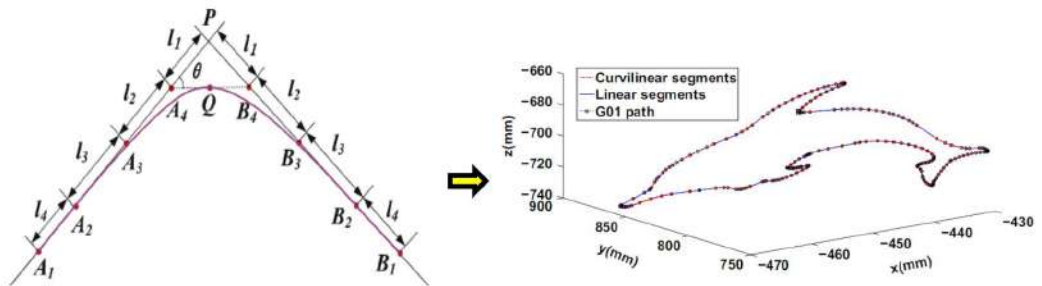
Şekil 1.7. Bezier fonksiyonu ile eğri uydurma [5]

Yapılan çalışmada kelebek ve yengeç yörüngeleri Bezier eğrileri ile Şekil 1.8’de görüldüğü gibi elde edilmiş ve küçük çevrim ve yörünge hatasıyla CNC tezgâhı tarafından işlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 1.8. Yengeç ve kelebek formlarının Bezier eğrisi ile çıkarılması [5]

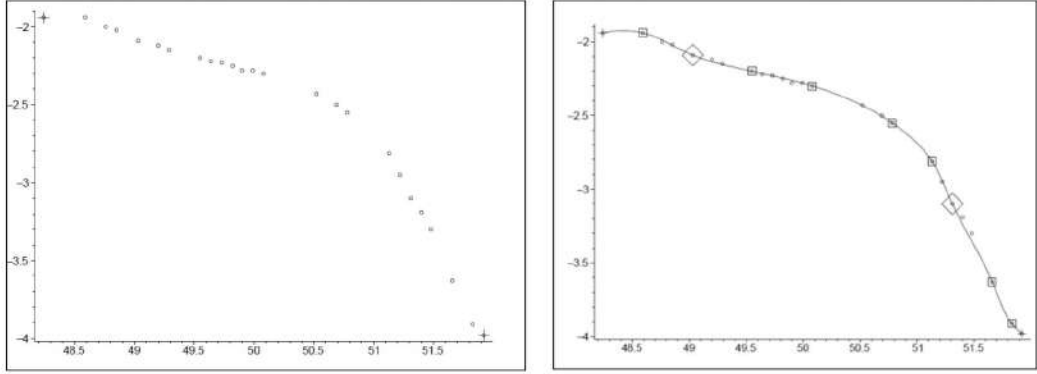
Bezier fonksiyonları kullanılan bir diğer çalışmada ise Fan ve diğerleri [6] G01 komutlarından oluşan nokta bulutlarını kabul edilebilir kontur hatasıyla dörtlü Bezier segmentlerinden oluşan G3 interpolatif takım yollarına dönüştüren gerçek zamanlı takım yolu yumuşatma algoritması önermişler ve CNC tezgâhı üzerinde başarılı hassas yüzey işleme uygulamaları gerçekleştirmişlerdir. Kartezyen uzaydaki (X-Y-Z) G01 nokta bulutlarını önerdikleri dörtlü Bezier segment yöntemi ile nasıl hassas yörüngeye dönüştürdükleri Şekil 1.9’da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Dörtlü Bezier segmentlerinin G3 interpolatif takım yollarına dönüştürülmesi [6]

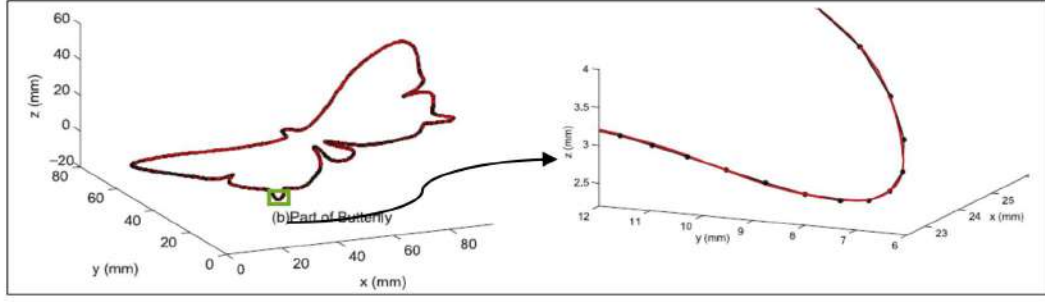
Akılan ve Jingyan [7] daha yüksek seviyeli dinamik durumlara sahip problemler için optimal bir minimum zaman yörüngesi sağlayabilen sezgisel bir yörünge planlama algoritması önermişlerdir. Çalışmalarında, yörüngeyi takım yolu boyunca nokta nokta optimize etmek yerine, yüksek sıralı sürekliliğe sahip parçalı eğri interpolasyonu ile

konum-hız faz düzlemindeki bir dizi düğüm noktalarını kullanarak oluşturmuşlardır. Literatürdeki en gelişmiş eğri uydurma yöntemlerinden olan B-Spline ve NURBS eğrileri üzerine de önemli çalışmalar yapılmıştır. Mei ve diğerleri [8] kuadratik B-spline eğrisini kullanarak eğrinin istenilen noktalardan geçmesi için B-spline eğrisi üzerinde eğri uydurma algoritması geliştirerek CNC üzerinde uygulamışlardır. Bu çalışmanın önemli katkılarından birisi de nokta bulutlarının tam üzerinden geçen bir yörünge yerine, sınırlı kontur hatası ile nokta bulutunu takip eden bir yörünge kullanılması olmuştur. Şekil 1.10-a'da yer alan nokta bulutu, Şekil 1.10-b'de görüldüğü gibi verilen noktaların tam üzerinden geçmeyen B-spline eğrisine dönüştürülmüştür.



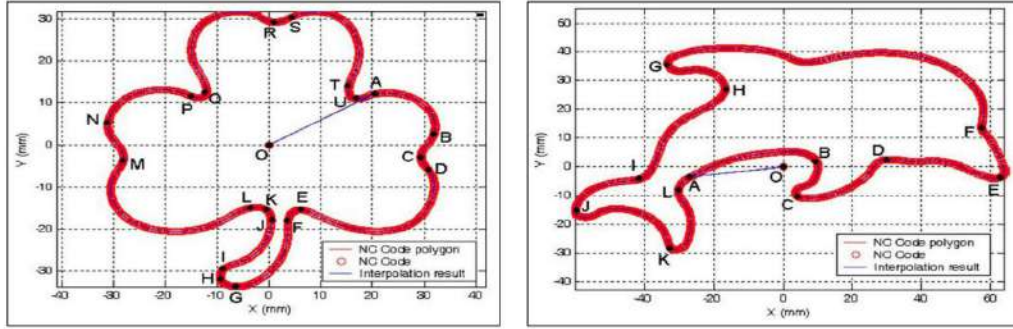
Şekil 1.10. (a) Nokta bulutu (b) Kuadratik B-spline fonksiyonu ile eğri uydurma işlemi [8]

Sneha T. ve Yusuf A. [9] çoklu doğrusal parçaları beşinci dereceden B-spline (quintic B-spline) eğrilerine dönüştürerek kartezyen uzayda belirlenen tolerans limitinde kontur hatası ile C3 sürekliliğinde yörüngeler elde etmişler ve gerçek zamanlı kontrol uygulaması ile çalışmalarını test etmişlerdir. Lin ve diğerleri [10] CNC tezgâhlarında titreşimsiz ve hassas ürün işleme yapmak için bir doğru parçası ile bir eğri parçası arasındaki Hausdorff mesafesini kullanarak G01 çoklu doğrusal parçalar için bir kübik B-spline temelli bir eğri uydurma algoritması geliştirmişler ve geleneksel iki aşamalı model yerine, hata kısıtlamaları ve dinamik kısıtlamalara sahip birleşik bir yörünge planlama modeli önermişlerdir. Önerdikleri yöntemin doğrulanmasında Şekil 1.11'de yer alan kelebek figürünü kullanarak hassas yörünge planlaması yaptıklarını ispat etmişlerdir.

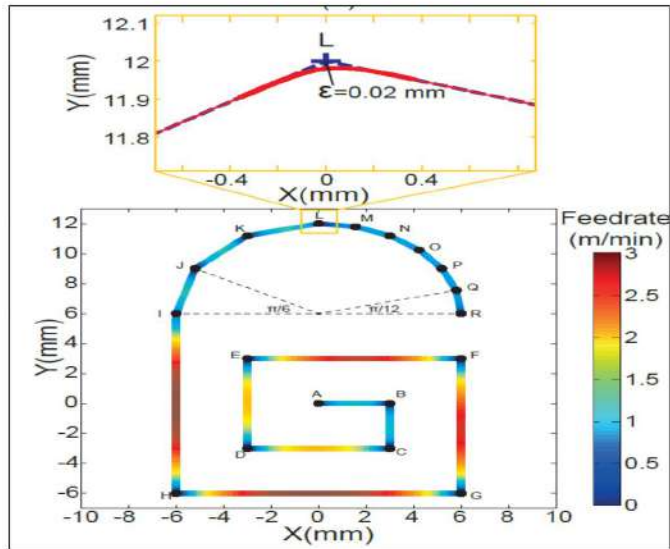


Şekil 1.11. Kelebek figürünün beşinci dereceden B-spline eğrisine dönüştürülmesi [10]

Yau ve Wang [11] diğer bir çalışmalarında CAM programından aldıkları G-kod dosyasındaki nokta bulutlarını, X-Y uzayında NURBS eğrilerine dönüştürerek CNC tezgâhı üzerinde Şekil 1.12’de yer alan nokta bulutlarını kullanarak gerçek zamanlı hassas ürün işleme yapmışlardır.



Şekil 1. 12. Nokta bulutlarının NURBS eğrilerine dönüştürülmesi [11]

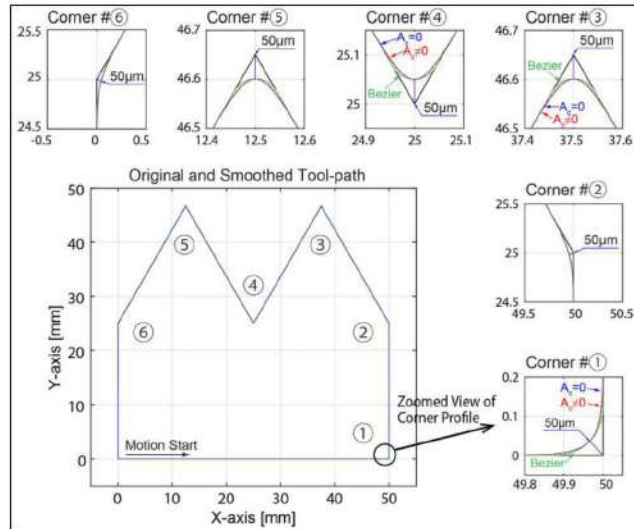


Şekil 1.13. Nokta bulutlarının kontur hatası sınırlaması altında NURBS eğrisine dönüştürülmesi [12]

NURBS eğri uydurma yöntemlerine ilişkin bir diğer çalışmada, Beudaert ve diğerleri [12] CAM programında dairesel hareket seçeneğini kapatarak dairesel ve doğrusal hareketleri mikro boylardaki G01 komutları ile tanımlamışlar ve bu G01 noktalarını kullanarak sınırlı kontur hatası (ϵ) ile Şekil 1.13'te görüldüğü gibi hassas NURBS eğrisel yörüngelere dönüştürmüşlerdir.

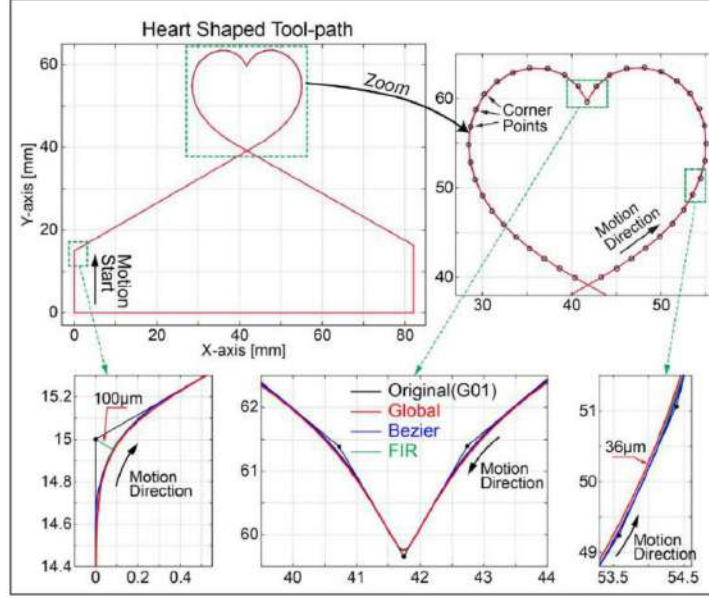
1.2. CNC Tezgâhlarında Köşe Yumuşatma Yöntemleri

Eğri uydurma yöntemi kadar önemli olan bir diğer çalışma alanı ise CNC tezgâhlarında işlenecek yörüngelere köşe yumuşatma yöntemlerinin uygulanması olmuştur. Bu alandaki çalışmalarda, CNC tezgâhlarının her G komut satırı arasında dur/kalk yapmasını önlemek için yörüngelerde keskin geçişler yumuşak geçişlere dönüştürülerek tezgâh hareketlerinde süreklilik sağlanmaya çalışılmıştır. Yan ve diğerleri [13] yaptıkları çalışmada beş eksenli doğrusal segmentlerin köşelerini düzeltmek ve G2 sürekliliği ile pürüzsüz takım yolunu oluşturmak için çift kübik NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) eğrisi temelli yörünge planlama algoritması geliştirmişlerdir. Tajima ve Sencer [14] dur/kalk yapmadan yüksek hızda tezgâh operasyonları gerçekleştirmek için köşe yumuşatma algoritması önermişlerdir. Çalışmalarında Şekil 1.14'te yer alan yörünge üzerinden köşe noktalarındaki sert geçişlerin nasıl yumuşak geçişlere dönüştürüldüğünü göstermişlerdir.



Şekil 1.14. Köşe yumuşatması ile sert geçişlerin düzenlenmesi [14]

Tajima ve Sencer aynı alandaki diğer bir çalışmada [15] G01 noktalarından oluşan ana yörünge üzerinde hem global yörünge yumuşatma işlemi hem de köşe yumuşatma işlemi yapan algoritma önermişler ve gerçek zamanlı deneysel sonuçları Şekil 1.15'te yer aldığı gibi Sonlu Dürtü Yanıtı (FIR) ve Bezier eğri uydurma yöntemleri ile karşılaştırmışlar ve bu yöntemlere göre başarılı sonuçlar almışlardır.



Şekil 1.15. Global yörünge ve köşe yumuşatma işlem sonuçları [15]

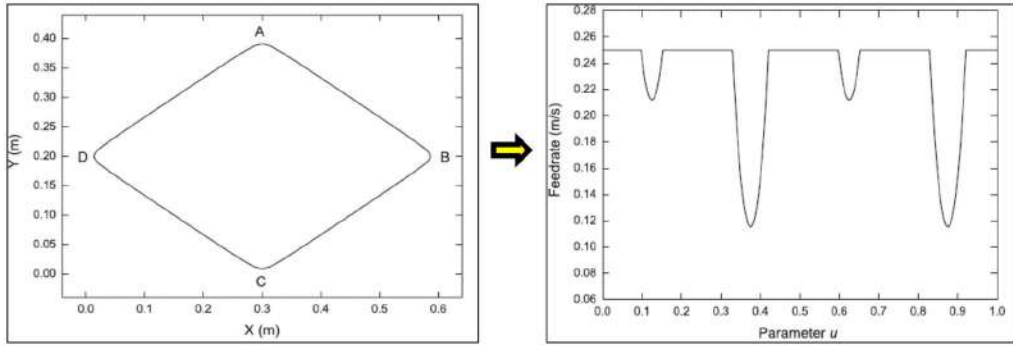
Han ve diğerleri [16] G01 komut geçişlerinde tezgâh operasyonlarında C^2 sürekliliğini sağlamak için bölgesel köşe yumuşatma yöntemi geliştirerek endüstriyel CNC tezgâhlarının kontrolüne katkı sağlayacak bir çalışma yapmışlardır. Literatürde bu alandaki çalışmalardan farklı olarak Zhang ve diğerleri [17] tezgâh kinematik sınırlandırması altında tezgâhın dinamik davranışlarını da dikkate alarak komut geçişleri arasındaki hareketleri yumuşatmaya yönelik bir çalışma yapmışlar ve CNC tezgâhlarında yörünge planlaması üzerine önemli bir katkı sağlamışlardır. Ayrıca tezgâh kinematik yapısının ön planda olduğu diğer bir çalışmada, Tajima ve Sencer [18] yüksek hızlı CNC takım tezgâhları için yeni bir kinematik köşe düzeltme tekniği sunmuşlar ve kısa G01 hareketlerinden ödün verilen referans takım yollarını yaylar ve eğriler aracılığıyla geometrik olarak daha hassas ve sürekli yörüngelere dönüştürmüşlerdir. Bu alandaki güncel çalışmalardan birisini de Huang ve diğerleri [19] yapmışlardır. Çalışmalarında geometrik eğrinin ve besleme hızı profilinin integral

planlamasını gerçekleştirmek için bir çift kama şeklindeki yivlere dayanan geometrik ve kinematik kısıtlamalar altında çoklu doğrusal parçalar için yeni bir yumuşatma yöntemi geliştirmişlerdir. Ayrıca literatürde [19] çalışmasıyla aynı amaca sahip ama farklı yöntemler önerilen önemli çalışmalar da bulunmaktadır [20–28].

1.3. CNC Tezgâhlarında Kesici Takım İlerleme Hız Planlaması

CNC tezgâhı üzerinde işlenecek bir ürün için çoğu zaman binlerce satır G-kod dosyasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu G-kod dosyasına bağlı çıkarılan yörünge planlamasında eğri uydurma, köşe yumuşatma ya da klasik doğrusal, dairesel veya helisel yörünge planlama algoritmalarından hangisi kullanılırsa kullanılсын mutlaka kesici takım için hız planlaması yapılması gereklidir. Bir CNC tezgâhının tüm operasyon boyunca sabit hızda çalışması hem kesici takımın hem de eksen motorlarının uzun ömürlü olması açısından çok önemlidir. Fakat neredeyse hiçbir uygulamada bir CNC tezgâhı tüm operasyon boyunca sabit hızda çalışmamaktadır. Çünkü tüm yörüngenin sabit hızda işlenmesi üç boyutlu uzayda kesici takımın yaptığı hareketin her örnekleme zamanında aynı uzunlukta olmasını gerektirmektedir. Fakat yörüngenin her bölgesi için sabit uzunlukta değişim oluşturacak bir hareket planlaması yapmak, ürün yüzey kalitesi yönünden olumsuz sonuç vermektedir. Kontrol ünitesi eksenlere sabit örnekleme zamanında bilgi göndereceği için belirlenen sabit hız doğrudan her adımdaki hareket boyunun aynı olmasını gerektirecektir. Bu durumda sabit hızın yörüngenin hangi bölgesi göz önünde bulundurarak belirlendiği önemli hale gelmektedir. Eğer eğrinin en hassas değişimler olan bölgesi dikkate alınmış ise hız değerinin düşük olması gerekmektedir. Bu nedenle yörünge üzerinde diğer bölgeler de yavaş işlenecek ve ürün işleme süresi artacaktır. Yörüngenin normal veya az hassas olan bölgelerine göre seçilen bir hız olması durumunda ise hareket boyları uzayacak dolayısıyla eğrisel hareketlerin yoğun olduğu yerlerde veri kayıpları artmış olacaktır. Sonuç olarak kesici takımın operasyon boyunca sabit hızda kalması ya işlem süresini arttırmakta ya da hassas bölgelerde veri kaybına neden olmaktadır. Bu doğrultuda, işlenecek ürün özelinde kesici takım için hız planlaması yapılması CNC tezgâhlarında kritik öneme sahip olmuştur. Bu alanda yapılan akademik çalışmalar da CNC tezgâhlarının kontrol ve ürün işleme kalitelerinin artmasında önemli rol oynamışlardır [29–43].

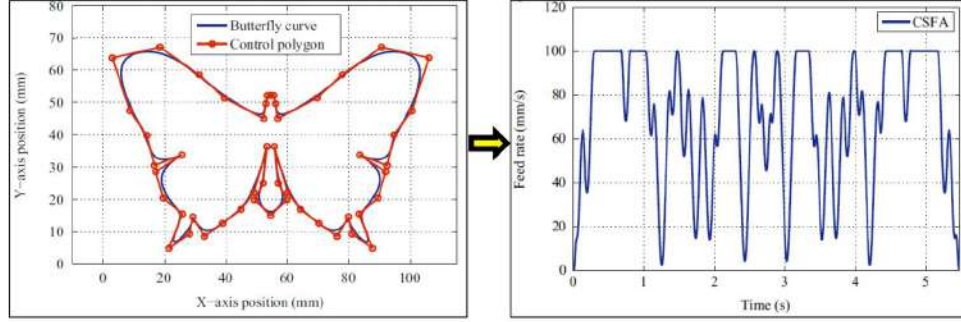
Yeh ve Hsu [44] NURBS eğrilerinin interpolasyonunda kullanılmak üzere kiriş ve kontur hata sınırlandırması altında adaptif hız planlama algoritması önermişlerdir. [44] çalışmasına benzer olarak Liu ve diğerleri [45] eğrilerdeki keskin köşeler veya ilerleme hızına duyarlı köşeler, yüksek frekanslı bileşenler veya makinenin doğal olanlarıyla eşleşen frekanslar ve yüksek sarsıntılar olmak üzere işleme dinamikleri üç bölüme ayırmışlar ve belirtilen dinamik etkenler doğrultusunda NURBS eğrisi özelinde adaptif hız planlama algoritması geliştirmişlerdir. Yine NURBS eğrileri üzerine Xu ve diğerleri [46] eksen motorlarının ivmelenme ve jerk kapasitelerini aşmayan otomatik hız ve hassasiyet optimizasyonu yapan yeni bir hız planlama yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında Şekil 1.16-a'da yer alan NURBS eğrisini kullanmışlar ve bu eğrinin yüksek hız ve yüksek hassasiyette işlenmesi için Şekil 1.16-b'deki kesici takım hız profilini elde etmişlerdir.



Şekil 1.16. (a) NURBS eğrisi (b) kesici takım hız profili [46]

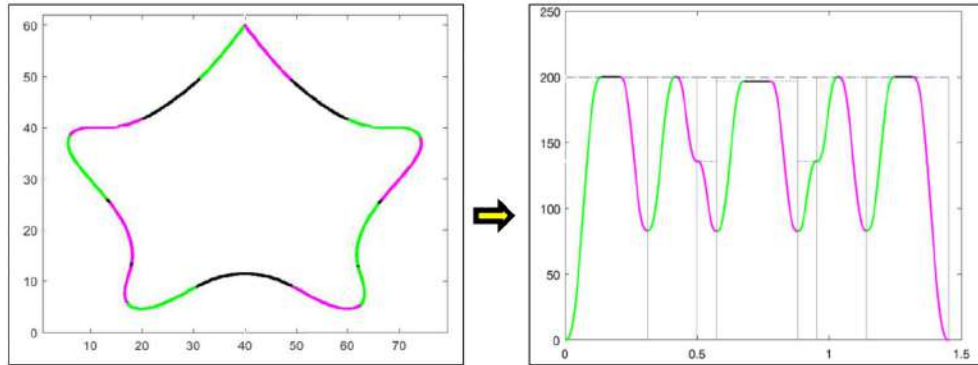
Tsai ve diğerleri [47] ise düzlemsel yüzeyde keskin köşe tespiti, jerk sınırlandırması ve kiriş ve kontur hata (chord-contour error) sınırlandırmaları altında oluşturdukları hız ve ivme profillerini kullanarak CNC tarafından işlenecek NURBS eğrilerinin interpolasyon işlemlerini yapmışlardır. Bu çalışmanın önemli noktalarından birisi kiriş hatası ile kontur hatasının ortak değerlendirme sonrasında hız profilinin çıkarılması olmuştur. Kiriş hatası yörüngenin işleme hassasiyetine ilişkin bir parametreyi ifade ederken, kontur hatası tezgâhın dinamik yapısına ve motor (eksen) kontrolüne ilişkin bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu doğrultuda çalışmada önerilen yöntemle hem yörüngenin kiriş hata limiti içinde interpolate edilmesi sağlanırken, hem de tezgâhın hedeflenen yörüngeyi belirlenen kontur hata limiti içinde işlenmesi sağlanmıştır. Bu alanda literatüre katkı sağlayacak önemli çalışmalardan birisi de Du ve diğerleri tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında [39] sınırlı jerk, ivme ve ilerleme

hızı ile tamamlanmış bir S-şekil (S-shape) ilerleme hız planlama yaklaşımı (CSFA) sunmuşlardır. CNC tezgahında işlenecek NURBS eğrisinin kritik noktalarını tespit ederek her iki kritik nokta arasında yedi farklı hız profilinden optimal hız ve hassasiyet değerleri doğrultusunda en uygun hız profilini seçmişler ve etkili sonuçlar almışlardır. Şekil 1.17-a'da yer alan kelebek figürü için CSFA yöntemi ile kesici takım için optimize edilmiş hız profilini Şekil 1.17-b'de görüldüğü gibi elde etmişlerdir.



Şekil 1.17. (a) NURBS kelebek eğrisi (b) CSFA yöntemi temelinde çıkarılan kesici takım hız profili [39]

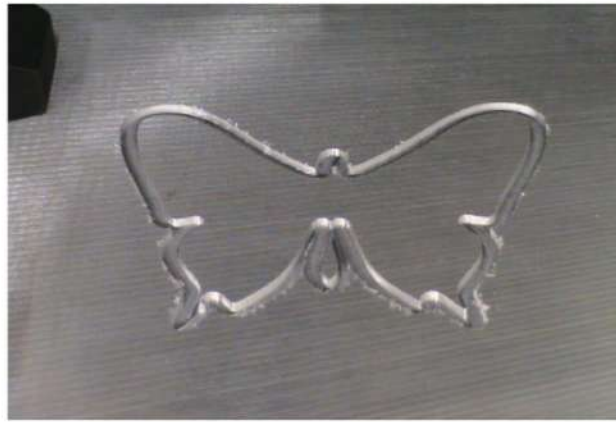
Giannelli ve diğerleri [48] ise özgün eğri uydurma yöntemi ile özgün kesici takım ilerleme hız algoritması geliştirerek önemli bir çalışma yapmışlardır. Öncelikle G-kod dosyasından alınan G01 nokta bulutları üzerinde kırılma nokta analizi yapmışlar ve kırılma noktalarının tespit edilmesinden sonra eğriler Pythagorean-hodograph eğrisiyle uydurulmuş ve bu eğriye uygun C2 sürekliliğinde beşli hız profilinden en uygun olanı seçilerek nihai kesici takım ilerleme hız profilin oluşturmuşlardır. Şekil 1.18-a'da yer alan yıldız figüründe renk değişimi ile göstermiş oldukları her kırılma noktasında hız profilinin nasıl değiştiği Şekil 1.18-b'deki nihai kesici takım hız eğrisinde görülmektedir.



Şekil 1.18. Pythagorean-hodograph yıldız eğrisi (b) C2 sürekliliğinde oluşturulan kesici takım hız profili [48]

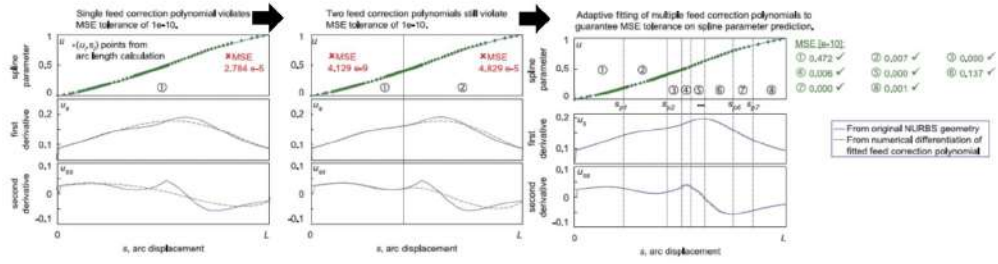
1.4. CNC Tezgâhlarında Yörünge İnterpolasyon İşlemleri

Kartezyen uzayda kesici takım yörüngesi çıkartıldıktan sonra yapılan ilerleme hız planlamasına uygun olarak CNC tezgâhında ürünü işlemek üzere eksen motorlarına eksen yörüngelerinin gönderilmesi gereklidir. Eksen motorlarına gidecek yörüngelere ise interpolasyon işlemi sonunda ulaşılmaktadır. Planlanan hız profilinin CNC tezgâhı üzerinde de hedeflendiği şekilde gerçekleşebilmesi için interpolasyon işleminin dikkatli yapılması gereklidir. Çünkü hız profilinin planlanması kesici takımın bire bir bu hız profiline uygun hareket edeceğini garanti etmemektedir. Literatürde interpolasyon işlemi için en çok tercih edilen yöntem Taylor Denklemleri olmuştur. Bu yöntemde kesici takım hız, ivme ve jerk profilleri ile işlenecek yörünge'nin her örnekleme zamanındaki birinci ve ikinci türevleri ve örnekleme zaman değeri kullanılmaktadır. Taylor serisi kartezyen uzaydaki kesici takımın izleyeceği yörünge'nin gerçekleşmesi için gerekli olan eksen motor verilerini doğrudan vermemektedir. Bu verilere ulaşmak için kullanılması gereken her örnekleme zamanındaki interpolasyon parametresini tespit etmektedir. Ayrıca Taylor Denklemleri ile interpolasyon işlemleri genel bir yapıyı oluşturmaktadır. NURBS, Bezier eğrileri, quintic/quadratic B-spline eğrileri, doğrusal/dairesel hareketler fark etmeksizin uygun altyapı ile istenilen yörüngede kullanabilmektedir. An-Chen Lee ve arkadaşları [49] NURBS eğrisinin interpolasyon işleminde ikinci dereceden Taylor Denklemlerini kullanarak NURBS interpolasyon parametresini (u) tespit etmişlerdir. Bu parametre üzerinden ise X ve Y eksen motorlarına gönderilecek yörüngeleri elde ederek X-Y uzayında Şekil 1.19'da yer alan uygulamayı yapmışlardır.



Şekil 1.19. NURBS kelebek eğrisinin CNC-Freze tezgâhı üzerinde işlenmesi [49]

Huang ve diğerleri [19] önerdikleri köşe yumuşatma algoritmasının interpolasyon işleminde ikinci dereceden Taylor Denklemlerini kullanarak X-Y-Z uzayında ürün işleme uygulamaları yapmışlardır. Taylor Denklemleri çok sayıda çalışmada tercih edilen yöntem olsa da farklı interpolasyon algoritması geliştirmek veya kullanmak mümkündür. Bu alanda, Heng ve Erkorkmaz [36] kesici takım ilerleme hızı düzeltme polinom kavramı (feed correction polynomial concept) geliştirmişler ve performans değerlendirmesini birinci dereceden Taylor Denklem sonuçları ile karşılaştırarak yapmışlardır. Ayrıca kullandıkları yörünge için, önerdikleri yöntemin birinci derecen Taylor Denklemlerine göre daha kararlı olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 1.20’de yer alan NURBS eğrisine ait yer değiştirme grafiği üzerinde interpolasyon parametresinin (u) hedeflenen hız profiline belirtilen tolerans limitleri içinde benzemesi için nasıl ara bölümlere ayrıldığı göstermiştir.

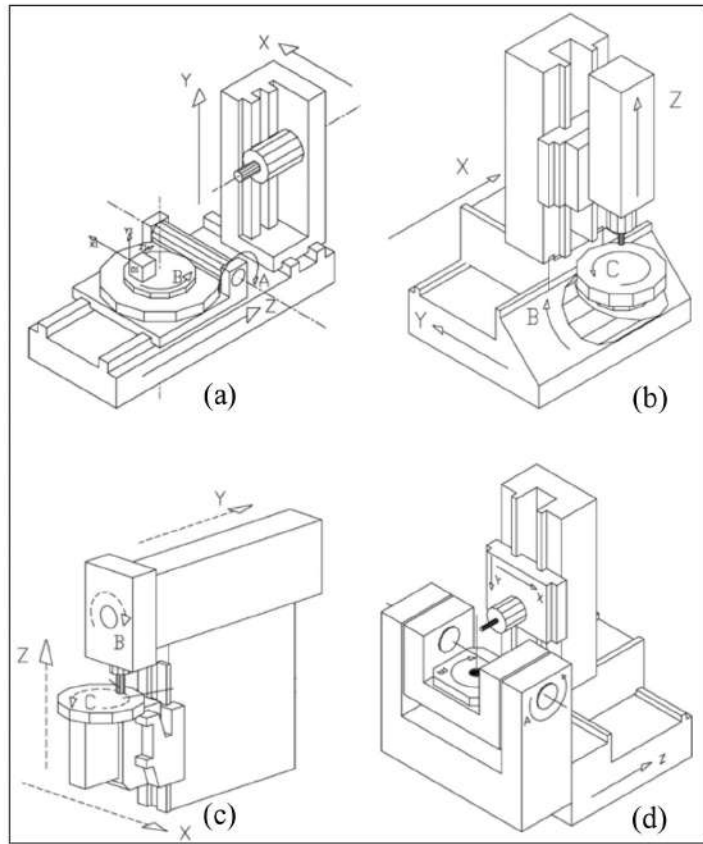


Şekil 1.20. NURBS eğrileri için kesici takım ilerleme hızı düzeltme işleminin uygulanması [36]

1.5. CNC Tezgâhlarında Kinematik Konfigürasyon

CNC tezgâhlarında eksenler kartezyen koordinat sistemine göre tanımlanmaktadır. Tabla ve kesici takım hareketlerine uygun ise eksen atamaları yapılmaktadır. Eksen sayısı ve eksen konfigürasyonu CNC tezgâhlarında kinematik dönüşüm işlemleri için önemli olan iki temel unsurdur. Endüstriyel CNC-Freze tezgâhları çoğunlukla 3-eksen, 4-eksen ve 5-eksen yapılarında kullanılmaktadır. CNC tezgâhlarının eksen sayılarının birbirlerine göre farklılık gösterebilmesinin yanında, aynı sayıda eksen takımına sahip CNC tezgâhları kullanım amacına, hareket kabiliyetlerine ve işlenen ürün yapısına göre farklı yapılandırmalara da sahip olabilmektedir [Kinematics klasöründeki yayınları ekle]. Bu durum ise her farklı CNC tezgâhı için ayrı kinematik analiz işlemi gerektirmektedir. Şekil 1.21’de 5-eksen CNC-Freze tezgâhlarının kesici takım ve tabla hareketleri temelinde oluşturulmuş farklı yapıları gösterilmiştir [50]. Bu tezgâhların sınıflandırması eksenin döner veya doğrusal (prizmatik) olmasına ve o eksendeki

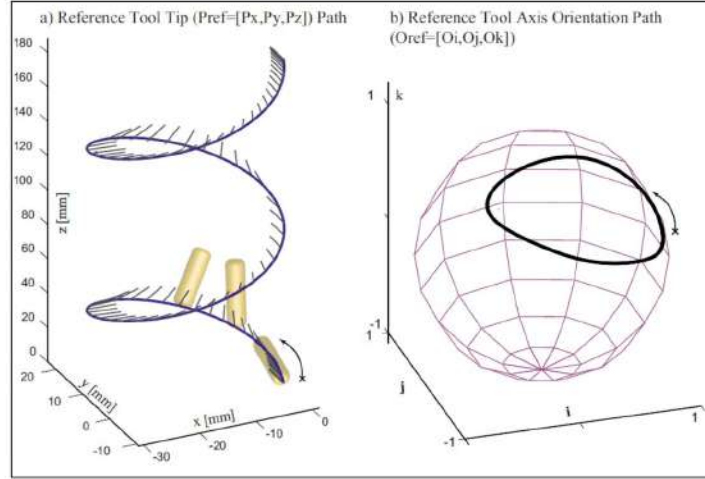
hareketin tabladan veya kesici takımdan sağlanmasına göre yapılmaktadır. Örneğin Şekil 1.21-a'da yer alan CNC-Freze modeli A'B'-ZYX olarak isimlendirilmiştir. Bu isimlendirme şu şekilde açıklanmaktadır; A'B' eksenleri iş parçasına ait döner eksenler, ZYX eksenleri ise kesici takıma ait prizmatik eksenlerdir. Aynı Şekil 1.21-c'de ZX'C'-BY model tezgâhta, prizmatik Z eksen ve döner XC eksen iş parçasının (tablanın) hareketini sağlarken, prizmatik BY eksenleri kesici takıma hareket verildiği anlamına gelmektedir.



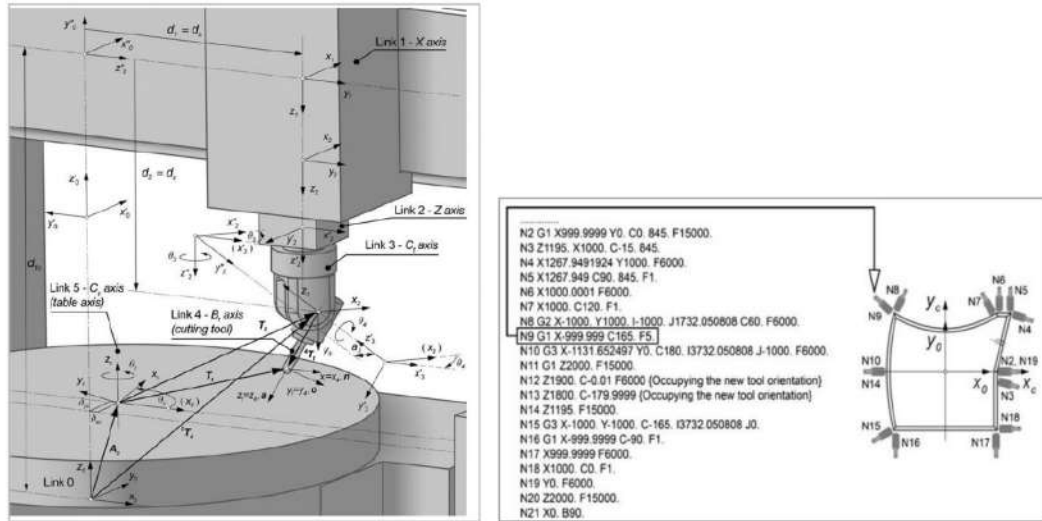
Şekil 1.21. 5-eksen CNC-Freze tezgâh konfigürasyonları (a) ZA'B'-YX (b) B'C'-ZYX (c) ZXC'-B'Y (d) A'B'-XYZ [50]

CNC tezgâhlarında kinematik yapının değişmesi yörünge planlama ve kontrol işlemlerinin o tezgâha özgün yöntemlerle yapılmasını gerektirebilmektedir. Bu doğrultuda literatürde farklı yapılarıdaki CNC-Freze tezgâhlarının kontrolüne yönelik çok sayıda önemli çalışma bulunmaktadır [51–66]. Sencer ve Altıntaş [67] 5 eksen (X-Y-Z-A-C) bir CNC-Freze tezgâhının doğrusal ve açıl eksen hareketlerinde senkronizasyon sağlayarak kontur hatasının minimize edilmesine ilişkin bir yöntem

geliştirilmiştir. Çalışmada doğrusal X-Y-Z ekseninde oluşan yörünge ile A-C döner eksenlerinde oluşan kesici takım oryantasyon yörüngesi Şekil 1.22’de yer aldığı gibi ayrı ayrı fakat birbirine senkronize oluşturularak kontur hatası minimize edilmiştir.



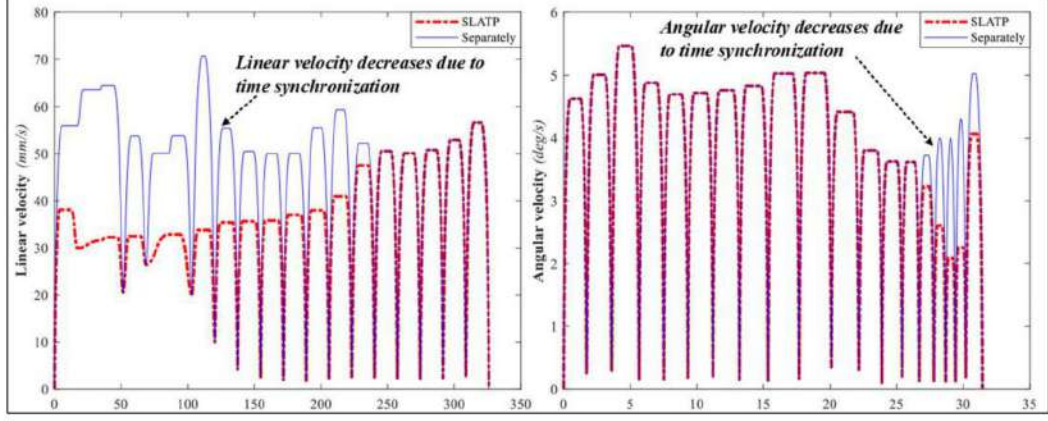
Şekil 1.22. Kesici takım kartezyen uzay yörüngesi ve oryantasyon yörüngesinin çıkarılması işlemi [67]



Şekil 1.23. (a) CNC-Freze eksen yerleşimi (b) komut satırına karşılık gelen konum ve oryantasyonun gösterimi [56]

Kvrgic ve diğerleri [56] 2 eksen (X, Z) doğrusal 3 eksen (C_t, B, C_y) döner olmak üzere Şekil 1.23-a’da görülen 5-ksen CNC-Freze tezgâhının kartezyen-eklem uzayı arasındaki ilişkiyi temsil eden ileri ve ters kinematik denklemlerini çıkartmışlar ve bu denklemleri 5-eksen G-kod dosyasındaki yer alan noktasal verilerle birlikte kullanarak tezgâhın kontrolünü sağlamışlardır. 5-eksen G-kod dosyasında yer alan her satır kodun

Şekil 1.25'te yer alan grafiklerle doğrusal hız planlamasının ve açısal hız planlamasının senkronizasyonu bozmamak için nasıl güncellendiğini göstermişlerdir.



Şekil 1.25. Senkronizasyonun sağlanması için doğrusal ve açısal hızların optimize edilmesi [68]

2. CNC-FREZE TEZGÂHI G-KOD FONKSİYONLARININ ÇIKARILMASI

CNC tezgâhında bir ürünün nasıl işleneceği CAM programları tarafından belirlenmektedir. CAM programının sahip olduğu ürün işleme algoritmasına uygun üretilen G-kod dosyası CNC kontrol ünitesinde tarafından çalıştırılmaktadır. Ürün işleme süreci ise doğrusal, dairesel, helisel ve eğrisel hareketler tarafından kontrol edilmektedir. Fakat CNC kontrol ünitesinin kabiliyetine göre bu hareket türlerinden hepsi ya da bir kaçını desteklenebilmektedir. Bu durumda CAM programı içerisinde kontrol ünitesi özelliğine göre seçim yapılarak doğru G-kod dosyasının üretilmesi önemlidir. Doğrusal hareketler G00 ve G01 komutları ile iki farklı yapıda kullanılmaktadır. G00 komutu tezgâhın boşta hareketini temsil etmektedir ve bu hareketlerde tezgâh maksimum hızda çalışmaktadır. G01 komutu ise kesici takımın ürün üzerinde talaş kaldırarak hareket etmesini ifade etmektedir. Doğrusal talaş kaldırma hareketi G-kod dosyasında verilen hız değerine uygun gerçekleşmektedir. Dairesel hareketler ise saat yönünde ve saat tersi yönünde olmak üzere G02 ve G03 komutları ile tanımlanmaktadır. Dairesel hareketler kartezyen uzayda seçili XY, XZ veya YZ düzlemlerinde yani iki boyutta gerçekleşmektedir. Fakat boşta kalan diğer eksenlerde dairesel harekete senkronize çalışan doğrusal bir hareket tanımlanabilir. Bu durumda üç boyutlu uzayda helisel bir hareket meydana gelmektedir. Eğrisel hareketler ise tezgâh üzerinde işlenen ürün yüzey kalitesine doğrudan etki eden en önemli hareket türlerinden birisidir. Bir CNC-Freze tezgahında, bir ürün genellikle kaba ve hassas (finiş) işleme olmak üzere iki adımda işlenmektedir. Kaba işlemede daha çok doğrusal ve dairesel hareketler ön planda iken, hassas işlemede ise eğrisel hareketler kullanılmaktadır. Çünkü neredeyse hiçbir ürün keskin yüzeyleri olan düzgün bir geometrik şekle sahip değildir. Net geometrik şekli olmayan bu ürünler ise hassas işlemedeki eğrisel hareketlerle hedeflenen ürün çıktısına dönüştürülmektedir. CAM programları tarafından desteklenen tek eğrisel komut ise G06.2 komutu ile kullanılan NURBS eğrisel hareketidir. G06.2 komutu ile birlikte düğüm vektörü (knot vector), kontrol noktaları (control points) ve ağırlık vektör (weight vector) parametreleri verilerek CNC tezgâhı üzerinde CAM programı tarafından belirlenen eğrisel hareketin aynısının işlenmesi sağlanır. Fakat çok sayıda CNC tezgâhı kontrol

ünitesinde G06.2 komut desteği bulunmamaktadır. Ayrıca G06.2 komut desteği kontrol ünitesinde olsa bile kullanılan CAM programında NURBS işleme özelliği olmayabilir. Bu durumlarda eğrisel hareketler G01 komutları ile mikro boylardaki doğrusal hareketlere dönüştürülür ve G05.1 Q1 komutu ile birlikte hassas ürün işleme özelliği açılır. Bu komut G-kod dosyası içinde eğrisel veya dairesel hareketlerin mikro boylardaki doğrusal hareketlerle ifade edildiğini ve bu noktaların bir eğri uydurma yöntemi ile hassas yörüngelere dönüştürülebileceğini söylemektedir. G06.2 komutunda olduğu gibi G05.1 komut özelliği de her CNC kontrol ünitesinde bulunmayabilir. G05.1 komut desteğinin olmaması durumunda ise iki açıdan tehdit oluşmaktadır. Çok sayıda ardışık doğrusal hareket tezgâhın titreşimli veya dur/kalk yaparak çalışmasına neden olurken aynı zamanda da eğrisel/dairesel hareket kadar yumuşak geçişler olmayacağı için ürün üzerinde pürüzlülük sorunu oluşabilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, bir CNC kontrol ünitesi G00, G01, G02, G03, G05.1 ve G06.2 hareket komutlarının hepsini desteklerse, CAM programının ürün işleme algoritma performansı nasıl olursa olsun tezgâh üzerinde işlenen ürün çıktısı yüksek hassasiyette olur değerlendirmesini yapmak mümkündür.

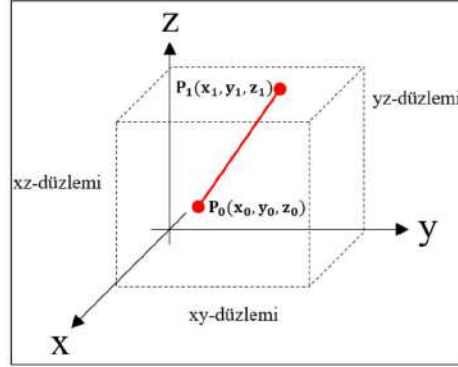
2.1. G00/G01 Doğrusal Hareket Komutları

Kartezyen uzayda iki nokta arasındaki hareketi tanımlayan doğrusal hareket komutları CNC tezgâhlarındaki tüm ürün işleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Kesici takımın boşta hareketi G00 komutu, ürün üzerinde talaş kaldırmalı hareketi ise G01 komutu ile temsil edilmektedir. G00 ve G01 komutları Denklem (2.1)'de gösterilen komut yapısına sahiptirler.

$$G00 X \dots Y \dots Z \dots \tag{2.1}$$

$$G01 X \dots Y \dots Z \dots F \dots$$

Tezgâh kontrol ünitesinin ilgili komutu çalıştırmadan önce bulunduğu konum $P_0 (x_0, y_0, z_0)$ noktası ile ifade edilmektedir. G00 veya G01 komutunda bulunan X, Y ve Z noktaları ise Şekil 2.1'de görüldüğü gibi kesici takımın gitmesi gereken $P_1 (x_1, y_1, z_1)$ noktasını göstermektedir. P_0 ve P_1 noktası arasındaki doğrusal hareket her zaman üç boyutlu (x-y-z) uzayda olmak zorunda değildir. Bu nedenle G00 ve G01 komutları Denklem (2.2)'de gösterilen farklı yapılarda da kullanılabilir.



Şekil 2.1. G00/G01 doğrusal hareket komutu

G00 X ... Z ...

G00 X ...

G01 X ... Y ... Z ...

(2.2)

G01 X ... Y ... F ...

G01 Y ... F ...

G01 Y ... Z ...

Bir ürün işleme sürecinde, kesici takım her zaman ürün üzerinde talaş kaldırarak ilerleme zorunda değildir. İşlenecek ürün yapısına göre kesici takımın ürüne temas etmemesi gereken çok sayıda boş tezgâh hareketleri bulunmaktadır. Ürün işleme zamanından kazanmak için tezgâhın bu boş alandaki doğrusal hareketleri tezgâh yapısına uygun belirlenen maksimum hızda sağlanır. Bu nedenle G00 komutu ile birlikte bir hız bilgisi kullanılmasına (F) ihtiyaç duyulmamaktadır. G01 komutunda ise durum biraz farklıdır. İşlenen ürün yapısına, kesici takım kalitesine, ürün üzerinde işlenen yerin hassasiyetine vb. durumlara göre, talaş kaldırarak ilerlemede G01 komutu ile birlikte verilen hız bilgisine uymak gereklidir. Eğer ilgili komut satırında, Denklem (2.2)'de verilen örnek yapılar da görüldüğü gibi F bilgisi yoksa bir önceki G01 komutunda verilen F bilgisi o anki komutunda hız değeri olmuş olur. Yeni bir F komutu gelene kadar bu sistem devam etmektedir. Komut satırında bulunan F değerinin hangi birimde kullanıldığı da dikkat edilmesi gereken diğer önemli detaydır. Tezgâhlarda çoğunlukla tercih edilen ilerleme hız birimi [mm/dak] ve [mm/devir]'dir

ve G94/G95 komutları ile seçim yapılır. G94 komutu [mm/dak], G95 komutu ise [mm/devir] seçimi için kullanılmaktadır. Eğer G-kod dosyasında seçim işlemi belirtilmemiş ise [mm/dak] varsayılan hız birimi olarak ayarlanmaktadır.

Doğrusal hareketler tek boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu uzayda gerçekleşebildiği için hareket planlamasının uzaydan bağımsız yapılması gereklidir. Tüm hareket olasılıkları için ortak olan payda, P_0 ve P_1 noktası arasındaki hareketin uzunluğudur. Her satırdaki G komutunda yapılan hareket tezgâh üzerinde işlenen tüm hareketin segmentleri olduğu için, bu çalışmada hareket uzunlukları L_{seg} değişkeni ile ifade edilmektedir ve doğrusal hareket için L_{seg} değeri Denklem (2.3) eşitliği ile elde edilmektedir.

$$L_{seg} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (2.3)$$

İlgili segment uzunluğunun bulunmasından sonra ise doğrusal hareketin eksenler tarafından senkronize gerçekleşmesi için Denklem (2.4)'te yer alan eşitlikler kullanılarak eksen yörüngeleri bulunmaktadır.

$$x_i = \frac{(x_1 - x_0)k_i + (x_0)(L_{seg})}{L_{seg}}, \quad y_i = \frac{(y_1 - y_0)k_i + (y_0)(L_{seg})}{L_{seg}}, \quad (2.4)$$

$$z_i = \frac{(z_1 - z_0)k_i + (z_0)(L_{seg})}{L_{seg}}$$

Denklemden yer alan i değeri, hareket uzunluğuna, örnekleme zamanına ve ilgili komutta verilen ilerleme hızına (F) bağlı olarak değişen eksen veri boyutunu, k_i parametresi ise her örnekleme zamanındaki interpolasyon parametresini temsil etmektedir. Eğer kesici takım için bir hız planlaması yapılmadığı varsayılır ise k ve i parametreleri Denklem (2.5)'te görüldüğü gibi elde edilir.

$$i = \frac{L_{seg}}{(V)(T_s)}, \quad v = \frac{F}{60} \quad (2.5)$$

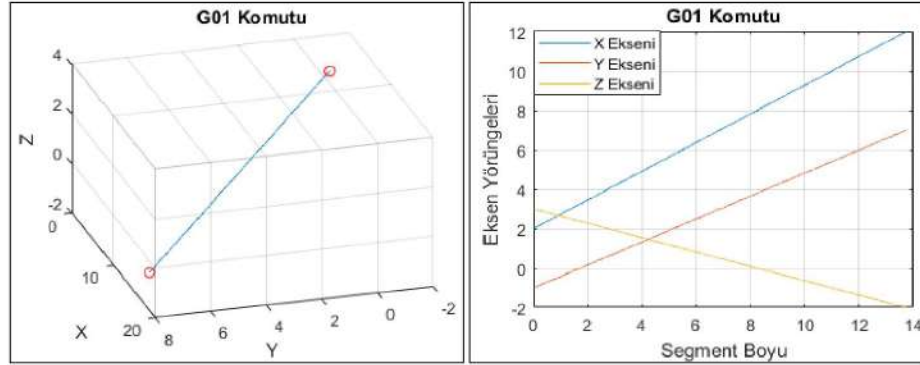
$$k_{i+1} = k_i + \frac{L_{seg}}{(V)(T_s)}, \quad k_0 = 0$$

Fakat tezgâhın kalkış ve duruş hareketlerinin kontrol edilmesi veya komut satırları arasındaki hız geçişlerinin optimize edilmesi gibi işlemlerin yürütüldüğü ileri seviye hız planlamalarına bağlı eksen yörüngelerinin elde edilmesinde, Denklem (2.5)'te yer alan eşitlikler kullanılmamaktadır. Bu nedenle i ve k değerlerinin bir hız planlamasına bağlı bulunması interpolasyon işlemleri bölümünde detaylı anlatılmıştır. Kartezyen uzaydaki doğrusal hareket uzunluğuna bağlı eksen yörüngelerinin nasıl oluştuğunu göstermek için Denklem (2.6)-(2.8)'de yer alan G01 komutları örnek olarak kullanılmıştır. Kesici takımın kartezyen uzaydaki hareketleri ve bu hareketlere ait eksen yörüngeleri Şekil 2.2-2.4'te sırasıyla verilmiştir.

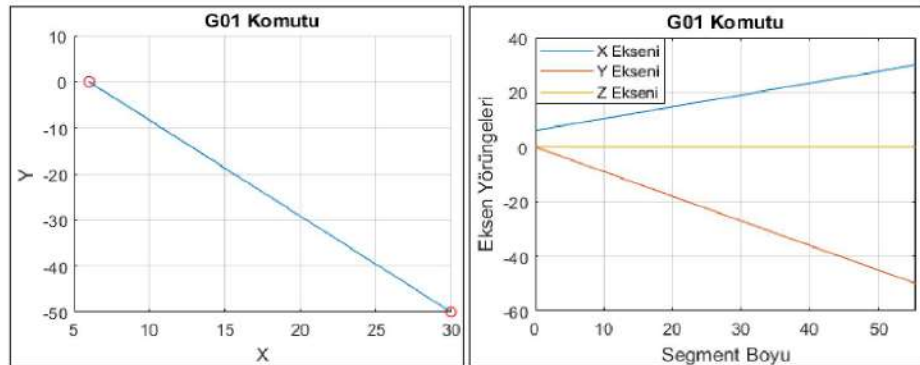
$$G01 X12 Y7 Z-2 \quad (x_0 = 2, y_0 = -1, z_0 = 3) \quad (2.6)$$

$$G01 X30 Y-50 \quad (x_0 = 6, y_0 = 0, z_0 = 0) \quad (2.7)$$

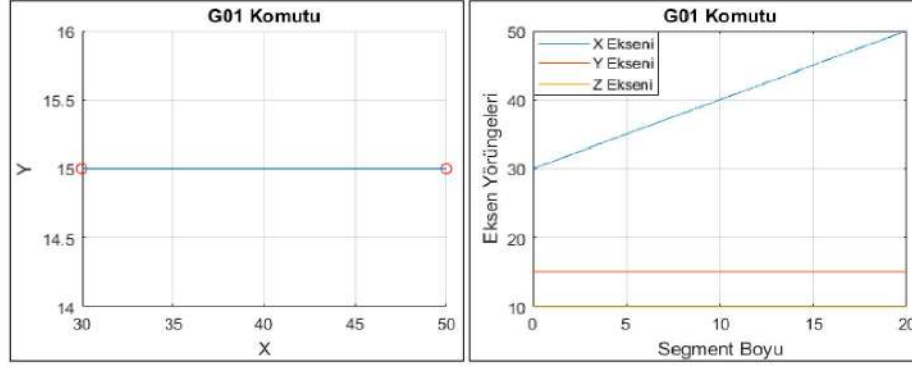
$$G01 X50 \quad (x_0 = 30, y_0 = 15, z_0 = 10) \quad (2.8)$$



Şekil 2.2. G01 X12 Y7 Z-2 komutuna ilişkin eksen hareketleri



Şekil 2.3. G01 X30 Y-50 komutuna ilişkin eksen hareketleri



Şekil 2.4. G01 X50 komutuna ilişkin eksen hareketleri

Bu üç uygulamada herhangi bir hız planlaması yapılmadığı için şekillerdeki eksen yörüngelerinde görüleceği üzere eksenlerde kalkış ve duruş kontrolü bulunmamaktadır. Bu nedenle her örnekleme zamanında eksen hareketleri sabit artış göstermiş ve nihai eksen yörüngeleri de doğrusal fonksiyonlardan oluşmuştur.

2.2. G02/G03 Dairesel Hareket Komutları

G-Kod standartlarına göre dairesel hareketlerin tanımlanmasında iki yöntem kullanılır. Tezgâh kontrol ünitesinin isteği doğrultusunda dairesel hareketler ya radyus yarıçap (R) bilgisi ile ya da radyus merkez bilgileri (I, J, K) ile belirtilir. Bu seçim işlemi düzenleyen birim Post- Processor'dür. Endüstride kullanılan CNC tezgâhlarında genellikle R verisine bağlı dairesel hareket planlama işlemi yapılmaktadır. Bunun en büyük sebebi ise manuel program yazımında radyus merkez bilgilerinin yani I, J, K verilerinin tespitinin çok zor olmasıdır. Radyus yarıçap bilgisi tüm teknik resimlerde gösterilmektedir. Bir operatör teknik resimdeki R bilgilerini kullanarak çok kolay manuel program yazabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada da dairesel hareketlerde R verisi kullanılmaktadır.

G02 komutu belirtilen noktalar arasında saat yönündeki dairesel hareketi ifade etmektedir. Tezgâhlarda genellikle G17 (XY) düzlemi varsayılan düzlemdir. Eğer G02 komutu öncesinde G18 veya G19 düzlem seçimi yapılmamış ise kontrol ünitesi XY düzlemine göre dairesel hareket işlemi yapar. “G02 X... Y... Z... R...” saat yönündeki dairesel bir hareketin genel tanımlama şeklidir. Bu komutta yer alan kartezyen uzaydaki X-Y-Z noktaları tezgâhın hareket bitiminde ulaşması gereken pozisyon bilgileridir. Bu komutu G17 düzlemi için yorumlamak gerekirse, G02

komutu ile verilen X-Y noktasına R yarıçapında dairesel bir hareket yap, eğer bulunduğu Z noktası ile G02 komutunda bulunan Z noktası arasında bir farklılık varsa yeni verilen Z noktasına dairesel harekete senkronize olarak doğrusal hareket işlemi gerçekleştir anlamı çıkmaktadır. (Karışıklıkların önüne geçebilmek için çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde aksi belirtilmediği takdirde G17 düzlemi seçilmiş varsayılacaktır). G03 komutu da format olarak (G03 X... Y... Z... R...) G02 komutu ile aynı olmakla birlikte tezgâhın saat yönünün tersinde hareket yapması gerektiğini göstermektedir. G02 komutu ile benzer olarak verilen G03 komutun G17 düzlemi için yorumu, X-Y noktasına R yarıçapında dairesel bir hareket yap, eğer bulunduğu Z noktası ile G03 komutunda bulunan Z noktası arasında bir farklılık varsa yeni verilen Z noktasına dairesel harekete senkronize olarak doğrusal hareket işlemi gerçekleştir şeklindedir. Verilen bilgiler doğrultusunda, dairesel yörünge planlaması sürecine aşağıda verilen işlem adımları sırasıyla uygulanması ile başlanmaktadır.

- G02/G03 komutu ile verilen X-Y noktalarından geçen R yarıçapındaki radyusun merkezinin bulunması,
- Belirtilen noktalardan geçen iki daire bulunduğu için hangi dairenin seçileceğinin belirlenmesi,
- Radyusun başlangıcının dairenin hangi noktasına karşılık geldiğinin belirlenmesi,
- Radyusun kaç derecelik olduğunun ölçülmesi.

2.2.1. Dairesel hareketin merkez noktasının tespit edilmesi

G02/G03 komutundaki X-Y ve R verilerine göre verilen noktalardan geçen iki daire merkezine ilişkin eşitlikler Denklem (2.9)-(2.12)'de verilmiştir.

$$xc_1 = \frac{-(x_0 + x_1) \rho - |(y_0 - y_1) \sqrt{4r^2 - (x_0)^2 + 2x_0x_1 - (x_1)^2 - (y_0)^2 + 2y_0y_1 - (y_1)^2}|}{2\rho} \quad (2.9)$$

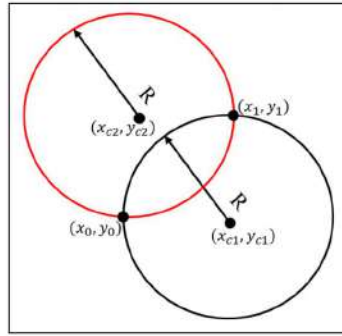
$$xc_2 = \frac{(x_0 + x_1) \rho + |(y_0 - y_1) \sqrt{4r^2 - (x_0)^2 + 2x_0x_1 - (x_1)^2 - (y_0)^2 + 2y_0y_1 - (y_1)^2}|}{2\rho} \quad (2.10)$$

$$\rho = \sqrt{(x_0)^2 - 2x_0x_1 + (x_1)^2 + (y_0)^2 - 2y_0y_1 + (y_1)^2}$$

$$yc_1 = -\frac{(2(x_0 - x_1)xc_1) - (x_0)^2 - (y_0)^2 + (x_1)^2 + (y_1)^2}{2((y_0 - y_1))} \quad (2.11)$$

$$yc_2 = -\frac{(2(x_0 - x_1)xc_2) - (x_0)^2 - (y_0)^2 + (x_1)^2 + (y_1)^2}{2((y_0 - y_1))} \quad (2.12)$$

Eşitlikte (xc_1, yc_1) bir dairenin merkez noktaları, (xc_2, yc_2) ise diğer dairenin merkez noktalarıdır. (x_0, y_0) tezgâhın dairesel harekete başlamadan önce bulunduğu başlangıç noktası, (x_1, y_1) ise dairesel hareket sonucunda ulaştığı bitiş noktasıdır. Şekil 2.5'te, verilen noktalar arasından geçen R yarıçapındaki iki dairenin nasıl oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2.5. İki noktası ve yarıçapı bilinen dairenin merkez noktaları

Dairesel hareketin G kod dosyasına uygun oluşması için merkez seçiminin doğru yapılması gerekmektedir. Merkez seçim işlemi çalışma kapsamında geliştirilen algoritma ile sağlanmaktadır. Önerilen yöntem çok fazla olasılık olduğu için radyüs hareketini başlangıç ve bitiş noktalarına göre dört bölgeye ayırmaktadır. G02 ve G03 komutları için bölge seçim yöntemi Tablo 2.1'de ayrı ayrı verilmiştir.

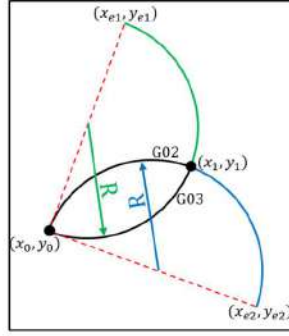
Tablo 2.1. Başlangıç ve bitiş noktalarına göre bölge seçim işlemi

G02	$(x_1 > x_0)$ & $(y_1 \geq y_0)$	$(x_1 \geq x_0)$ & $(y_0 > y_1)$	$(x_0 > x_1)$ & $(y_0 \geq y_1)$	$(x_0 \geq x_1)$ & $(y_1 > y_0)$
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge
G03	$(x_1 < x_0)$ & $(y_1 \geq y_0)$	$(x_1 \leq x_0)$ & $(y_0 > y_1)$	$(x_0 < x_1)$ & $(y_0 \geq y_1)$	$(x_0 \leq x_1)$ & $(y_1 > y_0)$
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge

Doğru bölge seçimi yapıldıktan sonra başlangıç noktasının (x_0, y_0) 180° karşısına denk gelen (x_{e1}, y_{e1}) ve (x_{e2}, y_{e2}) noktaları Denklem (2.13) ile Şekil 2.6’da görüldüğü gibi bulunmaktadır.

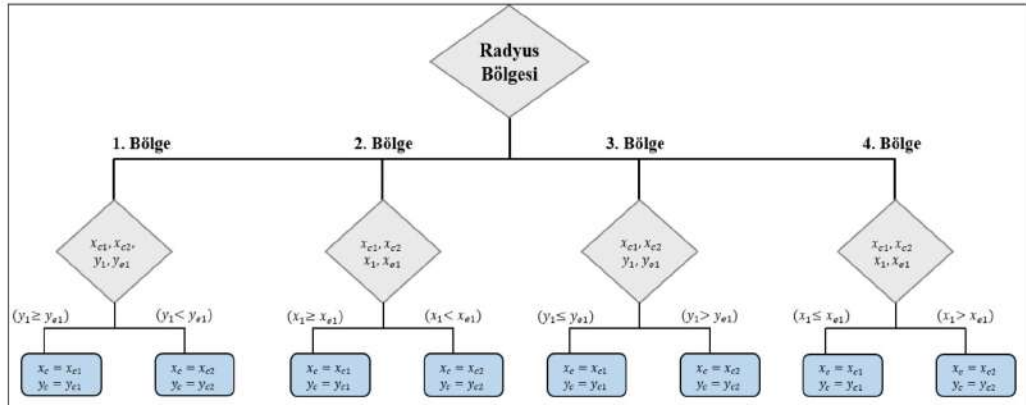
$$x_{e1} = x_0 + 2(x_{c1} - x_0) ; y_{e1} = y_0 + 2(y_{c1} - y_0) \quad (2.13)$$

$$x_{e2} = x_0 + 2(x_{c2} - x_0) ; y_{e2} = y_0 + 2(y_{c2} - y_0)$$



Şekil 2.6. Başlangıç noktasının 180° karşı noktaları

Bölge seçimi yapıлып, (x_{e1}, y_{e1}) ve (x_{e2}, y_{e2}) noktaları tespit edildikten sonra Şekil 2.7’de durum diyagramı ile verilmiş G02/G03 komutları için merkez seçim algoritması kullanılmaktadır. Önerilen yöntem kartezyen uzayda oluşabilecek tüm dairesel hareket olasılıklarını kapsadığı için tekrarlanabilir ve güvenilir bir yapıya sahiptir. Sonuç olarak ilgili dairesel hareketin merkezi, durum diyagram çıktısı olan (x_c, y_c) noktasıdır.



Şekil 2.7. Merkez noktası seçimine ilişkin durum diyagramı

2.2.2. Dairesel hareketin başlangıç noktasının ve dairesel hareket miktarının hesaplanması

İstenen radyusun başlangıç noktasının, belirlenen merkez noktasına göre ortaya çıkan dairesel yörüngenin hangi noktasına karşılık geldiği Denklem (2.14) ve (2.15)'teki eşitlikler kullanılarak G02 ve G03 komutları için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. θ_{02} G02 komutu ile verilen saat yönündeki dairesel hareketin daire üzerindeki başlangıç açısı, θ_{03} ise G03 komutuna ilişkin saat yönünün tersinde oluşan dairesel hareketin ilgili daire üzerindeki başlangıç açısıdır.

$$\theta_{02} = \begin{cases} \tan^{-1} \left(-\frac{(y_0 - y_c)}{(x_0 - x_c)} \right) & \text{if } (x_0 > x_c) \\ 180 + \tan^{-1} \left(-\frac{(y_0 - y_c)}{(x_0 - x_c)} \right) & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (2.14)$$

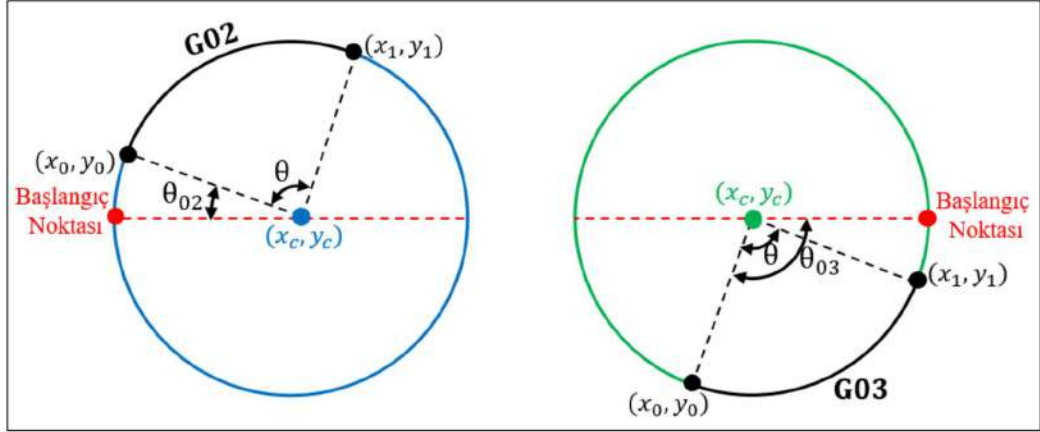
$$\theta_{03} = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{(y_0 - y_c)}{(x_0 - x_c)} \right) & \text{if } (x_0 > x_c) \\ 180 + \tan^{-1} \left(\frac{(y_0 - y_c)}{(x_0 - x_c)} \right) & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (2.15)$$

Son adımda ise radyusun (x_0, y_0) noktasından sonra kaç derecelik açı yapacağını belirlemek gerekmektedir. Radyüs açısı θ değişkeni ile ifade edilmekte ve G02 komutu için Denklem (2.16), G03 komutu için ise Denklem (2.17) ile hesaplanmaktadır.

$$\theta = 180 - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2}}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}} \right) \quad (2.16)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2}}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}} \right) \quad (2.17)$$

Önerilen yöntem doğrultusunda, G-kod dosyasına göre takip edilmesi gereken dairesel bir yörüngenin elde edilmesi için gereken tüm değişkenler G02 ve G03 komutları için Şekil 2.8-a ve 2.8-b'de ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 2.8. G02 ve G03 komutları için başlangıç açısı ve radyüs açısının gösterimi

Dairesel hareket önceki bölümde bahsedildiği gibi seçilen düzlem özelliğine göre iki ekseninde gerçekleşir. Eğer üçüncü eksen için de bir hareket söz konusu ise yani kartezyen uzayda helisel bir hareket varsa, bu eksen içinde dairesel harekete senkronize doğrusal bir yörünge tanımlanmalıdır. G17 düzlemindeki dairesel bir hareket için X/Y eksenlerinde oluşan yörüngeler ve X-Y eksen hareketine senkronize olan üçüncü eksen (Z) için oluşturulan yörünge denklemleri G02 ve G03 komutları için Denklem (2.18) ve (2.19)'da ayrı ayrı verilmiştir.

$$x_i = (-R) \cos(\alpha_i) + x_c$$

$$y_i = (R) \sin(\alpha_i) + y_c \quad , \quad \alpha_i = \left[\theta_{02} \frac{\pi}{180}, (\theta_{02} + \theta) \frac{\pi}{180} \right] \quad (2.18)$$

$$z_i = z_0 + \text{sign}(z_1 - z_0) (\alpha_i - \theta_{02}) \frac{|z_1 - z_0|}{\theta}$$

Her düzlem için farklı denklem yapısı kurulmaması için Tablo 2.2'de yer alan değişken değiştirme yöntemi önerilmektedir. Eğer bu yöntem kullanılırsa X-Y eksenini her zaman dairesel, Z eksenini de doğrusal hareket eksenini olmaktadır.

$$x_i = (R) \cos(\alpha_i) + x_c$$

$$y_i = (R) \sin(\alpha_i) + y_c \quad , \quad \alpha_i = \left[\theta_{03} \frac{\pi}{180}, (\theta_{03} + \theta) \frac{\pi}{180} \right] \quad (2.19)$$

$$z_i = z_0 + \text{sign}(z_1 - z_0) (\alpha_i - \theta_{03}) \frac{|z_1 - z_0|}{\theta}$$

Tablo 2.2. Seçilen düzleme göre değişken değiştirme yönteminin uygulanması

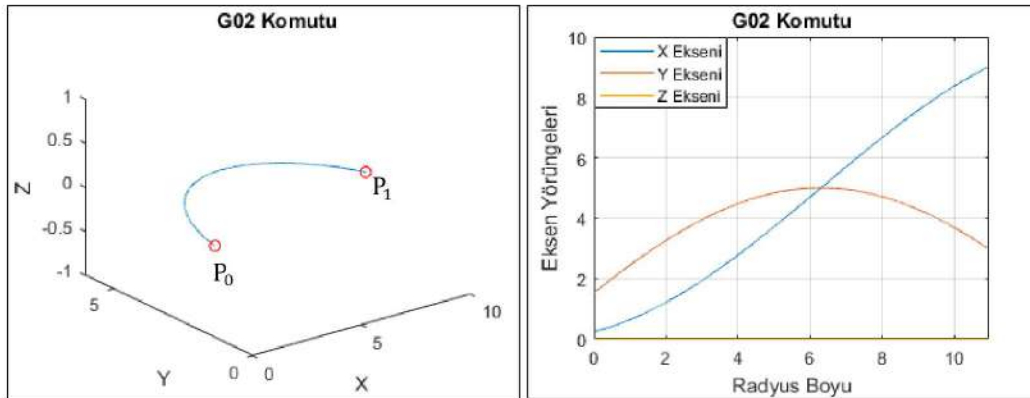
G17 (XY Düzlemi)	G18 (XZ Düzlemi)	G19 (YZ Düzlemi)
$x = x$	$x = x$	$x = y$
$y = y$	$y = z$	$y = z$
$z = z$	$z = y$	$z = x$

Denklem (2.18) ve (2.19)'da yer alan i değeri, eksen veri boyutunu, α_i parametresi ise her örnekleme zamanındaki interpolasyon parametresini temsil etmektedir. Eğer kesici takım için bir hız planlaması yapılmadığı varsayılır ise α ve i parametreleri Denklem (2.20)'de görüldüğü gibi elde edilir.

$$i = \frac{L_{\text{rad}}}{(V)(T_s)} \quad , \quad L_{\text{rad}} = (R) \left(\theta \frac{\pi}{180} \right), V = \frac{F}{60} \quad (2.20)$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \frac{(V_{\text{max}})(T_s) \left(\theta \frac{\pi}{180} \right)}{L_{\text{rad}}} \quad , \quad \alpha_0 = \theta_{02/03} \left(\frac{\pi}{180} \right)$$

Kartezyen uzaydaki dairesel hareket uzunluğuna bağlı eksen yörüngelerinin nasıl oluştuğunu ve düzlem seçiminin kesici takım yörüngesi üzerindeki etkisini göstermek için Denklem (2.21)-(2.23)'te yer alan G02 komutları örnek olarak kullanılmıştır. Kesici takımın kartezyen uzaydaki hareketleri ve bu hareketlere ait eksen yörüngeleri Şekil 2.9-2.11'de sırasıyla verilmiştir.

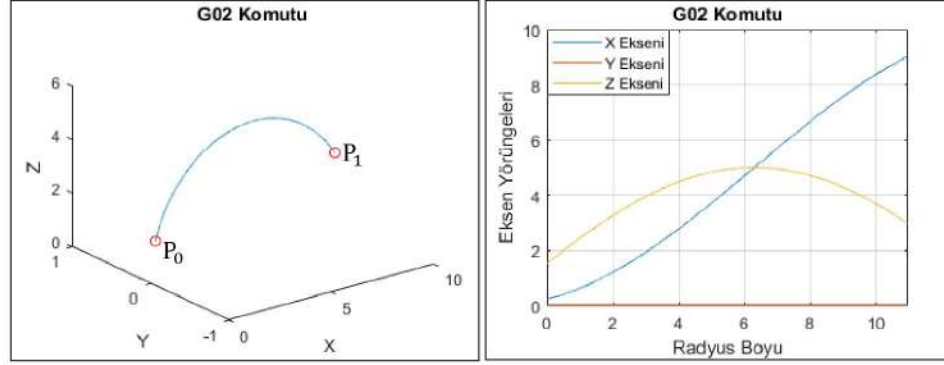


Şekil 2.9. G17 G02 X9.019 Y2.975 R5 komutuna ilişkin eksen hareketleri

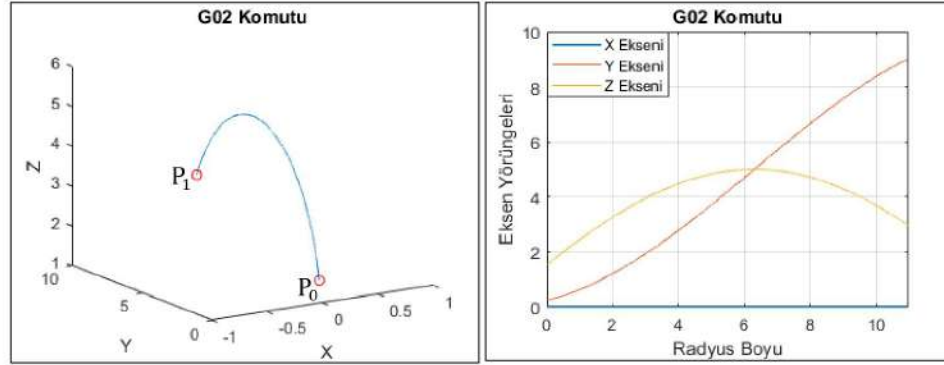
$$G17 G02 X9.019 Y2.975 R5 \quad (x_0 = 0.24, y_0 = 1.53, z_0 = 0) \quad (2.21)$$

$$G18 G02 X9.019 Z2.975 R5 \quad (x_0 = 0.24, y_0 = 0, z_0 = 1.53) \quad (2.22)$$

$$G19 G02 Y9.019 Z2.975 R5 \quad (x_0 = 0, y_0 = 0.24, z_0 = 1.53) \quad (2.23)$$



Şekil 2.10. G18 G02 X9.019 Z2.975 R5 komutuna ilişkin eksen hareketleri

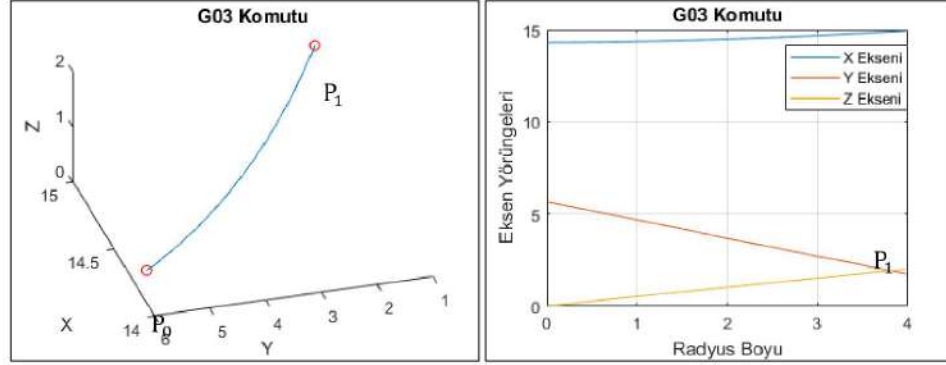


Şekil 2.11. G19 G02 Y9.019 Z2.975 R5 komutuna ilişkin eksen hareketleri

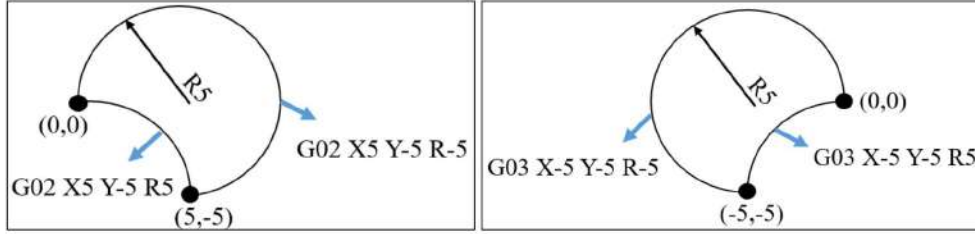
Ayrıca seçili düzlemde iki eksende oluşan dairesel harekete senkron üçüncü eksende oluşan doğrusal hareketin bulunduğu Denklem (2.24)'te yer alan G03 komut satırına ilişkin sonuçlar ise Şekil 2.12'de verilmiştir.

$$G17 G03 X14.94 Y1.749 Z2 R14.976 \quad (x_0 = 14.32, y_0 = 5.66, z_0 = 0) \quad (2.24)$$

G02 ve G03 komutlarında 180 dereceye kadar olan dairesel hareketler için yukarıda bahsedilen yöntemler kullanılmaktadır. Fakat dairesel hareketin 180 dereceden büyük olması durumunda özel durumlar söz konusudur. Bunun nedeni eğrinin 180 dereceyi geçmesi durumunda bitiş noktasına aynı yarıçaplı iki farklı eğriyle ulaşılabilmesidir (Şekil 2.13).



Şekil 2.12. G17 G03 X14.94 Y1.749 Z2 R14.976 komutuna ilişkin eksen hareketleri



Şekil 2.13. Dairesel hareketin 180°'den büyük olma durumu

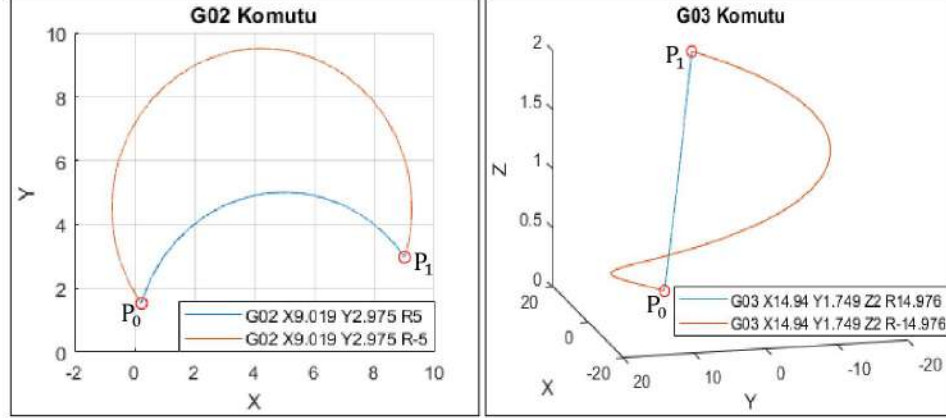
Bu durumda karmaşıklığın önüne geçmek için CAM programları eğrinin 180 dereceden büyük olması durumunda yarıçapın negatif değerle belirtilmesi yöntemini kullanmaktadır. Bu doğrultuda yapılan çalışmada G-kod dosyasında negatif değerli radyus bilgisine rastlanırsa Tablo 2.1'de yer alan merkez seçim işlemi yerine Tablo 2.3 kullanılmaktadır.

Tablo 2.3. Dairesel hareketin 180°'den büyük olması durumunda bölge seçim işlemi

G02	$(x_1 \geq x_0)$ & $(y_0 > y_1)$	$(x_0 > x_1)$ & $(y_0 \geq y_1)$	$(x_0 \geq x_1)$ & $(y_1 > y_0)$	$(x_1 > x_0)$ & $(y_1 \geq y_0)$
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge
G03	$(x_1 \leq x_0)$ & $(y_0 > y_1)$	$(x_0 < x_1)$ & $(y_0 \geq y_1)$	$(x_0 \leq x_1)$ & $(y_1 > y_0)$	$(x_1 < x_0)$ & $(y_1 \geq y_0)$
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge

Denklem (2.21) ve (2.24)'te bulunan G02 ve G03 komut satırlarında radyus değerinin negatif olması durumunda, Şekil 2.14'te görülen yörüngeler elde edilmektedir. Bu

sonuçlardan, dairesel hareketin 180 dereceden büyük olması durumunda kesici takım yörüngesinin de önemli değişikliğe sebep olduğu görülmektedir.



2.3. G06.2 NURBS Eğrisel Hareket Komutu

İşlenen yüzey üzerinde dairesel interpolasyon ile ifade edilmeyen eğrilerin olması durumunda, CNC kontrol üniteleri yazılım özelliklerine göre iki farklı çözüm üzerinden işlem yapmaktadırlar. Bunlardan birisi eğriyi küçük aralıklarla parçalara ayırarak işlem yapmaktır. Bu işlem basit olmasına rağmen iki yönden olumsuz sonuç oluşturabilmektedir. Birincisi elde edilen son yüzeyin küçük parçalı hareketlerden dolayı pürüzlü olması, ikincisi ise bir eğriyi çok sayıda nokta ile parçalara ayırdığı için yoğun G1 koduna bağlı program çıkarmasıdır. Ayrıca çok sayıda ardışık doğrusal hareket tezgâhın titreşimli veya dur/kalk yaparak çalışmasına neden olabilmektedir. Eğer mikro boylardaki doğrusal parçalar hassas bir eğriye dönüştürülür ise, bu durumda da ana yörüngede sapmalar yani kontur hataları oluşacaktır. Bu nedenle CAM programının ürettiği G-kod dosyasına bire bir bağlı kalmak hem işlenecek ürün kalitesi yönünden hem de tezgâhın titreşimsiz ve dur/kalk yapmadan çalışabilmesi yönünden çok önemlidir. Gelişmiş CNC tezgâhlarında eğrisel hareketler parçalara ayrılmış yoğun G01 noktalarının bulunduğu G-kod dosyası yerine G06.2 komutu üzerinden NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) komutları ile işlenmektedir. Eğer bir CNC tezgâhında G06.2 komutu çalıştırılabilir ise, CAM programında NURBS komutu aktif hale getirilerek ilgili yerlerde NURBS komutları da üretilebilmektedir. NURBS komutlarının en büyük avantajı ise eğri uydurma işlemine gerek duyulmadan CAM programındaki yörüngenin bire bir aynısının tezgâhta

işlenebilmesidir. NURBS eğrisinin oluşturulabilmesi için eğri derecesi, düğüm vektörü, kontrol noktaları ve ağırlık vektörü bilgilerine ihtiyaç vardır. Bu kapsamda G-kodları ile NURBS eğrisi Denklem (2.25)'te görülen yapı ile tanımlanmaktadır.

G06.2 [P] K ... X ... Y ... Z ... α ... β ... R ... F ...

K ... X ... Y ... Z ... α ... β ... R ...

K ... X ... Y ... Z ... α ... β ... R ...

K ... X ... Y ... Z ... α ... β ... R ...

K...

K...

.

K...

(2.25)

X-Y-Z: Kontrol Noktaları (Kartezyen Uzayında)

α – β : Kontrol Noktaları (Döner Eksen)

K: Düğüm Vektörü

R: Ağırlık Vektörü

P: NURBS eğri derecesi

F: İlerleme Hızı

Eğri derecesi ne olursa olsun düğüm vektörü, kontrol noktaları ve ağırlık vektörü bilgileri mutlaka kod içerisinde yer almaktadır. Fakat eğri derecesi komut satır sayısı açısından önem teşkil etmektedir. Çünkü Denklem (2.25)'de görüldüğü üzere düğüm vektörü verisi (K) kontrol noktaları ve ağırlık vektör verisinden (R) sonraki satırlarda tek başına devam etmektedir. Devam eden satır sayısını belirleyen parametre ise eğri derecesidir. Tezgâh üzerinde çoğunlukla ikinci dereceden (quadratic NURBS) veya üçüncü dereceden (cubic NURBS) eğrileri kullanılmaktadır. Denklem (2.26)'da, üç

eksen (X-Y-Z) bir tezgâhta üçüncü dereceden (P=3) bir NURBS eğrisi işlenmesi için gerekli olan G-kod yapısı örnek olarak gösterilmiştir.

G06.2 [3] K ... X ... Y ... Z ... R ... F ...

K ... X ... Y ... Z ... R ...

K ... X ... Y ... Z ... R ...

K ... X ... Y ... Z ... R ...

(2.26)

K...

K...

K...

K...

2.3.1. NURBS eğrileri

Doğadaki oluşumlara veya günlük hayatta kullanılan araç gereçlere baktığımızda geometrik formların, keskin hatlara sahip yapılardan çok yumuşak hatlı eğrisel yapılarda olduğu görülür. CNC tezgâhlarında işlenen ürünlerde bu doğrultuda çoğunlukla eğrisel formlarda olmaktadır. Araçlar ve uçaklar temelinde mekanik üretimin büyük öneme sahip olduğu 2. Dünya savaşı döneminde, üretim sürecinin tekrarlanabilir olması ve ürünlerin tasarımı yapan kişi dışında da anlaşılabilir yapıda olması için eğrisel formların matematiksel olarak ifade edilebilmesi için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmaların başında polinom fonksiyonları gelmiştir. Polinom fonksiyonlarını, 1959 yılında, Paul de Faget de Casteljaou isminde, Citroën'de çalışan bir Fransız otomotiv mühendisi tarafından ortaya çıkarılan Bezier eğrileri takip etmiştir. Aynı yıllarda, Renault'da silindir parçalarının kesişimi üzerinde incelemeler yapan bir başka Fransız otomotiv mühendisi Pierre Bézier de benzer bir yaklaşımla araştırmalarını sürdürmüştür. 1970 yılında Rich Riesenfeld tarafından geliştirilen ileri seviye B-spline eğrisel fonksiyonları ise bu alandaki en önemli çalışmalardan birisi olmuştur. Çünkü B-spline fonksiyonlarının dönemin gelişmiş fonksiyonlarından Bezier eğrilerine göre önemli avantajları bulunmaktadır. Bu

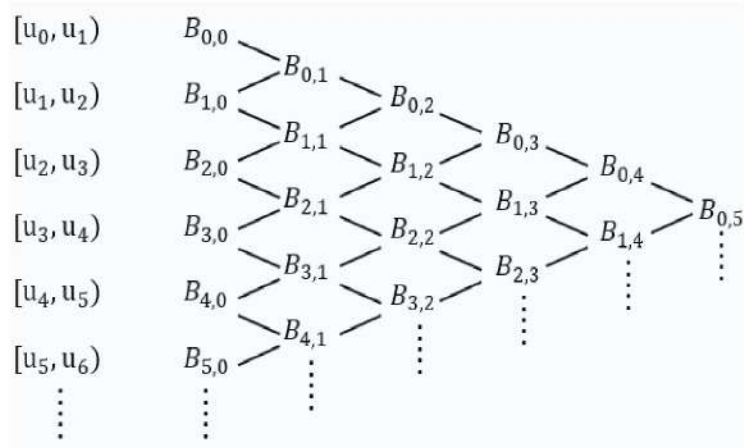
avantajlar şu şekilde özetlenebilir; Bezier eğri fonksiyonlarının derecesi kontrol noktalarının sayısına bağlı olurken B-spline eğrilerinde kontrol noktası sayısı fonksiyonun derecesini etkilememektedir. Bununla beraber Bezier eğrilerinde C^1 sürekliliğin sağlanması kolay olurken C^2 sürekliliğinin sağlanması zorlaşmaktadır. C^2 Sürekliliği ise eğriyi oluşturan parçalı fonksiyonların birinci ve ikinci türevlerinin eşit olması anlamına gelmektedir. Bu durumda en az C^2 sürekliliği gerektiren işlemler için Bezier eğrisinin uygulamasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle eğrinin türevlerinin de önemli olduğu zamanlar B-Spline eğrilerinin kullanılmasının daha uygun olduğunu göstermektedir. Birçok noktada avantaj sağlayan B-spline eğrileri üzerine çalışmalar devam etmiş ve bir kademe daha ileriye giderek NURBS eğrisel fonksiyonları geliştirilmiştir. NURBS eğrilerinin ve yüzeylerinin gerçek zamanlı, etkileşimli olarak oluşturulması ise ilk olarak 1989'da Silicon Graphics iş istasyonlarında ticari olarak sağlanmış ve 1993 yılında, NURBS adı verilen PC'ler için ilk etkileşimli NURBS modelleyicisi, Berlin Teknik Üniversitesi ile işbirliği yapan küçük bir başlangıç şirketi olan CAS Berlin tarafından geliştirilmiştir.

Günümüzde de NURBS eğrileri bilgisayar destekli tasarım (CAD), imalat (CAM) ve mühendislikte (CAE) aktif olarak kullanılmakta ve IGES, STEP, ACIS ve PHIGS gibi çok sayıda endüstriyel dosya standartlarının bir parçası olarak karşımıza çıkmaktadır. NURBS eğrilerinin endüstriyel üretim sürecinin önemli yapı taşlarından olan CAD, CAM ve CAE tarafından desteklenmesi, CNC tezgâh kontrol ünitesi tarafından tanınan G-kod dosyalarında da kullanılabilmesini sağlamıştır. NURBS eğrilerinin endüstriyel üretim sürecinin tüm aşamalarında kullanılmasının en büyük sebebi, sadece üç parametre (kontrol noktası, düğüm vektörü ve ağırlık vektörü) ile tüm eğrisel fonksiyonların oluşturulabilir olmasıdır. Az parametre ile ileri seviye eğrisel formların tanımlanması, CNC tezgâhlar açısından G-kod dosya boyutunun önemli derecede düşürülmesi yönünden de büyük avantaj sağlamaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi bu kadar avantajlı bir yapıya sahip eğrisel fonksiyonların her CNC kontrol ünitesi yerine gelişmiş kontrol ünitelerinde kullanılıyor olması ise matematiksel işlemlerin ağırlığından kaynaklanmaktadır. G06.2 NURBS komutlarının okunmasından tezgâh motorlarına gönderilecek nihai yörüngelerin elde edilmesine kadar çok önemli matematiksel işlem süreci bulunmaktadır. 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 [69]. Düğüm vektörü düzgün dağılımlı (uniform) olabileceği gibi, hedef noktaları daha iyi yaklaşım yapmak üzere çeşitli metotlarla düzgün olmayan bir dağılım (nonuniform) şeklinde de tanımlanabilir. NURBS eğrileri ise düğüm vektörlerinin düzgün olmayan bir dağılım gösterdiği ve B-spline eğrilerine ek olarak ağırlık vektörünün bulunduğu eğrilerdir. NURBS eğrilerinin bilgisayar ortamında elde edilmesi için öz yinelemeli bir yapıya sahip Cox-de Boor algoritması kullanılmaktadır. Bir NURBS eğrisi öz yinelemeli formda Denklem (2.27)'de görülen eşitlikle ifade edilmektedir.

$$C_u = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} B_{i,p}(u)w_iP_i}{\sum_{i=0}^{n-1} B_{i,p}(u)w_i} \quad (2.27)$$

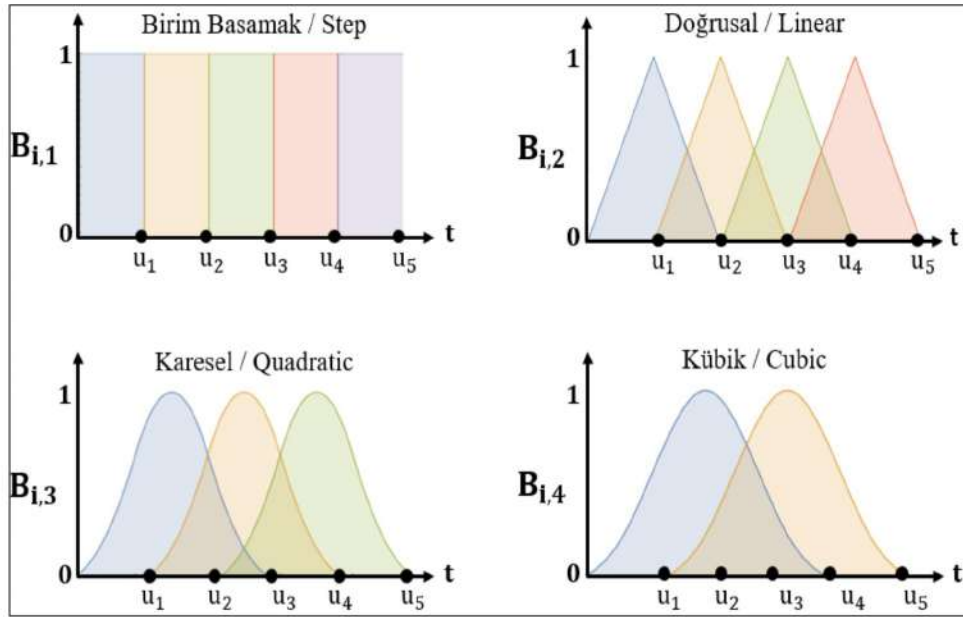
Denklemden, u : düğüm vektör parametresini, C_u : düğüm vektör parametresi temelinde elde edilen NURBS eğrisini, B : öz yinelemeli yapıya sahip baz fonksiyonlarını, n : kontrol noktası sayısını, w : ağırlık vektörünü, P : kontrol noktasını, p : ise baz fonksiyon derecesini ifade etmektedir. Düğüm vektörü, ağırlık vektörü ve kontrol noktaları bilinen parametreler olduğu için, Denklem (2.27)'de önemli olan parametre, Şekil 2.15'te genel yapısı görülen özyinelemeli baz fonksiyonlarıdır (B).



Şekil 2.15. Baz fonksiyonlarının özyinelemeli yapısı

Şekilde görüldüğü üzere baz fonksiyon derecesi arttıkça matematiksel işlem ağırlığı ortaya çıkmakta ve buna bağlı NURBS eğrisinin sürekliliği de artmaktadır. NURBS eğrisinin sürekliliğinin artması eğrinin türevleri açısından olumlu sonuç verirken,

matematiksel işlem ağırlığı açısından da olumsuz bir durum ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle NURBS eğrisinin devamlılığı ve matematiksel işlem ağırlığı arasında optimum bir baz fonksiyon derecesi belirlemek gerekmektedir. Baz fonksiyonlarının fonksiyon derecesine göre nasıl değiştiğini göstermek için beş düğüm vektörü üzerinden, birinci derece (step), ikinci derece (linear), üçüncü derece (quadratic) ve dördüncü derece (cubic) baz fonksiyonları Şekil 2.16'da örnek olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere fonksiyon derecesi arttıkça düğüm vektörleri arasında oluşan eğri sayısı azalmakta ve eğrilerin sürekliliği artmaktadır. CNC tezgâhlarının kontrolünde kesici takım hız, ivme ve jerk parametrelerinin kontrol altında tutulabilmesinde, NURBS eğrisinin C^2 sürekliliğine sahip olması büyük avantaj sağlamaktadır. NURBS eğrilerinde C^2 sürekliliği ise üçüncü derece (cubic) baz fonksiyonları ($p=4$) ile sağlandığı için çalışmanın devamında bütün anlatımlar kübik baz fonksiyonları üzerinden yapılacaktır.



Şekil 2.16. Baz fonksiyon dereceleri

NURBS eğrilerine ilişkin baz fonksiyonları Denklem (2.28)'de görülen öz yinelemeli eşitlikle elde edilmektedir.

$$B_{i,1} = \begin{cases} 1 & t_i \leq t < t_{i+1} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.28)$$

$$B_{i,p}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+p-1} - t_i} B_{i,p-1}(t) + \frac{t_{i+p} - t}{t_{i+p} - t_{i+1}} B_{i+1,p-1}(t)$$

Denklem (2.28)'de görülen genel denklem yapısı, birinci kübik baz fonksiyonu için ($i=0$ ve $p=4$) Denklem (2.29)'da yer alan yapıya dönüşmektedir.

$$B_{0,4}(t) = \frac{t - t_0}{t_3 - t_0} B_{0,3}(t) + \frac{t_4 - t}{t_4 - t_1} B_{1,3}(t) \quad (2.29)$$

Denklem (2.29)'un çözümü için gerekli öz yinelemeli parametreler Denklem (2.30)'da görüldüğü gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} B_{0,3}(t) &= \frac{t - t_0}{t_2 - t_0} B_{0,2}(t) + \frac{t_3 - t}{t_3 - t_1} B_{1,2}(t) \\ B_{0,2}(t) &= \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} B_{0,1}(t) + \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} B_{1,1}(t) \\ B_{1,3}(t) &= \frac{t - t_1}{t_3 - t_1} B_{1,2}(t) + \frac{t_4 - t}{t_4 - t_2} B_{2,2}(t) \\ B_{2,2}(t) &= \frac{t - t_2}{t_3 - t_2} B_{2,1}(t) + \frac{t_4 - t}{t_4 - t_3} B_{2,2}(t) \\ B_{1,2}(t) &= \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} B_{1,1}(t) + \frac{t_3 - t}{t_3 - t_2} B_{2,1}(t) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Denklem (2.30)'da bulunan eşitlikler, Denklem (2.29)'da kullanılarak Denklem (2.31)'de görülen genel denklem takımı elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} B_{0,4}(t) &= \frac{t - t_0}{t_3 - t_0} \left(\frac{t - t_0}{t_2 - t_0} \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} + \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} \right) + \frac{t_3 - t}{t_3 - t_1} \left(\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} + \frac{t_3 - t}{t_3 - t_2} \right) \right) \\ &\quad + \frac{t_4 - t}{t_4 - t_1} \left(\frac{t - t_1}{t_3 - t_1} \left(\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} + \frac{t_3 - t}{t_3 - t_2} \right) + \frac{t_4 - t}{t_4 - t_2} \left(\frac{t - t_2}{t_3 - t_2} + \frac{t_4 - t}{t_4 - t_3} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.31)$$

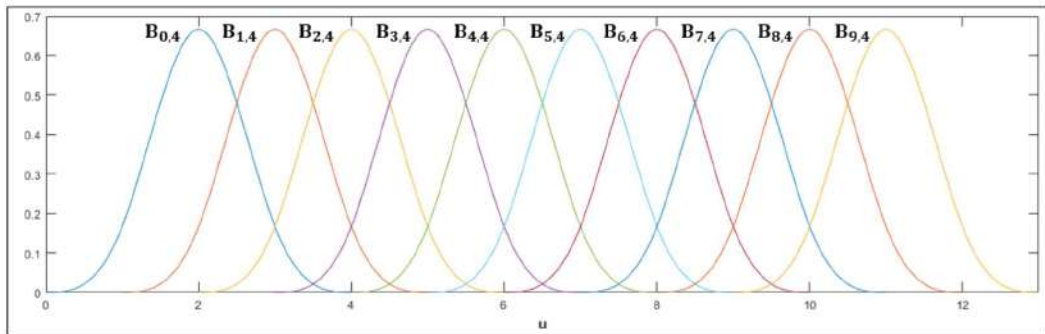
Şekil 2.31'den hatırlanacağı üzere, üçüncü dereceden kübik baz fonksiyonları beş düğüm noktası arasında oluşmakta ve her iki düğüm vektörü arasında ayrı bir fonksiyonla tanımlanmaktadır. Bu nedenle Denklem (2.31)'de yer alan $B_{0,4}(t)$ fonksiyonu Denklem (2.32)'de görüldüğü gibi beş parçalı fonksiyon yapısına dönüşmektedir.

$$B_{0,4}(t) = \begin{cases} \frac{(t-t_0)^3}{(t_1-t_0)(t_2-t_0)(t_3-t_0)} & , t_0 \leq t < t_1 \\ \left(\frac{t-t_0}{t_2-t_0} \frac{t_2-t}{t_2-t_1} + \frac{t_3-t}{t_3-t_1} \frac{t-t_1}{t_2-t_1} \right) \frac{t-t_0}{t_3-t_0} + \left(\frac{t-t_1}{t_2-t_1} \frac{t-t_1}{t_3-t_1} \right) \frac{t_4-t}{t_4-t_1} & , t_1 \leq t < t_2 \\ \left(\frac{t_3-t}{t_3-t_1} \frac{t_3-t}{t_3-t_2} \right) \frac{t-t_0}{t_3-t_0} + \left(\frac{t-t_1}{t_3-t_1} \frac{t_3-t}{t_3-t_2} + \frac{t_4-t}{t_4-t_2} \frac{t-t_2}{t_3-t_2} \right) \frac{t_4-t}{t_4-t_1} & , t_2 \leq t < t_3 \\ \frac{(t_4-t)^2}{(t_4-t_1)(t_4-t_2)(t_4-t_3)} & , t_3 \leq t < t_4 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.32)$$

NURBS eğrisine ait düğüm vektör elemanlarının doğrusal artması (uniform) durumunda baz fonksiyonları eş değer olarak elde edilmektedir. Denklem (2.32)'de yer alan eşitlikler, düğüm vektörünün doğrusal artması durumunda ($[0, 1, 2, \dots, n]$) Denklem (2.33) eşitliğine dönüşmektedir.

$$B_{0,4}(t) = \begin{cases} \frac{t^3}{6} & , t_0 \leq t < t_1 \\ \left(\frac{-3t^3+12t^2-12t+4}{6} \right) & , t_1 \leq t < t_2 \\ \frac{3t^3-24t^2+60t-44}{6} & , t_2 \leq t < t_3 \\ \frac{-t^3+12t^2-48t+64}{6} & , t_3 \leq t < t_4 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.33)$$

Şekil 2.17'de, Denklem (2.33) yardımıyla bulunan doğrusal artımlı, $[0, 1, \dots, 13]$ düğüm vektörüne sahip kübik NURBS eğrisine ait baz fonksiyonları örnek olarak verilmiştir.



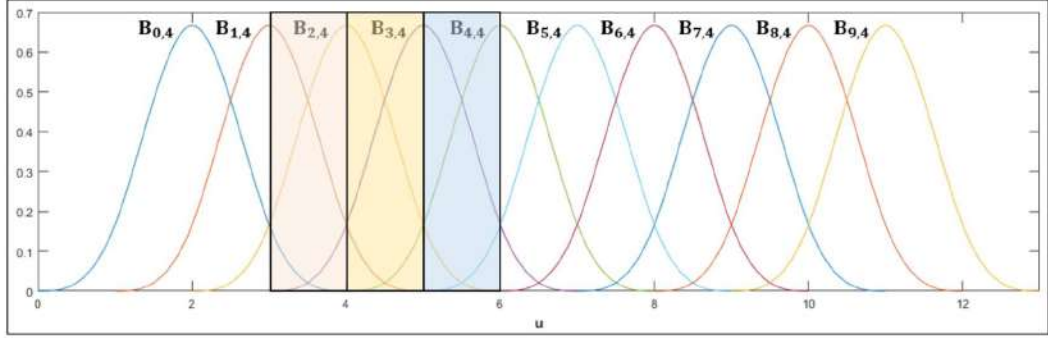
Şekil 2.17. Uniform kübik baz fonksiyonları (düğüm vektörü: $[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]$)

Baz fonksiyonlarının bulunmasından sonraki işlem ise kontrol noktaları ile baz fonksiyonlarını kullanarak NURBS eğrisinin segmentlerini elde etmektir. Kübik baz

fonksiyonlarına sahip bir NURBS eğrisi, “n-3” tane segmentten oluşmaktadır. Segment fonksiyonları (f(t)), Denklem (2.34)’te verilen eşitlikle bulunmaktadır.

$$f(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{B_{i,4}(t)(P_i)((w_i))}{(P_i)((w_i))}, \quad t \in [u_3, u_n] \quad (2.34)$$

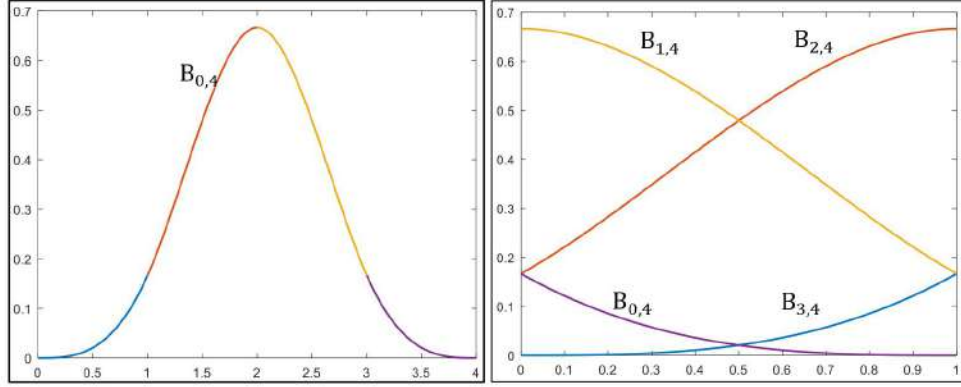
Kübik bir baz fonksiyonu önceki bölümde de belirtildiği gibi dört parçadan oluşmaktadır. NURBS eğrisini oluşturan her bir segment ise ardışık dört baz fonksiyonun birer parçasını kullanarak bulunmaktadır. Şekil 2.18’de taralı alanlarla gösterilmiş, dört farklı baz fonksiyonun dört parçası kübik NURBS eğrisinin bir segmentini oluşturmaktadır.



Şekil 2.18. NURBS eğrisinin segmentlerinin oluşturulması

Şekil 2.32’deki taralı alandaki işlemlerin daha pratik olarak yapılması için Convex Hull özelliği kullanılarak, 0-1 arasında değer alan u değişkenine göre, Denklem (2.33)’teki eşitlikler, Denklem (2.35)’te görüldüğü gibi tekrar düzenlenmektedir.

$$\begin{aligned}
 B_{i,4}(u) &= \frac{u^3}{6}, & , u = t, & \quad 0 \leq t < 1 \\
 B_{i-1,4}(u) &= \frac{-3u^3 + 3u^2 + 3u + 1}{6}, & , u = t - 1, & \quad 1 \leq t < 2 \\
 B_{i-2,4}(u) &= \frac{3u^3 - 6u^2 + 4}{6}, & , u = t - 2, & \quad 2 \leq t < 3 \\
 B_{i-3,4}(u) &= \frac{(1-u)^3}{6}, & , u = t - 3, & \quad 3 \leq t < 4
 \end{aligned} \quad (2.35)$$



Şekil 2.19. NURBS eğrisinin Convex Hull özelliği

Şekil 2.32’de görülen bir baz fonksiyonunun ($B_{0,4}$) dört parçası ve yine Şekil 2.32’deki birinci taralı alanın, Convex Hull özelliği kullanılarak 0-1 arasında değer alan u parametresine göre nasıl oluşturulduğu Şekil 2.19’da örnek olarak verilmiştir

Son olarak elde edilen parçalı fonksiyonlar, Denklem (2.36)’da görüldüğü gibi sırasıyla NURBS eğrisine ait kontrol noktaları ile işleme alınarak u parametresi temelli segment fonksiyonlarına ($f(u)$) ulaşılmaktadır.

$$f_i(u) = \sum_{j=0}^3 \frac{B_{i-3+j}(u)(P_{i-3+j})(w_{i-3+j})}{(P_{i-3+j})(w_{i-3+j})}, \quad u \in [0,1], \quad i \in [3, n-1] \quad (2.36)$$

Denklem (2.35)’te görülen eşitlik doğrusal artımlı baz fonksiyonları için Denklem (2.37) ile matris formda da ifade edilebilmektedir. Kübik baz fonksiyonları olmasından dolayı Denklem 2.37’de fonksiyon derecesi ve i değeri 3 olarak alınmıştır. Baz fonksiyon derecesi arttıkça matris ve vektör boyutları da artış göstermekte ve dolayısıyla segment fonksiyonlarının işlem yoğunluğu artmaktadır.

$$f_i(u) = \frac{1}{6}(u^3, u^2, u, 1) \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{i-3} \\ P_{i-2} \\ P_{i-1} \\ P_i \end{pmatrix}, \quad i \in [3, n-1] \quad (2.37)$$

Baz fonksiyonlarının doğrusal artımlı düğüm vektörüne sahip olması durumunda farklı derecelerden NURBS eğrilerini de Denklem (2.38)’de görüldüğü gibi matris formda yazmak mümkün olmaktadır.

$$f_i^p(u) = \frac{1}{6} (u^{p-1}, u^{p-2}, \dots, u^1, 1) M \begin{pmatrix} P_{i-p-1} \\ P_{i-p} \\ \vdots \\ P_{i-1} \\ P_i \end{pmatrix}, \quad i \in [p-1, n-1]$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{0,0} & \cdots & m_{0,p-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{p-1,0} & \cdots & m_{p-1,p-1} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

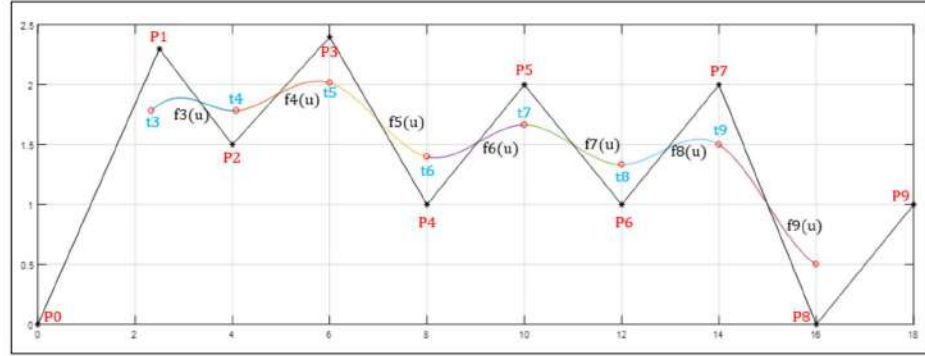
$$m_{i,j} = \frac{1}{(p-1)!} \binom{p-1}{i} \sum_{k=j}^{p-1} (p-1-k)^i (-1)^{k-j} \binom{p}{k-j}$$

Şekil 2.17’de görülen baz fonksiyonları, Denklem (2.39)’da verilen kontrol noktaları ve Denklem (2.40)’ta yer alan ağırlık vektörü ile işleme alınarak, X-Y uzayında Şekil 2.20’de görüldüğü gibi örnek bir NURBS eğrisi elde edilmiştir.

$$X \text{ Kontrol Noktası: } [0, 2.5, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0] \quad (2.39)$$

$$Y \text{ Kontrol Noktası: } [0, 2.3, 1.5, 2.4, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 0.0, 1.0]$$

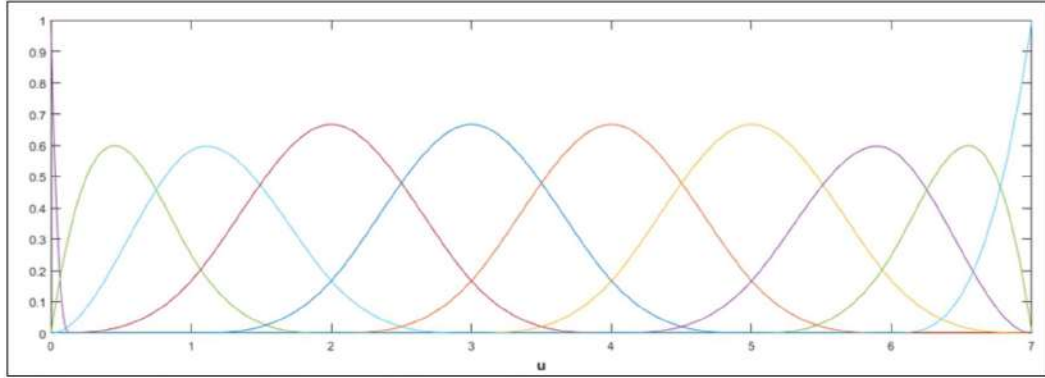
$$W: [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0] \quad (2.40)$$



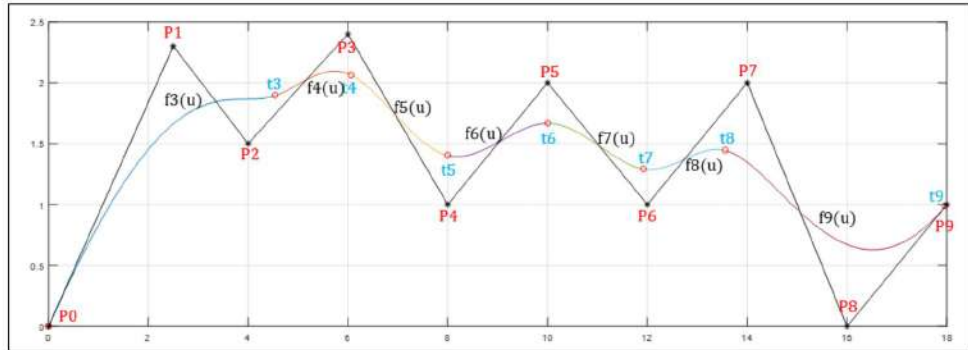
Şekil 2.20. Yedi segmentli NURBS eğrisi (uniform baz fonksiyonlu)

Şekil 2.20’de görüldüğü üzere on kontrol noktası için yedi tane kübik segment fonksiyonları ardışık olarak birleşerek NURBS eğrisini oluşturmuşlardır. Bir NURBS eğrisinin düğüm vektörünün değişmesi sonucunda kontrol noktaları aynı kalsa dahi eğrinin fonksiyonu değişmektedir. Şekil 2.21’de, Şekil 2.20’deki NURBS eğrisi ile aynı kontrol noktalarına fakat farklı düğüm vektörüne sahip bir NURBS eğrisine ait baz fonksiyonları, Şekil 2.22’de ise segmentlerin toplamı sonucu ortaya çıkan NURBS

eğrisi verilmiştir. Yeni oluşturulan baz fonksiyonları, Şekil 2.21’de dikkat edileceği üzere eş değer değildir. Bunun nedeni düğüm vektörünün doğrusal artımlı (uniform) değil düzensiz artan (non-uniform) yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca kübik NURBS eğrisinin ilk ve son dört düğüm vektör elemanının aynı olması durumunda NURBS eğrisinin başlangıç ve bitiş noktaları Şekil 2.20’deki NURBS eğrisinin aksine kontrol noktaları ile kesiştiği görülmektedir (Şekil 2.22).



Şekil 2.21. Nonuniform kübik baz fonksiyonları (düğüm vektörü: [0 0 0 0 1 2 3 4 5 6 7 7 7 7])

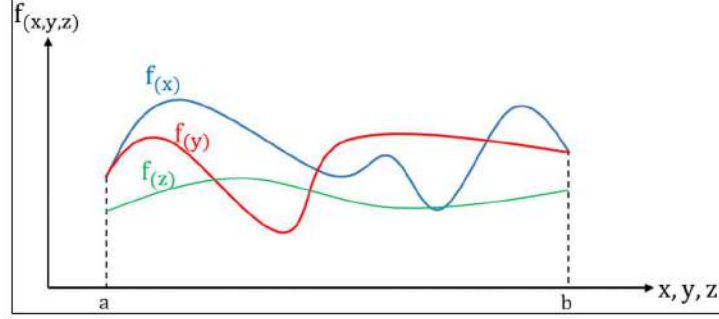


Şekil 2.22. Yedi segmentli NURBS eğrisi (nonuniform baz fonksiyonlu)

2.3.2. NURBS eğrisinin boyu

Doğrusal ve dairesel hareketlerde olduğu gibi NURBS eğrisel hareketlerde de Kartezyen uzaydaki X-Y-Z eksen yörüngeleri hareket boyuna göre üretilmektedir. Bu nedenle eğrisel yörünge için Kartezyen uzaydaki hareket miktarının hesaplanması gereklidir. Örneğin X-Y-Z uzayında oluşan eğrisel bir hareketin eksen yörüngeleri Şekil 2.23’te görüldüğü gibi varsayalım. Bu eğrisel hareketin boyu normalde Denklem (2.41) eşitliği ile bulunabilmektedir. Fakat NURBS eğrisinin çok sayıda parçalı

fonksiyondan oluşması eğri boyunun analitik olarak Denklem (2.41) ile hesaplanmasını zorlaştırmaktadır.



Şekil 2.23. a-b zaman aralığında eksen fonksiyonları

$$L = \int_a^b \sqrt{f'(x)^2 + f'(y)^2 + f'(z)^2} \quad (2.41)$$

NURBS eğrisinin yapısı gereği oluşan hesaplama yoğunluğunun önüne geçilmesi için literatürde sayısal (numerical) eğri boyu hesaplama yöntemleri önerilmiştir. Bu sayısal yöntemlerin en başında ise Simpson kuralı gelmektedir [70]. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında Simpson fonksiyonun daha çok B-spline eğrilerinin boy hesabında kullanıldığı görülmektedir. Fakat NURBS eğrilerinde bulunan ağırlık vektörü (özellikle yüksek ağırlık değerlerinde) Simpson kuralının hesaplama performansını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle tez çalışmasında NURBS eğrisinin boy hesabında Kompozit Simpson Kuralı (Composite Simpson's Rule) kullanılmaktadır. Aslında Kompozit Simpson Kuralı, bir fonksiyona aralıklı (sayısal) integrasyon işlemi uygulanmasını sağlamaktadır. Eğrinin boy hesabı için kullanılan Denklem (2.41)'deki eşitliğin sürekli değil de aralıklı parametrelerle hesaplanabilmesinde sayısal integrasyon yöntemlerinden birisi olan Kompozit Simpson Kuralının kullanılması büyük avantaj sağlamaktadır. Kompozit Simpson fonksiyonu $S(f,h)$ ile ifade edilmekte ve Denklem (2.42)'de yer alan eşitlikle tanımlanmaktadır.

$$S(f,h) = \frac{h}{3} \sum_{k=1}^M (f(x_{2k-2}) + 4f(x_{2k-1}) + f(x_{2k})) \quad (2.42)$$

Denklemdede; $h = \frac{(b-a)}{2M}$, $x_k = a + kh, k = 0,1 \dots 2M$ olarak kabul edilmektedir. Denklem (2.42)'deki eşitlikle genişletilirse, $S(f, h)$ fonksiyonu Denklem (2.43)'e dönüşmektedir.

$$S(f, h) = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + \dots + 2f_{2M-2} + 4f_{2M-1} + f_{2M})$$

$$S(f, h) = \frac{h}{3} (f_a + f_b) + \frac{2h}{3} \sum_{k=1}^{M-1} f(x_{2k}) + \frac{4h}{3} \sum_{k=1}^M f(x_{2k-1}) \quad (2.43)$$

Denklem (2.43)'te yer alan son eşitlik, bir fonksiyonun $2M$ kadar aralıklara bölünmesi sonucu ortaya çıkan integrasyon hesabıdır. Dolayısıyla Denklem (2.44)'te görüldüğü gibi sürekli integral işlemini temsil etmektedir.

$$\int_a^b f(x) dx \approx S(f, h) \quad (2.44)$$

Denklem (2.41) üzerinden belirtildiği üzere NURBS eğrisinin boy hesabı için eğrinin türev fonksiyonlarına ihtiyaç vardır. NURBS eğrisine ait kübik baz fonksiyon türev eşitlikleri Denklem (2.45)'te görüldüğü gibi elde edilmektedir.

$$B'_{0,4}(t) = \begin{cases} \frac{3t^2 - 6t(t_0) + 3t_0^2}{(t_1 - t_0)(t_2 - t_0)(t_3 - t_0)} \\ \frac{2t_2t - 3t^2 - 2t_0t_2 + 4tt_0 - t_0^2}{(t_2 - t_0)(t_2 - t_1)(t_3 - t_0)} + \frac{2tt_3 - 3t^2 - t_0t_3 + 2tt_0 - t_0t_3 + 2tt_1 - t_1t_0}{(t_3 - t_1)(t_2 - t_1)(t_3 - t_0)} + \frac{2tt_4 - 3t^2 + 2t_1 - t_1^2}{(t_2 - t_1)(t_3 - t_1)(t_4 - t_1)} \\ \frac{t_3^2 - 4t_3 + 2t_3t_0 + 3t^2 - 2tt_0}{(t_3 - t_1)(t_3 - t_2)(t_3 - t_0)} + \frac{t_3t_4 - 2tt_3 + t_1t_3 - 2tt_4 + 3t^2 + t_1t_4 - 2tt_1}{(t_3 - t_1)(t_3 - t_2)(t_4 - t_1)} + \frac{t_4^2 - 4tt_4 + 2t_2t_4 + 3t^2 - 2tt_2}{(t_4 - t_2)(t_3 - t_2)(t_4 - t_1)} \\ \frac{-3t_4^2 + 6t_4 - 3t^2}{(t_4 - t_2)(t_4 - t_3)(t_4 - t_1)} \\ 0 \end{cases} \quad (2.45)$$

Her iki düğüm vektörü arasında kalan taralı alan fonksiyonları ise Denklem (2.46)'da gösterilmiştir.

$$B'_{i,4}(u) = \frac{-3u_4^2 + 6u \cdot u_4 - 3u^2}{(u_4 - u_2)(u_4 - u_3)(u_4 - u_1)} \quad (2.46)$$

$$B'_{i-1,4}(u) = \frac{u_3^2 - 4u_3 + 2u_3u_0 + 3u^2 - 2u(u_0)}{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2)(u_3 - u_0)} + \frac{u_3u_4 - 2u(u_3) + u_1u_3 - 2u(u_4) + 3u^2 + u_1u_4 - 2u(u_1)}{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2)(u_4 - u_1)} + \frac{u_4^2 - 4u(u_4) + 2u_2u_4 + 3u^2 - 2u(u_2)}{(u_4 - u_2)(u_3 - u_2)(u_4 - u_1)}$$

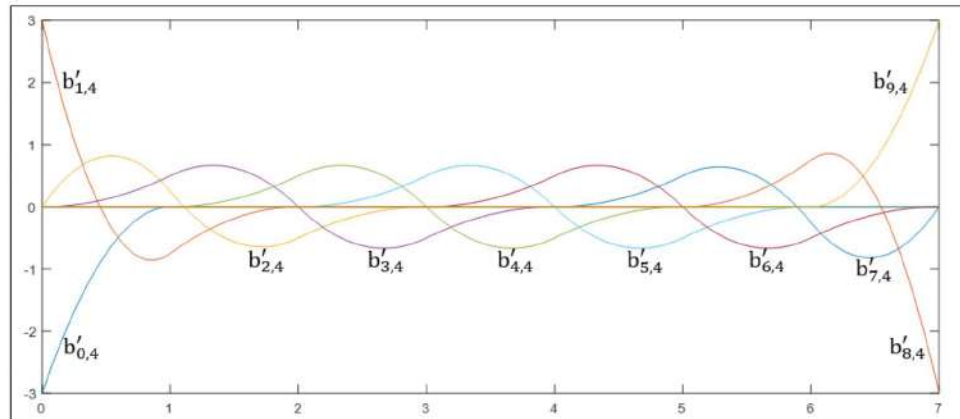
$$B'_{i-2,4}(u) = \frac{2u_2u - 3u^2 - 2u_0u_2 + 4u(u_0) - u_0^2}{(u_2 - u_0)(u_2 - u_1)(u_3 - u_0)} + \frac{2u(u_3) - 3u^2 - u_0u_3 + 2u(u_0) - u_0u_3 + 2u(u_1) - u_1u_0}{(u_3 - u_1)(u_2 - u_1)(u_3 - u_0)} + \frac{2u(u_4) - 3u^2 + 2u_1 - u_1^2}{(u_2 - u_1)(u_3 - u_1)(u_4 - u_1)}$$

$$B'_{i-3,4}(u) = \frac{3u^2 - 6u(u_0) + 3u_0^2}{(u_1 - u_0)(u_2 - u_0)(u_3 - u_0)}$$

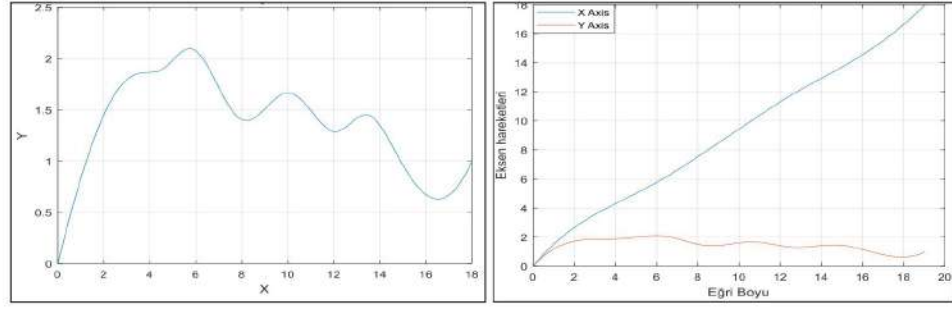
Son olarak baz fonksiyon türevleri üzerinden segment fonksiyonlarının türevleri hesaplanarak NURBS eğrisinin boy bilgisine ulaşılmaktadır.

$$f'_i(u) = \sum_{j=0}^3 \frac{B'_{i-3+j}(u)(P_{i-3+j})(w_{i-3+j})}{(P_{i-3+j})(w_{i-3+j})}, \quad u \in [u_0, u_n], i \in [3, n-1] \quad (2.47)$$

Denklem (2.46)'da yer alan fonksiyonlar kullanılarak, Şekil 2.21'deki baz fonksiyonlarının türevleri Şekil 2.24'te görüldüğü gibi bulunmuştur. Bu türev fonksiyonları Kompozit Simpson fonksiyonunda kullanılarak, Şekil 2.25-a'da görülen NURBS eğrinin boyu 19.02 mm olarak hesaplanmıştır. Bu boy bilgisi kullanılarak eksen hareketleri Şekil 2.25-b'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

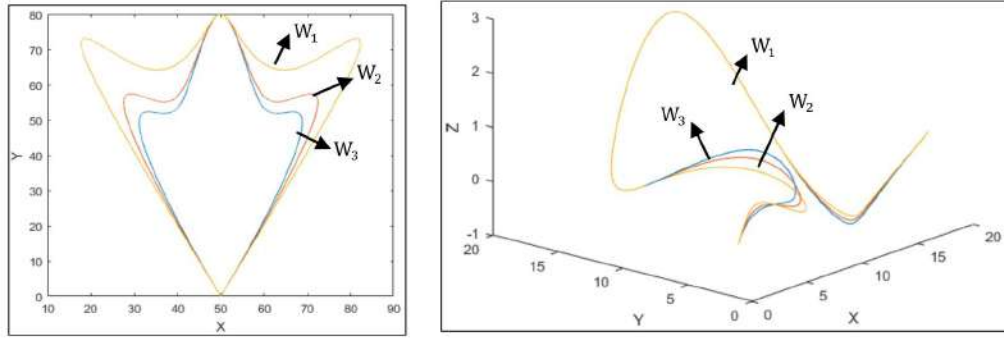


Şekil 2.24. Kübik baz fonksiyonlarının türev fonksiyonları



Şekil 2.25. (a) NURBS eğrisi (b) NURBS eğri boyuna karşılık gelen eksen hareketleri

Ayrıca klasik Simpson fonksiyonunun boy hesaplama performansının ağırlık vektör etkisinden dolayı olumsuz etkilendiği belirtilmişti. Bu durumun doğrulanması için klasik Simpson ve Komposit Simpson fonksiyonlarının eğri boyu hesaplama performansları Şekil 2.26'da yer alan NURBS eğrileri üzerinden karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.26. Ağırlık vektörünün NURBS eğrisine etkisi (a) X-Y uzayı (b) X-Y-Z uzayı

X Kontrol Noktası: [50, 100, 60, 50, 40, 0, 50]

Y Kontrol Noktası: [0, 100, 40, 100, 40, 100, 0]

Z Kontrol Noktası: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

Düğüm Vektörü: [0 0 0 0 0.25 0.5 0.75 1 1 1 1] (2.48)

W1: [1 1 1 1 1 1 1 1]

W2: [1 1 5 5 5 1 1]

W3: [1 1 10 10 10 1 1]

Şekil 2.26’da görüleceği üzere her grafikte üç farklı NURBS eğrisi bulunmaktadır. Ağırlık vektörü etkisiyle boy hesaplama performanslarının nasıl etkilendiğini görmek için, kontrol noktaları ve düğüm vektörleri aynı fakat ağırlık vektörleri farklı eğriler kullanılmıştır. Şekil 2.40-a’da yer alan X-Y uzayındaki NURBS eğrilerinin parametreleri Denklem (2.48)’de, Şekil 2.40-b’de bulunan X-Y-Z uzayındaki NURBS eğrilerinin parametreleri ise Denklem (2.49)’da verilmiştir.

X Kontrol Noktası: [0, 0, 6, 4, 1, 5, 11, 15, 12, 10, 16]

Y Kontrol Noktası: [1, 0, 0, 2, 11, 16, 16, 11, 2, 0, 0]

Z Kontrol Noktası: [0, 1, 0, 2, 0, 0, 4, 0, -1, 0, 1]

Düğüm Vektörü: [0 0 0 0 0.125 0.25 0.375 0.5 0.625 0.75 0.875 1 1 1 1] (2.49)

W1: [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]

W2: [1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 1]

W3: [1 5 5 1 1 1 1 1 1 5 5 1]

Tablo 2.4. NURBS eğri boylarının karşılaştırılması

	Gerçek Boy	Kompozit Simpson	Klasik Simpson
Şekil 2.26-(a): W1	244.9780	245.0427	246.1188
Şekil 2.26-(a): W2	200.6809	200.7528	197.6788
Şekil 2.26-(a): W3	186.7727	186.8131	181.8085
Şekil 2.26-(b): W1	47.8306	47.9098	48.6394
Şekil 2.26-(b): W2	48.8923	49.0004	50.4720
Şekil 2.26-(b): W3	50.1599	50.2316	52.9810

Şekil 2.26’da bulunan altı farklı NURBS eğrisi için hesaplanan gerçek boy değerleri ile klasik ve kompozit Simpson yöntemlerinden elde edilen boy değerleri Tablo 2.4’te verilmiştir.

$$L = \sum_{i=1}^{k-1} \sqrt{(x(i+1) - x(i))^2 + (y(i+1) - y(i))^2 + (z(i+1) - z(i))^2} \quad (2.50)$$

Tabloda verilen gerçek boy değerleri (L), NURBS eğrisinin mikro parçalara ayrıldıktan sonra Denklem (2.50) eşitliği kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Denklemde k, NURBS eğrisini bölünmüş parça sayısını, x, y ve z değerleri ise kartezyen uzayda ilgili eksenlerde oluşan vektörleri temsil etmektedir.

2.4. G05.1 Hassas İşleme Komutu

CNC tezgâhlarında G01 komutları, önceki bölümlerde de belirtildiği üzere iki farklı amaçla kullanılmaktadır. G01 komutunun öncelikli görevi noktadan noktaya doğrusal hareket yapmaktır. Bir diğer önemli görevi ise eğrisel bir hareketin mikro boylardaki parçalarını oluşturmaktır. Eğer CAM programında veya CNC kontrol ünitesinde NURBS işleme desteği yoksa ürün üzerinde işlenmesi gereken hassas yörüngeler, CAM tarafından parçalara bölünerek G-kod dosyasında G01 komutları üzerinden verilmektedir. Hassas (eğrisel) bir yörüngenin hangi parça boylarında bölünmesi gerektiğinin kararını CAM programı vermektedir. Fakat tüm CAM programları için ortak olan durum ise, G-kod dosyasının boyutunu çok artırmayacak şekilde bölme işleminin gerçekleştirilmesi olacaktır. Çünkü parça sayısının ürün üzerinde hassaslığı sağlamak için çok fazla olması, G-kod dosyasının boyutunu önemli derecede artıracaktır. Bu doğrultuda eğrisel bir yörüngeyi yüksek hassasiyette ifade edemese de parça sayısının optimum seviyede olması gerekmektedir. Bu nedenle eğrisel bir yörüngenin parçalarının yer aldığı bir G-kod dosyasındaki G01 komutlarını kullanarak hassas (pürüzsüz) bir yüzey elde etmek mümkün olmamaktadır. Ayrıca çok sayıda ardışık doğrusal hareketin tezgâhın titreşimli veya dur/kalk yaparak çalışmasına neden olması da dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelişmiş endüstriyel CNC tezgâhlarında parçalı G01 komutlarının hassas yörüngeye dönüştürülebilmesi için G05.1 komutu kullanılmaktadır. Bu komut, G-kod dosyası içinde bir analiz yapılması gerektiğini ve gerekli bölgelerde G01 komutları ile verilen noktaların bir nokta bulutu olarak kabul edilip bu nokta bulutunun eğrisel bir yörüngeye dönüştürülmesi gerektiğini ifade etmektedir. Bu nedenle G05.1 komutuna ilişkin net bir matematiksel fonksiyon tanımı bulunmamaktadır. G-kod dosya analizinin nasıl yapılacağı veya oluşturulan nokta bulutunun hangi yöntemlerle eğrisel

yörüngelere dönüştürüleceği CNC kontrol ünitesi içindeki yazılımın özeline kalmaktadır. Literatürde CNC tezgâhlarında eğri uydurma yöntemlerine ilişkin yapılmış çalışmalar Bölüm 1.1’de verilmişti. Fakat eğri uydurma işleminden önce yapılması gereken analiz işlemlerine bu çalışmalarda değinilmemiştir. Bu durumun en önemli sebebi ise akademik çalışmalar da endüstriyel G-kod dosyaları değil de daha çok kıyaslama (benchmark) dosyalarının kullanılmasıdır [71-92]. Kıyaslama dosyalarının gerçek uygulama dosyalarına göre çok küçük boyutta olması ve bu dosyalarda doğrudan nokta bulutlarının yer aldığı bilinmesinden dolayı herhangi bir analiz işlemine gerek duyulmamaktadır.

Tez çalışması kapsamında, endüstriyel CNC tezgâhı üzerinde endüstriyel G-kod dosyaları ile gerçek uygulamalar yapılacağı için G05.1 komutuna ilişkin G01 komutlarının hangi amaçla kullanıldığına yönelik özgün analiz algoritması geliştirilmiştir. Bu yöntem sonucuna göre elde edilen nokta bulutları ise NURBS eğrilerine dönüştürülerek hassas yörüngeler üretilmiştir.

2.4.1. G1 nokta bulutu analizi

Ardışık G01 doğrusal hareketlerin G-kod dosyası içinde analiz edilmesi için P_0 ve P_1 noktaları arasındaki doğrusal hareket uzunluk değeri (L_{seg}) ve iki ardışık doğrusal hareket arasında üç boyutlu uzayda oluşan açı değeri (θ) bilgileri kullanılmaktadır. Doğrusal hareket uzunluk değeri (L_{seg}) Denklem (2.51) kullanılarak bulunmaktadır.

$$L = \sum_{i=1}^{k-1} \sqrt{(x(i+1) - x(i))^2 + (y(i+1) - y(i))^2 + (z(i+1) - z(i))^2} \quad (2.51)$$

Denklemden, (x_1, y_1, z_1) birinci doğrusal hareketin bitiş noktasını, (x_2, y_2, z_2) ise ikinci doğrusal hareketin bitiş noktasını ifade etmektedir. İki ardışık doğrusal hareket arasında üç boyutlu uzayda oluşan açı değeri (θ) ise Denklem (2.52) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\theta_{(deg)} = 180 - \left(\cos^{-1} \left(\frac{(dx_{10} dx_{21}) + (dy_{10} dy_{21}) + (dz_{10} dz_{21})}{\sqrt{dx_{10}^2 + dy_{10}^2 + dz_{10}^2} * \sqrt{dx_{21}^2 + dy_{21}^2 + dz_{21}^2}} \right) \right) \frac{180}{\pi} \quad (2.52)$$

$$\mathbf{dx}_{10} = x_1 - x_0, \mathbf{dy}_{10} = y_1 - y_0, \mathbf{dz}_{10} = z_1 - z_0$$

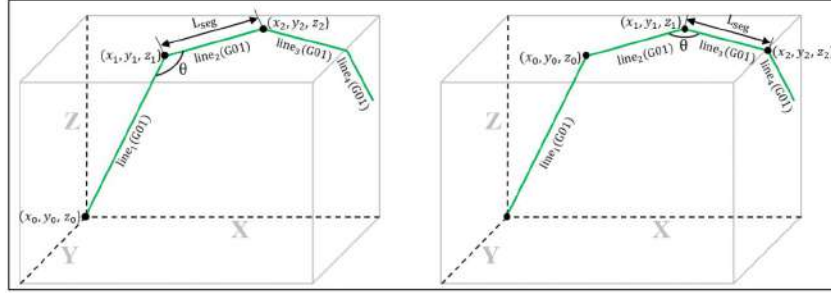
$$\mathbf{dx}_{21} = x_2 - x_1, \mathbf{dy}_{21} = y_2 - y_1, \mathbf{dz}_{21} = z_2 - z_1$$

Tablo 2.5. Nokta bulutu analiz algoritması

Step	Function PolyLineAnalyze ($x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ thrshldL, thrshldA)
1	Compute: Length of Line (output: L_{seg}) go step 2
2	Check: $L_{seg} \leq thrshldL$ IF Yes: go step 3 IF No: go step 5
3	Check: Is it first Line? IF Yes: go step 6 IF No: go step 4
4	Compute: Angle of Two Line (output: angle) Check: angle $\leq thrshldA$ IF Yes: go step 6 IF No: go step 5
5	Create: G01 Line from ($x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$) Check: Buffer List ≥ 4 IF Yes: go step 8 IF No: Check: Buffer List ≥ 1 IF Yes: go step 7 IF No: go step 9
6	Check: lengthBufferList $\leq maxBufferList$ IF Yes: Add (v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}) to BufferList IF No: go step 8 (Separate BufferList)
7	Create: G01 Lines as many as the number of BufferList Clear: BufferList go step 9
8	Create: PolyLine Group from BufferList for NURBS Clear: BufferList go step 9
9	Break Function

Oluşturulan nokta bulutları kübik NURBS eğrilerine dönüştürüleceği için en az dört doğrusal hareket parçası gereklidir. Bu nedenle hareket uzunluğu ve açı kriterlerine uygun elde edilen nokta bulutu sayısının dörtten az olmaması kontrol edilmelidir. Nokta bulutu ardışık doğrusal parçalardan oluştuğu için önerilen yöntemde nokta bulutu “polyline” olarak isimlendirilmektedir. Hareket uzunluk ve açı eşik değerleri ise thrshldL ve thrshldA değişkenleri ile tanımlanmıştır. Nokta bulutunun eğrisel yörüngelere dönüştürülmesinde matris işlem yükünün kontrol altında tutulması için analiz sürecinde kriterlere uyan doğrusal parça bilgileri bir buffer listesinde tutulmaktadır. Buffer kapasitesi eşik değerini aşması durumunda ise buffer içindeki noktalar eğrisel yörüngelere dönüştürülür ve yeni bir nokta bulutu oluşumuna başlanır. Ayrıca analiz işlemi sürerken G01 dışında bir hareket komutu ile karşılaşılması durumunda mevcut nokta bulutu listesi sonlandırılır ve yeni listeye başlanmaktadır.

Yukarıda verilen bilgiler ve analiz sürecinde oluşabilecek tüm olasılıklar düşünülerek Tablo 2.5'te görülen algoritma temeli kurulmuştur. Önerilen yöntemin daha net anlaşılması için analiz sürecinin bir ve ikinci işlem adımı açıklayıcı bir örnek üzerinden Şekil 2.27'de gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Nokta bulutu analizi işlem adımları

Yapılan analiz işlemi sonunda hassas işlenmesi gereken bölgelerdeki nokta bulutlarını kullanarak kübik NURBS eğrileri oluşturulmaktadır. Önceki bölümde belirtildiği üzere NURBS eğrileri için kontrol noktası, düğüm vektörü ve ağırlık vektörü bilgilerine ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda öncelikle nokta bulutu içindeki verilerden kontrol noktası ve düğüm vektörü değerleri hesaplanmaktadır. Nokta bulutu içindeki veri noktaları (Q_i) ile NURBS parametreleri arasındaki ilişki Denklem (2.53)'te verilmiştir.

$$C_{(t_k)} = Q_i = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} B_{i,p}(t_i) w_i P_i}{\sum_{i=0}^{n-1} B_{i,p}(t_i) w_i} \quad (2.53)$$

Denklemda ağırlık vektörü birim vektör olarak kabul edildiği için, bilinmeyen parametreler baz fonksiyonları ($B_{i,p}(t_i)$) ve kontrol noktalarıdır (P_i). Bu doğrultuda kontrol noktası, baz fonksiyonları ve veri noktaları arasında, Denklem (2.54)'te yer alan matris formdaki eşitlik kurulmaktadır.

$$P = ([B]^T[B])^{-1}[B]^T[Q] \quad (2.54)$$

Denklemda yer alan B, P ve Q parametreleri Denklem (2.55)'te görülen matris formuna sahiptirler.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ B_{0,p}(t_1) & B_{1,p}(t_1) & B_{2,p}(t_1) & \dots & B_{n-2,p}(t_1) \\ B_{0,p}(t_2) & B_{1,p}(t_2) & B_{2,p}(t_2) & \dots & B_{n-2,p}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{0,p}(t_{n-2}) & B_{1,p}(t_{n-2}) & B_{2,p}(t_{n-2}) & \dots & B_{n-2,p}(t_{n-2}) \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{n-2} \\ P_{n-1} \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{n-2} \\ Q_{n-1} \end{bmatrix}$$

Denklem (2.54) çözümünde, öncelikle baz fonksiyonlarının oluşturulması için gerekli düğüm vektörleri ve Denklem (2.55)'te baz fonksiyonları içinde kullanılan $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenlerinin bulunması gereklidir. Veri noktaları üzerinden düğüm vektörleri ve $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenlerinin tespitine yönelik farklı yöntemler bulunmaktadır.

2.4.2. Düzgün dağılımlı (uniform) düğüm vektörü yöntemi

Düzgün dağılımlı yöntemde, $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenleri $[0, 1]$ veya $[a, b]$ arasında düzgün dağılımlı olarak değer almaktadır.

$$t_0 = 0$$

$$t_i = \frac{i}{n-1}, \quad i \in [1, n-2] \quad (2.56)$$

$$t_{n-1} = 1$$

Aralığın $[0, 1]$ olması durumunda Denklem (2.56), $[a, b]$ olması durumunda ise Denklem (2.57)'de verilen eşitlikler kullanılmaktadır.

$$t_0 = a$$

$$t_i = (a + i) \frac{(b-a)}{n-1}, \quad i \in [1, n-2] \quad (2.57)$$

$$t_{n-1} = b$$

Denklem (2.56) ve (2.57)'de görüldüğü üzere, bu yöntem için önemli olan tek parametre veri noktası sayısıdır (n). Düğüm vektörleri, veri noktalarından bağımsız bulunduğu için bu yöntem ancak veri noktalarının düzgün dağılımlı olduğu yerlerde etkili sonuç vermektedir. Aksi takdirde nokta bulutu için uydurulan eğri, her veri noktasından geçse dahi ara noktalarda istenmeyen sapmalar oluşturabilmektedir. Hesaplana $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenlerine bağlı olarak NURBS eğrisine ait düğüm vektörü Denklem (2.58) ile bulunmaktadır. Denklemde NURBS eğrisinin başlangıç ve bitiş veri noktalarından geçmesi için baz fonksiyon derecesine bağlı olarak başlangıç ve bitiş düğüm vektörlerinin 0 ve 1 olmak üzere aynı değerde tekrarlandığı görülmektedir.

$$u_0 = u_1 = \dots u_{p-1} = 0$$

$$u_{j+p} = \frac{1}{p-1} \sum_{i=j}^{j+p-2} t_i \quad , \quad j \in [1, n-p-1] \quad (2.58)$$

$$u_{n-p} = u_{n-p+1} \dots = u_{n-1} = 1$$

2.4.3. Universal düğüm vektörü yöntemi

Bu yöntemde $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenleri yine veri noktalarından bağımsız bulunmaktadır. Fakat düzgün dağılımlı düğüm vektör yönteminden farklı olarak baz fonksiyon derecesi devreye girmektedir (Denklem (2.59)). Bu yöntem düzgün dağılımlı düğüm vektörüne göre daha iyi sonuç verse de, veri noktaları kullanılmadığı için nokta bulutunun yapısına göre bazı bölgelerde yine istenmeyen sapmalar meydana gelebilmektedir. Hesaplana $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenlerine bağlı olarak NURBS eğrisine ait düğüm vektörleri Denklem (2.58) kullanılarak bulunmaktadır.

$$t_0 = 0$$

$$t_i = \frac{i}{n-p+1} \quad , \quad i \in [1, n-2] \quad (2.59)$$

$$t_{n-1} = 1$$

2.4.4. Kiriş uzunluğuna (chord length) bağlı düğüm vektörü yöntemi

Bu yöntemde her iki veri noktası arasındaki uzunluk miktarı ($|Q_i - Q_{i-1}|$) kiriş uzunluğu ile ifade edilmekte ve tüm veri noktaları arasındaki kiriş uzunlukları toplamı Denklem (2.60) eşitliği ile bulunmaktadır.

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} |Q_i - Q_{i-1}| \quad (2.60)$$

$(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenlerinin kiriş uzunluğuna bağlı $[0, 1]$ arasında normalize edilmesi için Q_0 noktasından Q_k noktasına kadar olan kiriş uzunlukları Denklem (2.61)'de görüldüğü gibi kiriş uzunlukları toplamına oranlanmaktadır.

$$L_i = \frac{\sum_{i=1}^k |Q_i - Q_{i-1}|}{L} \quad (2.61)$$

Kiriş oranları son olarak, Denklem (2.62)'de kullanılarak $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişken değerleri hesaplanmaktadır. Düğüm vektör değerleri ise $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenlerine bağlı olarak yine Denklem (2.58) üzerinden tespit edilmektedir. Düğüm vektörlerinin kiriş uzunluğu temelinde bulunması veri noktalarının düzensiz dağılımlı olması durumunda bile etkili bir eğri uydurma performansı göstermektedir.

$$t_0 = 0$$

$$t_k = L_i \quad , \quad i \in [1, n - 2] \quad (2.62)$$

$$t_{n-1} = 1$$

2.4.5. Merkezil (centripetal) düğüm vektörü yöntemi

Bir eğri üzerinde eğrilik yarıçaplarının düşmesi o bölgelerin daha hassas işlenmesi gerektiğini göstermektedir. Nokta bulutu içerisindeki veri noktalarının bir NURBS eğrisine dönüştürülmesinde hassaslık etkisinin dâhil olabilmesi için merkezil düğüm vektörü yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem aslında kiriş uzunluk yönteminin gelişmiş versiyonudur. Kiriş uzunluğu bu yöntemde Denklem (2.63)'te görüldüğü gibi üstel α katsayısına bağlı hesaplanmaktadır. α kat sayısı genel olarak $\frac{1}{2}$ değeri ile kullanıldığı için, Denklem (2.63)'teki eşitlik Denklem (2.64) eşitliğine dönüşmektedir.

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} |Q_i - Q_{i-1}|^\alpha \quad (2.63)$$

$$L = \sum_{k=1}^{n-1} \sqrt{Q_i - Q_{i-1}} \quad (2.64)$$

$(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenleri ise, hesaplanan L değeri kullanılarak Denklem (2.65)'te görüldüğü gibi elde edilmektedir. Son olarak düğüm vektörü, $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenlerine bağlı olarak Denklem (2.58) eşitlikleri yardımıyla oluşturulmaktadır. Merkezci düğüm vektör yönteminde, veri noktaları arasındaki ilişkiye karşı kiriş uzunluğu yöntemine göre daha duyarlı olduğu için eğri uydurma performansı da ona göre artmaktadır. Tüm eğri uydurma yöntemlerinde, eğri veri noktaları üzerinden geçmesine rağmen ara noktalardaki eğri yörüngesinin kalitesi düğüm vektörü yönteminin etkinliğine bağlıdır. Bu doğrultuda detayları verilen yöntemler arasında, CNC tezgâhları açısından en etkili eğri uydurma yöntemini merkezci yöntem olduğu söylenebilir. Belirtilen yöntemlerin karşılaştırılması bir sonraki bölümde açıklayıcı bir örnek üzerinde gösterilmiştir.

$$t_0 = 0$$

$$t_i = t_{i-1} + \frac{\sqrt{Q_i - Q_{i-1}}}{L}, \quad i \in [1, n - 2] \quad (2.65)$$

$$t_{n-1} = 1$$

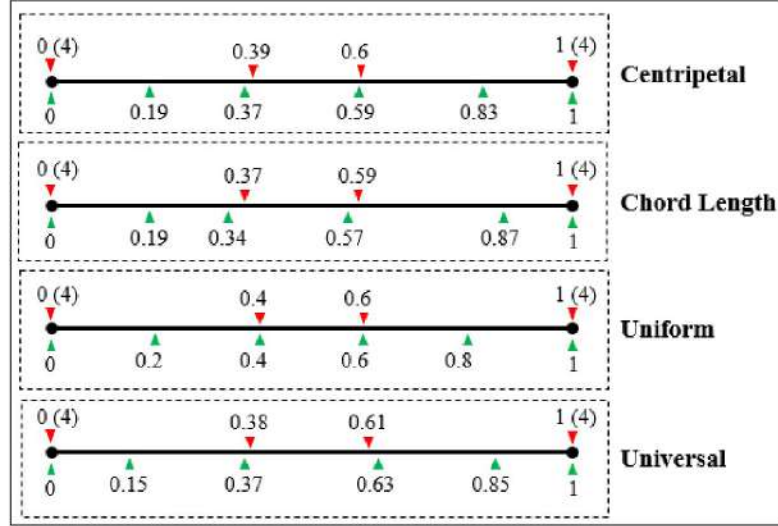
2.4.6. Yöntemlerin karşılaştırılması

Düğüm vektörü yöntemlerinin bir uygulama üzerinde karşılaştırılması için, Denklem (2.66)'da görülen veri noktaları kullanılmıştır. Üç boyutlu uzayda eğrilerin karşılaştırılması çok anlaşılır olmayacağı için kullanılan veri noktaları X - Y uzayında seçilmiştir.

$$(X, Y)^1: \{ (0,0), (5,2), (2,5), (6,0), (10,7), (13,5) \} \quad (2.66)$$

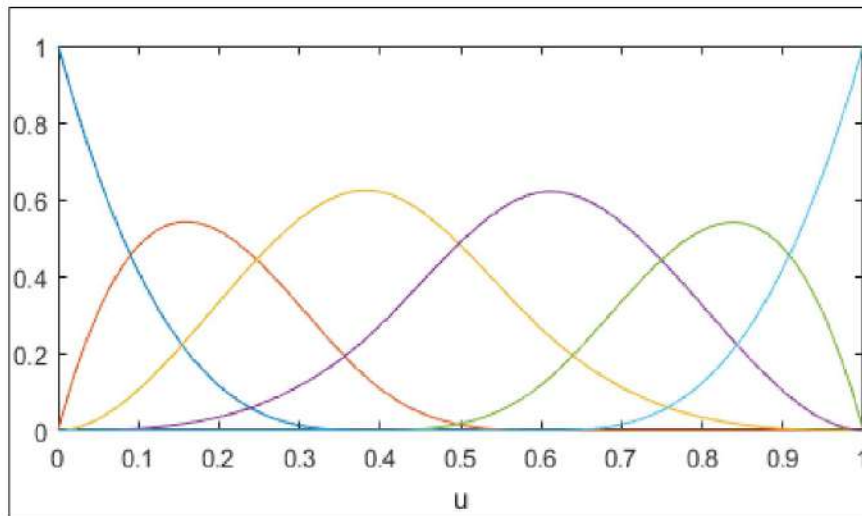
Yapılacak işlem adımlarına göre öncelikle $(t_0 \dots t_{n-1})$ değişkenleri ve düğüm vektörleri Şekil 2.28'de görüldüğü gibi bulunmuştur. Şekilde kırmızı ok ile gösterilen

değerler düğüm vektör öğelerini, yeşil ok ile gösterilenler ise $(t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)$ değişkenlerini ifade etmektedir. Şekil 2.28’de görüldüğü üzere her bir yöntem için bulunan değerler farklılık göstermektedir.



Şekil 2.28. Düğüm vektörü yöntemlerinin karşılaştırılması

Düğüm vektörlerinin bulunmasıyla birlikte Şekil 2.29’da görülen kübik baz fonksiyonları $(B_{0,4}, \dots, B_{5,4})$ oluşturulmaktadır. Kübik baz fonksiyonları kullanılarak B matrisi Denklem (2.67)’de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. Denklem (2.67)’de yer alan B matrisi, merkezci (centripetal) yöntemi ile elde edilen düğüm vektörü elemanlarıyla Denklem (2.68)’de örnek olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.29. Merkezci yöntem için oluşturulan kübik baz fonksiyonları

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{0,4}(t_1) & B_{1,4}(t_1) & B_{2,4}(t_1) & B_{3,4}(t_1) & B_{4,4}(t_1) & 0 \\ B_{0,4}(t_2) & B_{1,4}(t_2) & B_{2,4}(t_2) & B_{3,4}(t_2) & B_{4,4}(t_2) & 0 \\ B_{0,4}(t_3) & B_{1,4}(t_3) & B_{2,4}(t_3) & B_{3,4}(t_3) & B_{4,4}(t_3) & 0 \\ B_{0,4}(t_4) & B_{1,4}(t_4) & B_{2,4}(t_4) & B_{3,4}(t_4) & B_{4,4}(t_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{0,4}(0.19) & B_{1,4}(0.19) & B_{2,4}(0.19) & B_{3,4}(0.19) & B_{4,4}(0.19) & 0 \\ B_{0,4}(0.37) & B_{1,4}(0.37) & B_{2,4}(0.37) & B_{3,4}(0.37) & B_{4,4}(0.37) & 0 \\ B_{0,4}(0.59) & B_{1,4}(0.59) & B_{2,4}(0.59) & B_{3,4}(0.59) & B_{4,4}(0.59) & 0 \\ B_{0,4}(0.83) & B_{1,4}(0.83) & B_{2,4}(0.83) & B_{3,4}(0.83) & B_{4,4}(0.83) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0840 & 0.4751 & 0.3929 & 0.0480 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1141 & 0.6284 & 0.2575 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3001 & 0.6134 & 0.0865 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0375 & 0.3440 & 0.5004 & 0.1180 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Son olarak ise kontrol noktaları, B ve Q matrisi üzerinden Denklem (2.69)'da yer alan matris eşitliği ile üretilmektedir. Denklem (2.68)'deki B matrisi için, kontrol noktaları (P_x, P_y, P_z) değerlerine Denklem (2.70)'de görüldüğü gibi ulaşılmıştır. Veri noktaları X-Y uzayında seçildiği için Z eksenindeki kontrol noktaları (P_z) sıfır değerini almışlardır. Her bir yöntem için bu işlem adımları tekrarlanmış ve dört farklı P ve B matrisleri elde edilmiştir.

$$P = ([B]^T[B])^{-1}[B]^T[Q] \quad (2.69)$$

$$P_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 10.821 \\ -2.785 \\ 9.331 \\ 9.572 \\ 13 \end{bmatrix}, \quad P_y = \begin{bmatrix} 0 \\ -3.001 \\ 11.503 \\ -7.595 \\ 13.99 \\ 5 \end{bmatrix}, \quad P_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

Nokta bulutunun bir NURBS eğrisine dönüştürülmesi için gerekli tüm parametrelerin bulunmasından sonra ise bir önceki bölümde anlatılan NURBS eğrisel fonksiyonları işleme alınarak NURBS eğrisi oluşturulmaktadır. Yapılan işlem adımlarından sonra Denklem (2.66)'daki veri noktaları için dört farklı yöntemle uydurulan eğriler Şekil

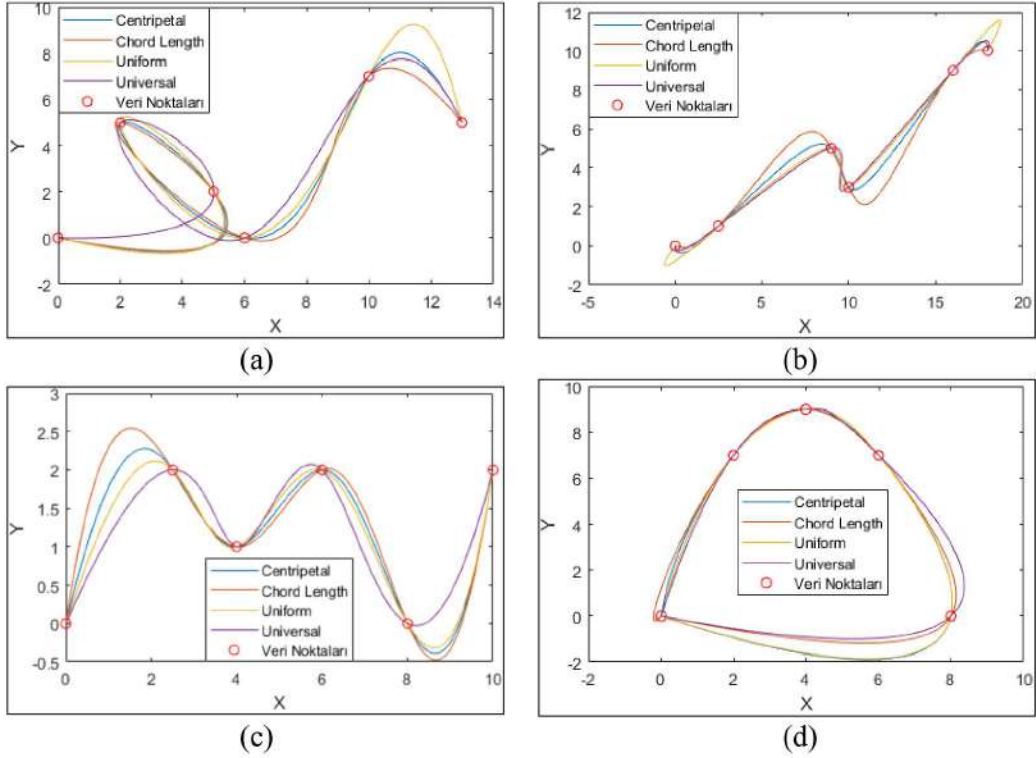
2.30-a'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere her yöntem için oluşturulan eğriler de gözle görülür farklılıklar bulunmaktadır. Tüm eğriler ver noktalarından geçse dahi ara noktalarındaki yörüngeleri farklı davranışlar göstermektedir. Bu farklı davranışlar farklı veri noktaları için değişkenlik gösterdiği için Denklem (2.66)'daki veri noktasına ek olarak üç farklı veri noktası içinde yöntem karşılaştırması yapılmıştır. Bu uygulamalarda kullanılan veri noktaları Denklem (2.71)'de verilmiştir.

$$(X, Y)^2: \{ (0,0), (2.5,1), (9,5), (10,3), (16,9), (18,10) \}$$

$$(X, Y)^3: \{ (0,0), (2.5,2), (4,1), (6,2), (8,0), (10,2) \} \quad (2.71)$$

$$(X, Y)^4: \{ (0,0), (2,7), (4,9), (6,7), (8,0), (0,0) \}$$

Denklemdaki ver noktaları yine her yöntem için ayrı ayrı NURBS eğrilerine dönüştürülmüş ve Şekil 2.30 b-d'de $(X, Y)^2$, $(X, Y)^3$ ve $(X, Y)^4$ için sırasıyla verilmiştir.



Şekil 2.30. Düğüm vektör yöntemlerinin NURBS eğrisine etkisi

CNC tezgâhlarında işlenecek ürünün G-kod dosyasındaki nokta bulutlarından çok fazla sapma yapmaması beklenir. Yani ara noktalarındaki yörünge davranışı önemlidir. Bu nedenle düğüm vektörü yöntemleri içinde doğru seçim yapılması önemlidir.

Uydurulan NURBS eğrisinin boyu veri noktaları arasındaki yörüngeye ilişkin bir yorum imkânı tanımaktadır. Eğri boyunun nokta bulutu içindeki toplam kiriş uzunluğundan çok fazla sapma yapmaması, eğrinin ara noktadaki yörüngesinin daha istenilir seviyede olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Şekil 2.30'daki tüm NURBS eğrileri için boy hesaplaması yapılmış ve Tablo 2.6'da karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.6. NURBS eğri boylarının karşılaştırılması

	Toplam Kiriş Uzunluğu	Centripetal	Chord Length	Uniform	Universal
Şekil 2.30-a	27.698	31.329	31.690	34.771	30.840
Şekil 2.30-b	23.282	25.122	26.855	29.391	25.376
Şekil 2.30-c	12.898	14.445	15.111	14.057	13.407
Şekil 2.30-d	28.217	29.954	29.774	29.948	29.276

Karşılaştırma sonuçları Universal ve Centripetal yöntemlerinin daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu yöntemler arasında en güvensiz olanı ise Uniform düğüm vektörü yöntemi olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda tez çalışması kapsamında hem eğri uydurma performans sonuçlarının iyi olması hem de yöntem için de doğrudan veri noktalarını kullanması yönlerinden Centripetal yöntemi tercih edilmiştir.

3. HIZ PLANLAMA VE YÖRÜNGE İNTERPOLASYON ALGORİTMALARI

CNC-Freze tezgâhlarında kesici takımın ilerleme hızının kontrol altında tutulması, tezgâhın titreşimsiz çalışması, işlenen ürün yüzeyinin kalitesi, kesici takımın çalışma süresinin artırılması yönlerinden tezgâh kontrolünde önemli bir yere sahiptir. CAM programları G-kod dosyası oluşturulurken, işlenen malzemeye ve iş milinin devrine göre F değişkeni üzerinden bir hız değeri belirlemektedir. Bu doğrultuda, ilgili satırdaki G kodu işlenirken, G-kod dosyasında verilen F değerine bağlı kalmak hedeflenen ürün çıktısına ulaşmak için çok önemlidir. Bu bölümde, bir önceki bölümde hareket komutlarına ilişkin elde edilen yörüngelerin, hedeflenen hız profillerine uygun eksen motorlarına gönderilmesi için gerekli işlemler yapılmaktadır. G-kod dosyaları yüzlerce veya binlerce satırdan oluşmaktadır ve her hareket komutu kendi içinde farklı hız planlama işleminin uygulanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında ortak yöntemlerin kullanılmasının yanında her hareket komutu için özel hız planlama algoritması geliştirilmiştir.

3.1. G01 Komutu için Yörünge Planlamasının Yapılması

Literatürde ardışık doğrusal hareketler, doğrusal segmentlerin birleşme noktalarından dolayı süreksiz hareketler olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, sürekli hareketler elde etmek için köşe yumuşatma ve eğri uydurma yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmaların ortak amacının, bağlantı noktalarında ilerleme hızı dalgalanmalarını ve süreksizliklerini önlemek olduğu ifade edilebilir. Ancak bu yöntemlerin temel sorunu, G-Kod dosyasındaki ana yörüngeyi değiştirilmesidir. Doğrusal hareketlerin sürekli yolun bir parçası olmadığı ve bu durumun doğru parçaları arasında sonsuz bağlantılara neden olabileceği düşünülürse, işlenen ürünün G-Kod dosyasına bağlı olarak, hareket geçişleri keskin veya yumuşak olabilir. Bu nedenle ilerleme hız profilleri, doğrusal hareket geçişlerinin durumuna ve motorların ivmelenme kapasitesine göre tasarlanmalıdır.

Bu çalışmada, noktadan noktaya hareket için kullanılan G01 komutları için yeni bir ilerleme hız planlama algoritması geliştirilmiştir. Bu yöntemin ana katkısı, ana yürümede değişiklik olmamasının yanında ilerleme hızı profillerinin sürekli kalmasıdır. Ayrıca, önerilen denklemler ile doğrusal segmentlerin birleşme noktasındaki ilerleme hız değeri hesaplanmaktadır. Bu denklemler, hem kesici takımın bağlantı noktalarında durmasını engellemekte hem de eksen motorlarının maksimum ivme değerlerinin altında kalmasını sağlamaktadır. Öncelikle, doğrusal segmentlerin uzunlukları Denklem (3.1) ile ayrı ayrı bulunmaktadır.

$$L_{seg1} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (3.1)$$

$$L_{seg2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Doğrusal hareketlerin uzunluklarının hesaplanmasından sonra, her eksen hareketi kartezyen uzaydaki doğrusal hareketlerin yüzdesi olarak Denklem (3.2) eşitlikleri ile elde edilmektedir. CNC tezgâhının kinematik konfigürasyonuna ve eksen sayısına bağlı olarak eksen isimlerinde değişiklik olabileceği için klasik x, y ve z eksenlerinin yanında, * sembolü ile diğer eksenler ifade edilmiştir.

$$\%L_{x1} = \frac{(x_1 - x_0) 100}{L_{seg1}}, \%L_{y1} = \frac{(y_1 - y_0) 100}{L_{seg1}}, \%L_{z1} = \frac{(z_1 - z_0) 100}{L_{seg1}}, \dots, \%L_{*1} = \frac{(*_1 - *_0) 100}{L_{seg1}} \quad (3.2)$$

$$\%L_{x2} = \frac{(x_2 - x_1) 100}{L_{seg2}}, \%L_{y2} = \frac{(y_2 - y_1) 100}{L_{seg2}}, \%L_{z2} = \frac{(z_2 - z_1) 100}{L_{seg2}}, \dots, \%L_{*2} = \frac{(*_2 - *_1) 100}{L_{seg2}}$$

Önerilen yöntemin en önemli parametrelerinden birisi eksen motorlarının maksimum ivmelenme ($\alpha_{xMax}, \alpha_{yMax}, \dots, \alpha_{*Max}$) değerleridir. Bu parametreler, iki doğrusal hareket arasındaki geçişte, eksen motorlarının hangi hız farklarına ulaşabildiğini göstermektedir. Birinci doğrusal hareketin bitiş noktasındaki eksen hızları ($V_{ex1}, V_{ey1}, V_{ez1}, V_{e*1}$) ile ikinci doğrusal hareketin başlangıç noktasındaki eksen hız değerleri ($V_{sx2}, V_{sy2}, V_{sz2}, V_{s*2}$) arasındaki maksimum fark değerleri Denklem (3.3)'te görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. Denklemde, T_s : eksen veri yenileme hızını, C: dönüşüm katsayısını ifade etmektedir. Eğer tezgâh üzerindeki eksenler doğrusal ise, C değeri vidalı mil adım değeri ile bulunmaktadır. Eksenlerin döner olması durumunda ise, C değeri motor ve dişli kutusu arasındaki dişli oran değeri ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}
V_{x\text{MaxGap}} &= |V_{sx2} - V_{ex1}| = \frac{(\alpha_{x\text{Max}}) (T_s)}{C_x} \\
V_{y\text{MaxGap}} &= |V_{sy2} - V_{ey1}| = \frac{(\alpha_{y\text{Max}}) (T_s)}{C_y} \\
V_{z\text{MaxGap}} &= |V_{sz2} - V_{ez1}| = \frac{(\alpha_{z\text{Max}}) (T_s)}{C_z} \\
V_{*\text{MaxGap}} &= |V_{s*2} - V_{e*1}| = \frac{(\alpha_{*\text{Max}}) (T_s)}{C_*}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

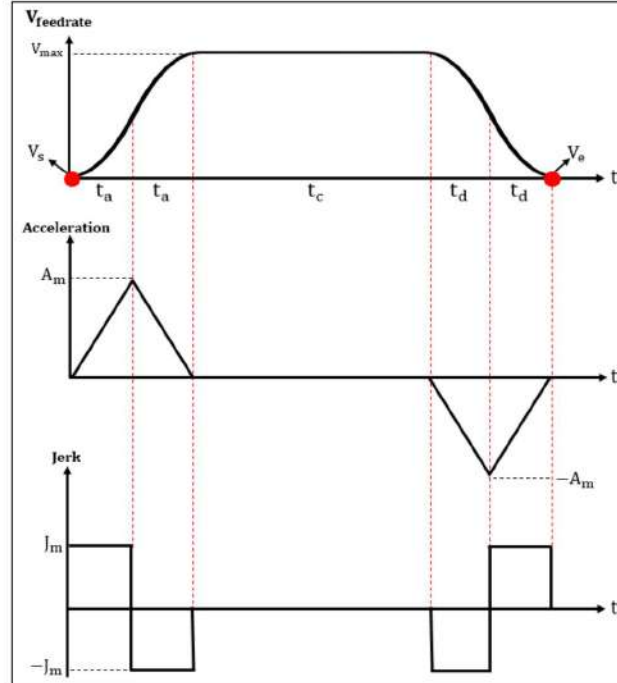
Eksen motoru eksene doğrudan hareket veriyorsa yani ara bir eleman kullanılmamış ise $C=1$ olarak kullanılmaktadır. Her eksen için ayrı ayrı hesaplanan maksimum hız farkları kullanılarak kesişim noktasındaki hız değerleri ($V_{ex}, V_{ey}, V_{ez}, V_{e*}$) Denklem (3.4) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}
V_{x\text{MaxGap}} &= \%(|L_{x1} - L_{x2}|)(V_{ex}) \rightarrow V_{ex} = \frac{(V_{x\text{MaxGap}}) (100)}{|L_{x1} - L_{x2}|} \\
V_{y\text{MaxGap}} &= \%(|L_{y1} - L_{y2}|)(V_{ey}) \rightarrow V_{ey} = \frac{(V_{y\text{MaxGap}}) (100)}{|L_{y1} - L_{y2}|} \\
V_{z\text{MaxGap}} &= \%(|L_{z1} - L_{z2}|)(V_{ez}) \rightarrow V_{ez} = \frac{(V_{z\text{MaxGap}}) (100)}{|L_{z1} - L_{z2}|} \\
V_{*\text{MaxGap}} &= \%(|L_{*1} - L_{*2}|)(V_{e*}) \rightarrow V_{e*} = \frac{(V_{*\text{MaxGap}}) (100)}{|L_{*1} - L_{*2}|}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Hesaplanan $V_{ex}, V_{ey}, V_{ez}, V_{e*}$ değerleri, Denklem (3.5)'te kullanılarak kartezyen uzaydaki iki ardışık doğrusal hareket arasındaki hız değeri (V_e) tespit edilmektedir. Bulunan V_e değeri birinci doğrusal hareketin bitiş hızı aynı zamanda da ikinci doğrusal hareketin başlangıç hızı olarak kullanılmaktadır. Denklemde V_{max} parametresi G-kod dosyasında verilen hız değerine eşittir.

$$V_e = \begin{cases} \min(V_{ex}, V_{ey}, V_{ez} \dots V_{e*}) & \text{if } (\min(V_{ex}, V_{ey}, V_{ez} \dots V_{e*}) \leq V_{\text{max}}) \\ V_{\text{max}} & \text{diğer} \end{cases} \tag{3.5}$$

Bulunan V_e değerine bağlı olarak kesici takım için bir hız planlaması yapılması gereklidir. Bu kapsamda, tezgâhın hesaplanan hız değerlerinde titreşimsiz çalışmasını sağlamak amacıyla jerk (J) ve hızlanma/yavaşlama (ACC/DCC) sınırlamalı ilerleme hızı profili tasarımı yapılmıştır. Kullanılan hız profillerinin jerk ve ivme sınırlandırma özelliği olmasının yanında, jerk her noktada sabit tutularak olası tezgâh titreşimlerinin önüne geçilmektedir. Jerk ve ivme sınırlandırılmalı hız profilleri Bezier, B-spline, NURBS eğrileri başta olmak üzere birçok eğrisel yörüngeler için farklı yapılarda oluşturulabilmektedir [25]. Şekil 3.1’de, beş parçalı sabit jerkli ve hız/jerk sınırlandırılmalı hız profili ve buna bağlı oluşan ivme ve jerk profilleri görülmektedir. Şekildeki grafiklerin oluşmasında hızlanma zamanı (t_a), sabit hız zamanı (t_d) ve yavaşlama zamanı (t_c) değerleri büyük öneme sahiptir. Bu zaman değerleri, oluşturulan hız profilinde meydana gelen jerk ve ivmeyi her zaman maksimum jerk ve ivme değerlerinin altında tutmaktadır. Şekil 3.1’de verilen hız profili (Profil1), ilk iki parçası hızlanma, bir parçası sabit hız ve son iki parçası da yavaşlanma olmak üzere toplamda beş parçadan oluşmaktadır. Fakat doğru boyuna ve başlangıç/bitiş hız değerlerine (V_s/V_e) bağlı olarak hız profil seçimi değişiklik gösterebilir.

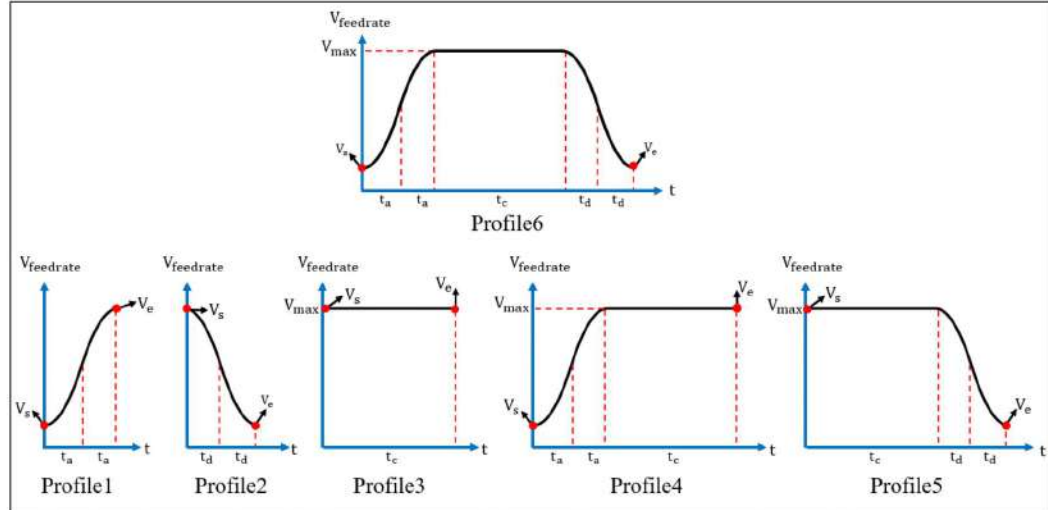


Şekil 3.1. Jerk ve ivme sınırlandırılmalı hız profili

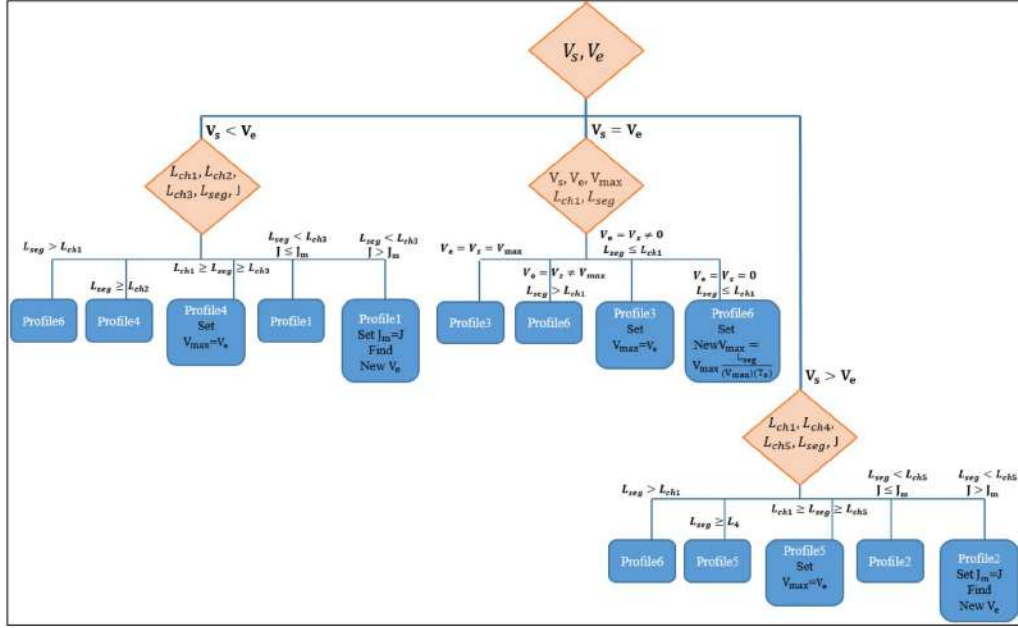
Tablo 3.1. Hız, ivme ve jerk denklemleri

Jerk	İvme	Kesici takım ilerleme hızı
$j_1 = J_m, 0 \leq \tau < t_a$	$a_1 = J_m \tau, 0 \leq \tau < t_a$	$f_1 = f_0 + \frac{1}{2} J_m \tau^2, 0 \leq \tau < t_a$
$j_2 = -J_m, 0 \leq \tau < t_a$	$a_2 = -A_m - J_m \tau, 0 \leq \tau < t_a$ ($A_m = J_m t_a$)	$f_2 = f_{1s} + A_m \tau - \frac{1}{2} J_m \tau^2, 0 \leq \tau < t_a$ ($f_{1s} = f_0 + \frac{1}{2} J_m t_a^2$)
$j_3 = 0, 0 \leq \tau < t_c$	$a_3 = 0, 0 \leq \tau < t_c$	$f_3 = f_{2s}, 0 \leq \tau < t_c$ ($f_{2s} = f_1 + A_m t_a - \frac{1}{2} J_m t_a^2$)
$j_4 = J_m, 0 \leq \tau < t_d$	$a_4 = -J_m \tau, 0 \leq \tau < t_d$	$f_4 = f_{3s} - \frac{1}{2} J_m \tau^2, 0 \leq \tau < t_d$ ($f_{3s} = f_{2s}$)
$j_5 = J_m, 0 \leq \tau < t_d$	$a_5 = -A_m + J_m \tau, 0 \leq \tau < t_d$ ($A_m = J_m t_d$)	$f_5 = f_{4s} - A_m \tau + \frac{1}{2} J_m \tau^2, 0 \leq \tau < t_d$ ($f_{4s} = f_{3s} - \frac{1}{2} J_m t_d^2$)

Birleşim noktalarındaki V_e ve V_s ilerleme hız değerleri ve doğrusal bölümlerin (L_{seg}) uzunlukları farklı olabileceğinden dolayı, Şekil 3.1'de verilen kesici takım hızı profili altı profile bölünmüştür. Şekil 3.2'de görülen bu profiller, temel olarak V_e , V_s ve L_{seg} parametrelerinin tüm olasılıklarını kapsamaktadır. Ayrıca V_e ve V_s doğrusal segmentlerin uzunluğundan bağımsız olarak belirlendiğinden, L_{seg} ve V_s/V_e 'nin olası uyumsuzluğunu önlemek için alt profiller kullanılmaktadır. Altı ana profilin denklemleri alt profillerde değiştirilmemektedir fakat denklemlerin gerekli parametreleri yeni uyumlu parametrelerle güncellenmektedir. L_{seg} ve V_s/V_e temelinde tüm olasılıkları kapsayan ilerleme hız planlama algoritması Şekil 3.3'te yer alan durum diyagramında açıklanmıştır.



Şekil 3.2. Hız profil türleri



Şekil 3.3. Hız profil seçim algoritması

İlerleme hız planlama algoritması, birinci doğrusal hareketin bitiş hızı (V_e), ikinci doğrusal hareketin başlangıç hızı (V_s)'ye bağlı olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır. V_s 'nin V_e 'den küçük olması durumunda (Kategori 1) Denklem (3.6)-(3.8)'de yer alan eşitlikler kullanılmaktadır.

$$s_{c1} = f_s t_a + \frac{1}{6} J_m t_a^3$$

$$s_{c2} = f_{1s} t_a + \frac{1}{2} A_m t_a^2 - \frac{1}{6} J_m t_a^3 \quad (3.6)$$

$$s_{c3} = f_{3s} t_d - \frac{1}{6} J_m t_d^3$$

$$s_{c4} = f_{4s} t_d - \frac{1}{2} A_m t_d^2 + \frac{1}{6} J_m t_d^3$$

Denklemden, $t_a = \sqrt{\frac{V_{max}-V_s}{J_m}}$, $t_d = \sqrt{\frac{V_{max}-V_e}{J_m}}$, $f_s = V_s$, $f_{1s} = f_0 + \frac{1}{2} J_m t_a^2$, $f_{3s} = f_{1s} + A_m t_a - \frac{1}{2} J_m t_a^2$, $f_{4s} = f_{3s} - \frac{1}{2} J_m t_d^2$ değerlerine sahiptirler.

$$s_{c5} = f_s t_a + \frac{1}{6} J_m t_a^3 \quad (3.7)$$

$$s_{c6} = f_{1s} t_a + \frac{1}{2} A_m t_a^2 - \frac{1}{6} J_m t_a^3$$

Denklem (3.7)'de, $t_a = \sqrt{\frac{V_e - V_s}{J_m}}$, $f_s = V_s$, $f_{1s} = f_0 + \frac{1}{2} J_m t_a^2$ olarak kullanılmaktadır.

İlk kategorideki karşılaştırma işlemi, Denklem (3.8)'de görülen parametreler üzerinden yapılmaktadır.

$$L_{ch1} = s_{c1} + s_{c2} + s_{c3} + s_{c4}$$

$$L_{ch2} = s_{c1} + s_{c2} \quad (3.8)$$

$$L_{ch3} = s_{c5} + s_{c6}$$

V_s 'nin V_e 'den küçük olması durumunda kullanılan hız profilleri, Profil1, Profil4 ve Profil6'dır. Fakat başlangıç hızından bitiş hızına ulaşırken maksimum jerk değerinin geçilmesi durumunda, maksimum jerk'e göre yeni bir bitiş hızı (V_e) bulunması gerekmektedir. Bu nedenle birinci kategoride, Profil1 için jerk aşım kontrolü yapılmaktadır. Denklem (3.9)'da yer alan jerk değerinin maksimum jerk (J_m) değerinden yüksek olması durumunda, J_m değerine uygun yeni bir bitiş hızı $V_{e(new)}$ elde edilmektedir (Denklem 3.10).

$$J = (V_e - V_s) \left(\frac{V_e + V_s}{L_{seg}} \right)^2 \quad (3.9)$$

$$\text{Hesapla: } V_{e(new)} \rightarrow (V_{e(new)} - V_s) \left(\frac{V_{e(new)} + V_s}{L_{seg}} \right)^2 = J_m \quad (3.10)$$

V_s 'nin V_e 'ye eşit olması durumunda (Kategori 2) Profil3 ve Profil6 hız fonksiyonları kullanılmaktadır. Fakat V_s ve V_e 'nin V_{max} ile olan ilişkisine bağlı olarak fonksiyonlar aynı kalmak şartıyla parametre değişiklikleri yapılmaktadır. Kategori 2 için yeni parametre eşitlikleri Şekil 3.3'teki hız profil seçim diyagramında görülmektedir. V_s 'nin V_e 'den büyük olması durumunda ise (Kategori 3) Denklem (3.11) ve (3.12)'de bulunan parametreler üzerinden profil seçim işlemi yapılmaktadır.

$$s_{c7} = f_{3s}t_d - \frac{1}{6}J_m t_d^3 \quad (3.11)$$

$$s_{c8} = f_{4s}t_d - \frac{1}{2}A_m t_d^2 + \frac{1}{6}J_m t_d^3$$

$$\text{Denklemdede; } t_d = \sqrt{\frac{V_s - V_e}{J_m}}, \quad f_{3s} = f_{1s} + A_m t_a - \frac{1}{2} J_m t_a^2, \quad f_{4s} = f_{3s} - \frac{1}{2} J_m t_d^2$$

değerlerine sahiptirler.

$$L_{ch1} = s_{c1} + s_{c2} + s_{c3} + s_{c4}$$

$$L_{ch4} = s_{c3} + s_{c4} \quad (3.12)$$

$$L_{ch5} = s_{c7} + s_{c8}$$

Kategori 2’de olduğu gibi Kategori 3’te de jerk aşım kontrolü yapılmaktadır. Profil3 için Denklem (3.13)’teki jerk değerinin maksimum değeri aşması durumunda Denklem (3.14)’te görülen eşitlik kullanılarak yeni $V_{e(new)}$ değeri bulunmaktadır.

$$J = (V_s - V_e) \left(\frac{V_s + V_e}{L_{seg}} \right)^2 \quad (3.13)$$

$$\text{Hesapla: } V_{e(new)} \rightarrow (V_s - V_{e(new)}) \left(\frac{V_s + V_{e(new)}}{L_{seg}} \right)^2 = J_m \quad (3.14)$$

Hedeflenen sabit jerkli hız ve ivme profillerinin, doğrusal hareketlerin interpolasyon işleminde uygulanabilmesi için Denklem (3.15)’te yer alan Taylor denklemi kullanılmaktadır.

$$k_{i+1} = k_i + \frac{V(k_i)}{|L'(k_i)|} T_s + \frac{1}{|L'(k_i)|} \left(A(k_i) - \frac{L'(k_i)L''(k_i)}{|L'(k_i)|^3} V(k_i)^2 \right) \frac{T_s^2}{2} \quad (3.15)$$

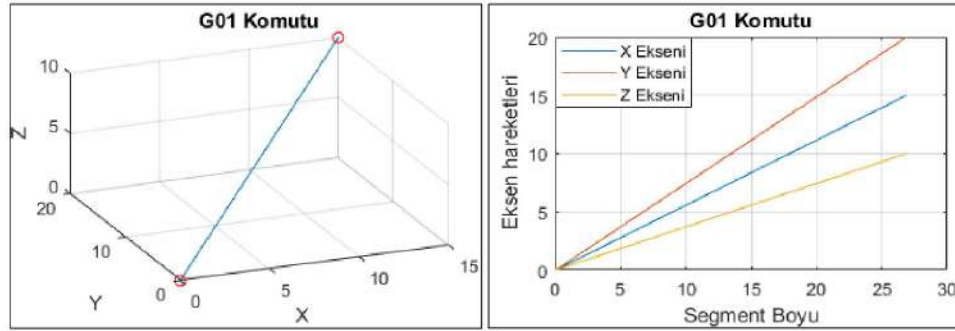
Eşitlikteki k değeri, G00/G01 komutu için, hedeflenen hız ve ivme profili temelinde bulunan interpolasyon parametresidir. Ayrıca eşitlikteki $L'(k_i)$ ve $L''(k_i)$ ifadeleri her k_i değeri için hesaplanan doğrusal hareketin birinci ve ikinci türevleri, $V(\alpha_i)$ ve $A(\alpha_i)$ ise hedeflenen hız ve ivme profillerinin her k_i parametresine karşılık gelen değerleridir. Son olarak eşitlikte yer alan T_s ise eksen veri yenileme süresidir.

İnterpolasyon parametresinin elde edilmesinden sonra kartezyen uzayda oluşan eksen yörüngeleri Denklem (3.16)'daki eşitliklerle üretilmektedir.

$$x_i = \frac{(x_1 - x_0)k_i + x_0 L_{seg}}{L_{seg}}, y_i = \frac{(y_1 - y_0)k_i + y_0 L_{seg}}{L_{seg}}, z_i = \frac{(z_1 - z_0)k_i + z_0 L_{seg}}{L_{seg}} \quad (3.16)$$

Denklem (3.17)'de yer alan tek satırlık bir G-kod dosyası üzerinden önerilen yöntemlerin nasıl kullanıldığı örnek olarak incelenmiştir. Örnek komut satırında başlangıç konumu (0,0,0) noktası olan kesici takımın (15,20,10) noktasına 3000 mm/dk (50mm/s) hızla gitmesi gerektiği belirtilmektedir. Verilen koordinatlara göre kesici takımın kartezyen uzayda izleyeceği yörünge Şekil 3.4-a'da, hareket boyuna göre elde edilen eksen yörüngeleri ise 3.4-b'de görülmektedir. Fakat doğrusal hareketin komut satırındaki F değerine uygun yapılması için öncelikle jerk ve ivme sınırlandırılmalı hız profili oluşturulmaktadır. Şekil 3.5'te oluşturulan hedef jerk, ivme ve hız profilleri verilmiştir ($J_m = 20000 \text{ mm/s}^3$, $A_m = 1000 \text{ mm/s}^2$). Ayrıca Şekil 3.5'te görülen yer değiştirme grafiği, interpolasyon işleminin hedeflenen profillere uygun yapıp yapılmadığının kontrolünde kullanılmaktadır.

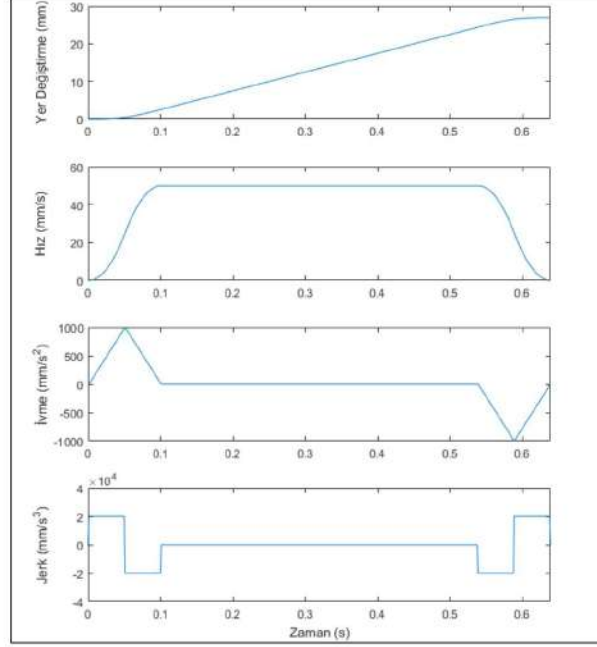
$$G01 X15 Y20 Z10 F3000 \quad (x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0) \quad (3.17)$$



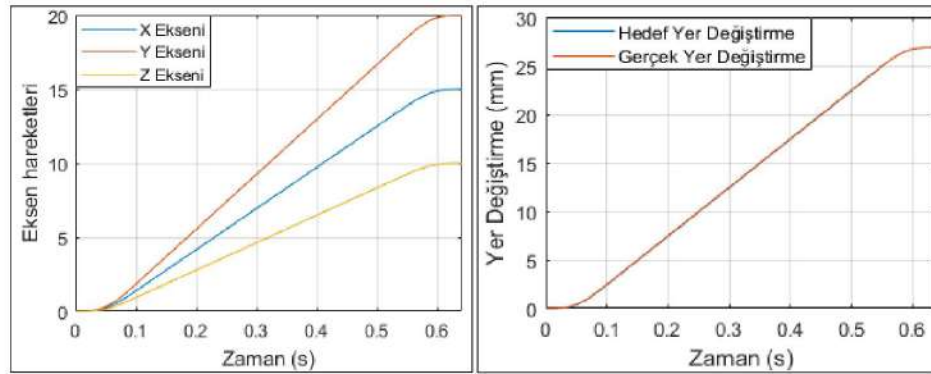
Şekil 3.4. (a) Kesici takım yörüngesi (b) hareket boyuna ilişkin elde edilen eksen yörüngeleri (G01 X15 Y20 Z10 F3000)

Şekil 3.5'teki hedef profiller doğrultusunda interpolasyon parametresi (k_i) bulunmakta ve k_i parametresine uygun olarak Şekil 3.6-a'da görülen eksen yörüngeleri (x_i, y_i, z_i) elde edilmektedir. Eksen hareketlerinin başlangıç ve bitiş bölgelerinde yumuşak geçişler olduğu interpolasyon işleminin doğruluğunu desteklemektedir. Fakat asıl önemli olan interpolasyon işlemi sonucu kesici takımın hedeflenen yer değiştirme

grafğine uyup uymadığıdır. Bu nedenle Şekil 3.6-b’de kesici takım için hedeflenen ve gerçekleşen yer değiştirme grafikleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.5. Hedef jerk, ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri (G01 X15 Y20 Z10 F3000)



Şekil 3.6. (a) Hedef profiller sonucunda ortaya çıkan eksen yörüngeleri (b) hedef ve gerçekleşen yer değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Bu grafiğin farklı olması yörüngenin yanlış işlendiği anlamına gelmemektedir. Sadece gidilen yörüngenin hedeflenen hız profiline uygun yapıp yapılmadığını göstermektedir. Fakat sabit jerkli hız profiline uygun işlenen yörüngenin tezgâhın titreşimsiz çalışmasını sağlamasından dolayı hedeflenen ve gerçekleşen yer değiştirme grafiklerinin benzer olması önemlidir. Karşılaştırma sonucunda grafiklerin mikron seviyelerde farklı olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu sonuç, interpolasyon

işleminin jerk ve ivme sınırlandırılmalı hız profiline uygun yapıldığını göstermiştir. Hedeflenen yer değiştirme grafiği (S_t), beş parçalı hız grafiğinin integrali alınması sonucu Denklem (3.18)'de görüldüğü gibi elde edilmektedir. İnterpolasyon işlemi sonrası ortaya çıkan gerçek yer değiştirme grafiği (S_r) ise, Denklem (3.19)'da yer alan eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$S_t = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ s_5]$$

$$s_1 = s_0 + f_s \tau + \frac{1}{6} J_m \tau^3, 0 \leq \tau < t_a \rightarrow (f_s = V_s)$$

$$s_2 = s_{1s} + f_{1s} \tau + \frac{1}{2} A_m \tau^2 - \frac{1}{6} J_m \tau^3, 0 \leq \tau < t_a \rightarrow (s_{1s} = s_0 + f_0 t_a + \frac{1}{6} J_m t_a^3)$$

$$s_3 = s_{2s} + f_{2s} \tau, 0 \leq \tau < t_c \rightarrow (s_{2s} = s_{1s} + f_{1s} t_a + \frac{1}{2} A_m t_a^2 - \frac{1}{6} J_m t_a^3) \quad (3.18)$$

$$s_4 = s_{3s} + f_{3s} \tau - \frac{1}{6} J_m \tau^3, 0 \leq \tau < t_d \rightarrow (s_{3s} = s_{2s} + f_{2s} t_c)$$

$$s_5 = s_{4s} + f_{4s} \tau - \frac{1}{2} D_m \tau^2 + \frac{1}{6} J_m \tau^3, 0 \leq \tau < t_d \rightarrow (s_{4s} = s_{3s} + f_{3s} t_d - \frac{1}{6} J_m t_d^3)$$

$$S_r(i+1) = S_r(i) + \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (3.19)$$

Komut satırları arası hız geçiş algoritmasının etkisini göstermek için ise üç komut satırından oluşan iki farklı G-kod dosyası örnek olarak incelenmiştir. Yapılan uygulamada kullanılan tezgah üç eksen doğrusal hareketli bir CNC-Freze tezgahı olarak varsayılmıştır ve vidalı mil adımı 1 tur için 18mm olacak şekilde kabul edilmiştir. Ayrıca eksen motorlarının maksimum ivmelenmesi 200.000 deg/s² (3490 rad/s²) ve $J_m = 1000 \text{ mm/s}^3$, $A_m = 100 \text{ mm/s}^2$, $V_{\max} = 50 \text{ mm/s}$, $T_s = 1 \text{ ms}$ olarak kullanılmıştır. Verilen parametreler doğrultusunda dönüşüm katsayıları (C_x, C_y, C_z) 20 olarak hesaplanmış ve her bir ekseninde izin verilen maksimum doğrusal ivmelenme değeri de 10.000 mm/s² olarak elde edilmiştir. İlk uygulamada Denklem (3.20)'de görülen komut satırları kullanılmıştır. Bu uygulamada kesici takımının kartezyen uzayda izleyeceği koordinatlar sert geçişli seçilmiştir. Bu nedenle geçiş noktalarında hız düşümü olması gerekmektedir. Önerilen yöntem doğrultusunda öncelikle her komut satırı arasındaki geçişlerdeki hız değerleri (V_e, V_s) tespit edilmiş ve bu hız değerlerine uygun her bir doğrusal hareket için uygun olan hız profilleri oluşturulmuştur. Şekil 3.7-a'da kesici takımın izleyeceği yörünge, Şekil 3.7-b'de ise

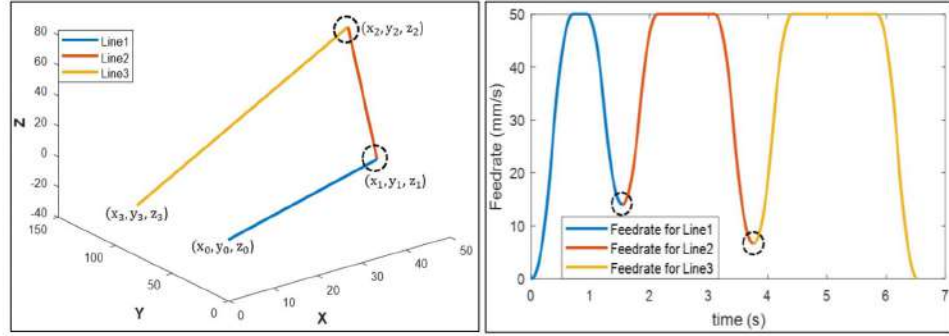
bu yörüngenin eksen motor kapasitelerinin sınırları içerisinde işleneceğini garanti altına alan kesici takım hız ve ivme profilleri görülmektedir.

G01 X40 Y25 Z10 F3000

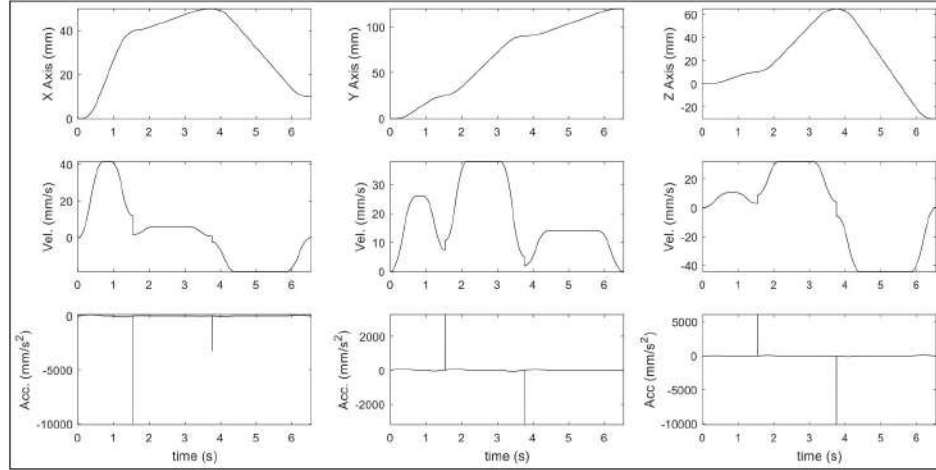
G01 X50 Y90 Z65

(3.20)

G01 X10 Y120 Z-30



Şekil 3.7. (a) Kesici takımın izleyeceği doğrusal hareket yörüngesi (b) bu yörünge için oluşturulan hız profili (G01 X40 Y25 Z10 F3000, G01 X50 Y90 Z65, G01 X10 Y120 Z-30)



Şekil 3.8. Eksen yörüngeleri ve aksenal hız/ivme grafikleri (G01 X40 Y25 Z10 F3000, G01 X50 Y90 Z65, G01 X10 Y120 Z-30)

Hedeflenen hız profiline uygun çıkarılan eksen yörüngelerine (X-Y-Z), eksen hızlarına ve eksen ivmelenmelerine ilişkin grafikler Şekil 3.8’de verilmiştir. Eksen yörüngeleri oluşturulurken, eksen motorlarının kapasitelerinin aşılmadığı eksen ivmelenme grafiklerinden anlaşılmaktadır. İvmelenme grafiklerinde görüldüğü üzere, kesici

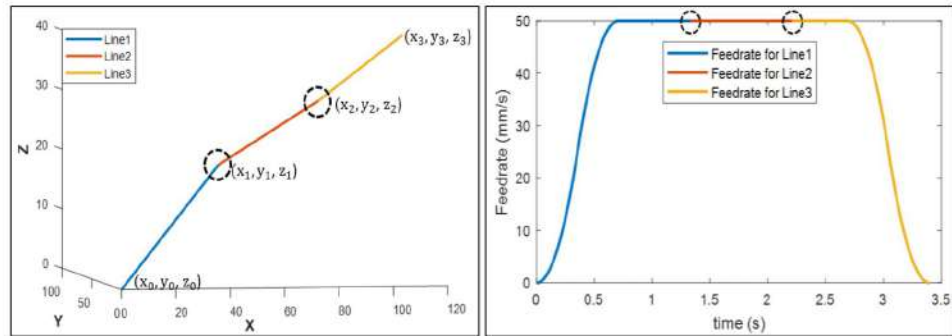
takımın tüm hareketi boyunca doğrusal eksen ivmelenmeleri eşik değeri olan 10.000 mm/s² değerini aşmamışlardır. Diğer uygulamada ise Denklem (3.21)'de verilen komut satırları kullanılmıştır. Önerilen yöntemin yumuşak geçişli doğrusal hareketlerde nasıl bir sonuç ortaya koyacağını görmek için kesici takım koordinatları yumuşak geçişli olacak şekilde seçilmiştir.

G01 X40 Y20 Z20 F3000

G01 X80 Y35 Z30 (3.21)

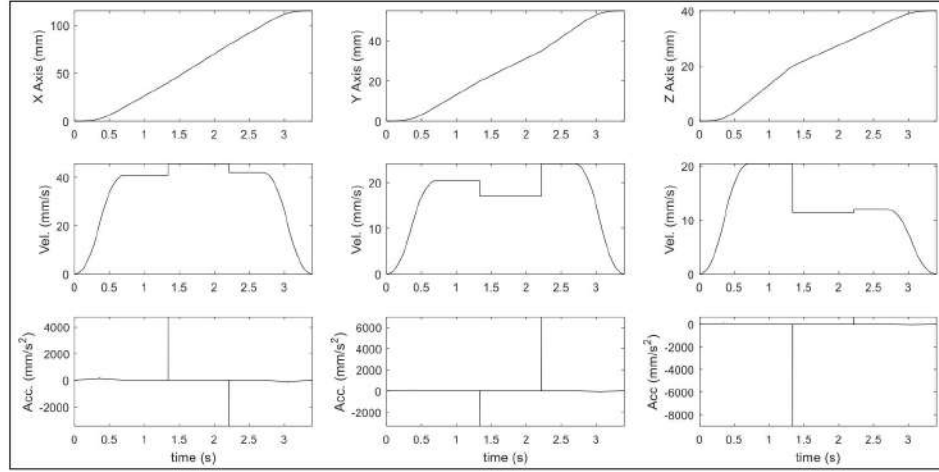
G01 X115 Y55 Z40

Bu uygulamada da her komut satırı geçişindeki hız değerleri yapılan matematiksel işlemler sonrasında tespit edilmiş ve bu değerlere uygun hız profilleri oluşturulmuştur. Şekil 3.9-a'da kesici takımın izleyeceği yörünge, Şekil 3.9-b'de ise kesici takım için oluşturulan hız profili görülmektedir. Şekil 3.9-b'de görüldüğü üzere geçiş noktalarında hız düşümü ortaya çıkmamıştır. Bu doğrultuda kesici takımın bu uygulamada sabit hızlı ürün işleyeceği anlaşılmaktadır. Kesici takımın tüm satırları sabit hızda işlemesi, hem gereksiz hız düşüşlerinin önlenmesi açısından hem de ürün yüzey kalitesi açısından önemli bir yere sahiptir. Eğer işlenen yörünge ve tezgah üzerinde kullanılan eksen motorları sabit hızla ürün işlemeye izin veriyorsa o avantajı kullanmak gerekir. Bu kapsamda önerilen yöntem, hem yörüngeyi analiz ettiği hem de eksen motor parametrelerini dikkate alarak hız değerlerini belirlediği için tezgahın maksimum kapasitede kullanılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.9. (a) Kesici takımın izleyeceği doğrusal hareket yörüngesi (b) bu yörünge için oluşturulan hız profili (G01 X40 Y20 Z20 F3000, G01 X80 Y35 Z30, G01 X115 Y55 Z40)

Şekil 3.10'da, hedeflenen hız profiline uygun çıkarılan eksen yörüngelerine (X-Y-Z), eksen hızlarına ve eksen ivmelenmelerine ilişkin grafikler verilmiştir. Kesici takımın hızı tüm hareket boyunca sabit kalmasına rağmen eksen ivmelenmelerinde 10.000 mm/s² eşik değerinin aşılmadığı görülmektedir. Sonuç olarak önerilen yöntemin hem sert geçişli hem de yumuşak geçişli yörüngelerde etkin bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.10. Eksen yörüngeleri ve aksenal hız/ivme grafikleri (G01 X40 Y20 Z20 F3000, G01 X80 Y35 Z30, G01 X115 Y55 Z40)

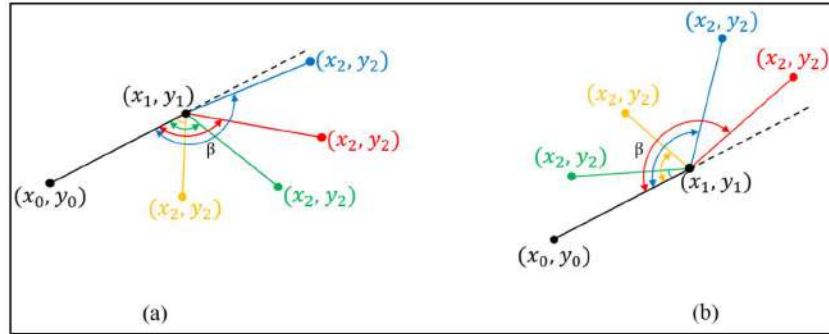
3.2. G02/G03 Komutları için Yörünge Planlamasının Yapılması

Merkez noktası (x_c, y_c), başlangıç açısı (θ_0) ve dairesel hareket açısı (θ) bulunması dairesel hareketlerde eksen yörüngelerinin oluşturulmasında önemli bir yere sahiptir. Fakat Denklem (2.18) ve (2.19)'da yer alan interpolasyon parametresi olan α değişkeninin sabit artışlarla kullanılması tezgâhın istenen hız değerinde çalışmasına engel olmaktadır. Bu nedenle her komut satırı için bir hareket planlaması yaparak interpolasyon parametresinin hedeflenen hız profiline uygun bulunması sağlanmalıdır. Doğrusal hareketlerde olduğu gibi dairesel hareketler için de jerk ve ivme sınırlandırılmalı hız profilleri kullanılmaktadır. Fakat hız profilleri oluşturulmadan önce ilgili komut satırındaki başlangıç ve bitiş hız değerlerinin (V_e, V_s) tespit edilmesi gereklidir. Endüstriyel uygulamalarda binlerce satır G-kod dosyaları ile çalışıldığı için her komut satırı arasındaki geçişlerde hız değerlerinin kontrol edilmesi titreşimsiz tezgâh operasyonları açısından çok önemlidir. G02/G03 komutları için hareket geçişlerinin düzenlenmesinde, CNC tezgâhında o an işlenecek komut satırının

başlangıç (x_0, y_0) ve bitiş noktaları (x_1, y_1) , bir sonraki komut satırının ise bitiş noktası (x_2, y_2) verileri arasındaki açı değeri kullanılmaktadır. (x_0, y_0) ve (x_1, y_1) arası bir doğru, (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) arası da bir doğru kabul edilerek bu doğrular arasındaki açı değeri (β) Denklem (3.22) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\beta_{(^\circ)} = 180 - \left(\cos^{-1} \left(\frac{(dx_{10} dx_{21}) + (dy_{10} dy_{21})}{\sqrt{dx_{10}^2 + dy_{10}^2} * \sqrt{dx_{21}^2 + dy_{21}^2}} \right) \right) \quad (3.22)$$

Denklemden, $dx_{10} = x_1 - x_0$, $dy_{10} = y_1 - y_0$, $dx_{21} = x_2 - x_1$, $dy_{21} = y_2 - y_1$ eşitliklerini ifade etmektedir. β açısının 0° - 180° arasındaki değerlerini kapsayan bölge $Norm_1$ olarak isimlendirilirken, 180° - 360° arası kapsayan bölge ise $Norm_{-1}$ olarak kabul edilmektedir. Şekil 3.11-a'da, $Norm_1$ durumu için dört farklı (x_2, y_2) noktasının β açı aralıkları, $Norm_{-1}$ bölgesinde bulunan dört farklı (x_2, y_2) noktası için oluşan β açı değerleri ise Şekil 3.11-b'de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. β açı aralıklarının gösterimi (a) $Norm_1$ (b) $Norm_{-1}$ durumları için

Tablo 3.2. Komut satır geçişlerine uygun $V_{e/s}$ değerlerinin bulunması

	$Norm_1$		$Norm_{-1}$	
	$\beta < 90$	$\beta \geq 90$	$\beta < 90$	$\beta \geq 90$
G02 → G01	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$
G02 → G02	$V_{e/s} = V_{max}$	$V_{e/s} = V_{max}/2$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}/2$
G02 → G03	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}$
G03 → G01	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = 0$
G03 → G02	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}$
G03 → G03	$V_{e/s} = V_{max}$	$V_{e/s} = V_{max}/2$	$V_{e/s} = 0$	$V_{e/s} = V_{max}/2$

Norm, β açı değeri ve satır geçişlerindeki G koduna bağlı olarak, o an işlenen yörüngenin bitiş hızı (V_e), sonraki komut satırındaki hareketin ise başlangıç hızı (V_s), $V_{e/s}$ değişkeni üzerinden Tablo 3.2'de görüldüğü gibi tespit edilmektedir. G01, doğrusal hareket komutu olduğu için G02 ya da G03 komutundan G01 komutuna bir geçiş söz konusu ise $V_{e/s} = 0$ olarak kabul edilmektedir. Başlangıç ve bitiş hızlarının bulunması sonrasında, Şekil 3.3'te yer alan hız profil seçim diyagramı yardımı ile uygun hız profili seçilmektedir. Şekil 3.3'te görülen L_{seg} parametresi, dairesel hareketlerde Denklem (3.23)'te verilen eşitlikle elde edilmektedir.

$$L_{seg} = (R)\left(\theta \frac{\pi}{180}\right) \quad (3.23)$$

Hedeflenen sabit jerkli hız ve ivme profillerinin, dairesel yörüngelerin interpolasyon işleminde uygulanabilmesi için Denklem (3.24)'te yer alan Taylor denklemi kullanılmaktadır.

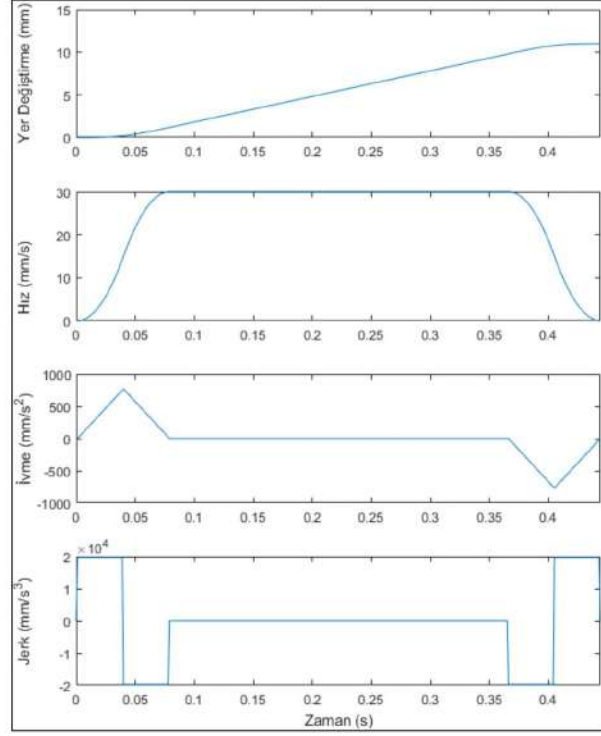
$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \frac{V(\alpha_i)}{|R'(\alpha_i)|} T_s + \frac{1}{|R'(\alpha_i)|} \left(A(\alpha_i) - \frac{R'(\alpha_i)R''(\alpha_i)}{|R'(\alpha_i)|^3} V(\alpha_i)^2 \right) \frac{T_s^2}{2} \quad (3.24)$$

Eşitlikteki α değeri, G02/G03 komutu için, hedeflenen hız ve ivme profili temelinde bulunan interpolasyon parametresidir. Ayrıca eşitlikteki $R'(k_i)$ ve $R''(k_i)$ ifadeleri her α_i değeri için hesaplanan radyusun birinci ve ikinci türevleri, $V(\alpha_i)$ ve $A(\alpha_i)$ ise hedeflenen hız ve ivme profillerinin her α_i parametresine karşılık gelen değerleridir. Son olarak eşitlikte yer alan T_s ise eksen veri yenileme süresidir. Denklem (3.25)'te yer alan tek satırlık bir G-kod dosyası üzerinden önerilen yöntemlerin nasıl kullanıldığı örnek olarak incelenmiştir.

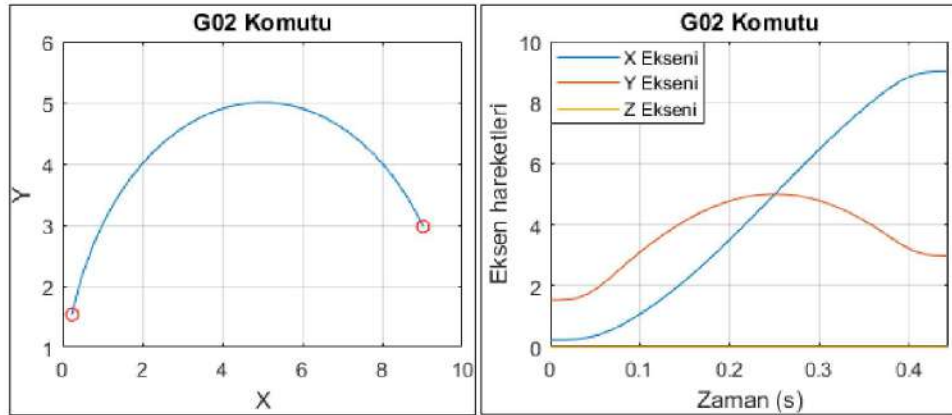
$$G02 X9.019 Y2.975 R14.976 F1800 \quad (x_0 = 0.2407, y_0 = 1.533, z_0 = 0) \quad (3.25)$$

Örnek komut satırında, başlangıç konumu (0.2407,1.533,0) noktası olan kesici takımın, (9.019,2.975,0) noktasına 1800 mm/dk (30mm/s) hızla saat yönünde 14.976 yarıçapında dairesel hareketle gitmesi gerektiği belirtilmektedir. İlgili dairesel hareketin işlenebilmesi için öncelikle merkez noktası (x_c, y_c), başlangıç açı değeri (θ_0) ve dairesel hareket açı miktarı (θ) bulunmuştur. Hesaplanan parametreler sonrasında ise dairesel hareketin boyuna (L_{seg}) ve başlangıç/bitiş hız değerlerine uygun hız profili

seçilmiştir ($J_m = 20000 \text{ mm/s}^3$, $A_m = 1000 \text{ mm/s}^2$). Tek satırlık bir kod olması dolayısıyla $V_{e/s} = 0$ olarak kabul edilmiştir. Bu doğrultuşa Denklem (3.25)'teki dairesel hareket komutu için Şekil 3.12'de görülen jerk, ivme, hız ve yer değıştirme profilleri oluşturulmuştur.

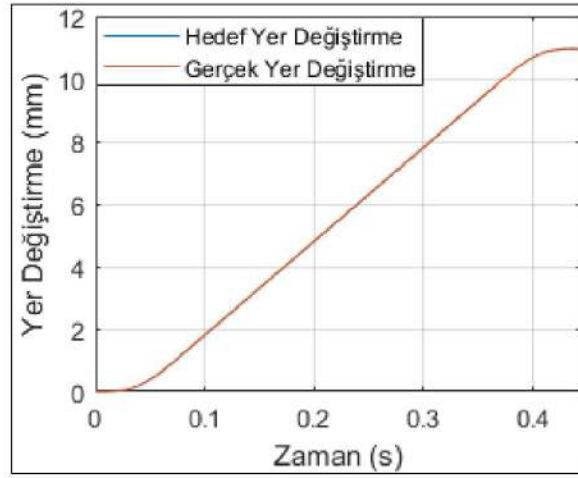


Şekil 3.12. Hedef jerk, ivme, hız ve yer değıştirme grafikleri (G02 X9.019 Y2.975 R14.976 F1800)



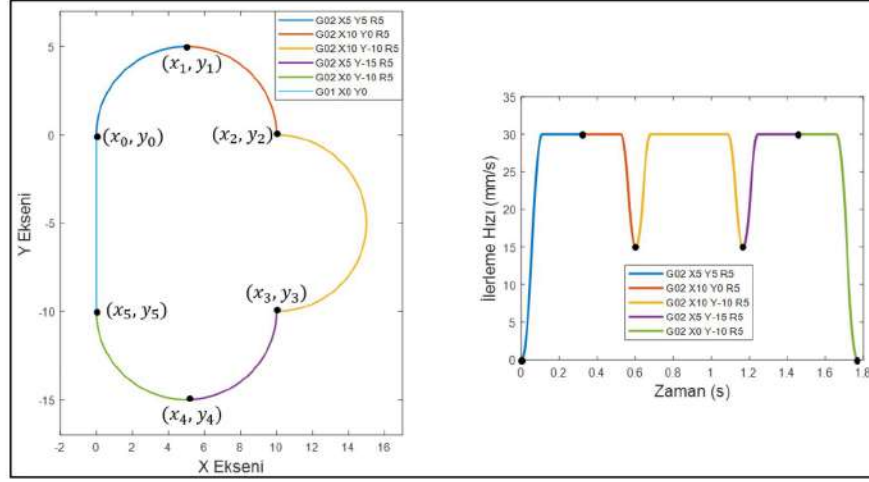
Şekil 3.13. G02 X9.019 Y2.975 R14.976 F1800 komutuna ilişkin eksen hareketleri

Elde edilen profiller yardımı ile interpolasyon parametresi α bulunmuş ve Denklem (2.18)'de kullanılarak eksen yörüngeleri üretilmiştir. Şekil 3.13-a'da ilgili dairesel hareket için kesici takımın kartezyen uzayda gideceği yörünge, Şekil 3.13-b'de ise eksen yörüngeleri görülmektedir. Şekil 3.14'te ise hedef yer değiştirme grafiği ile interpolasyon işlemi sonrasında oluşan gerçek yer değiştirme grafiği görülmektedir. Karşılaştırma sonucunda interpolasyon işleminin hedef profillere uygun yapıldığı görülmektedir.



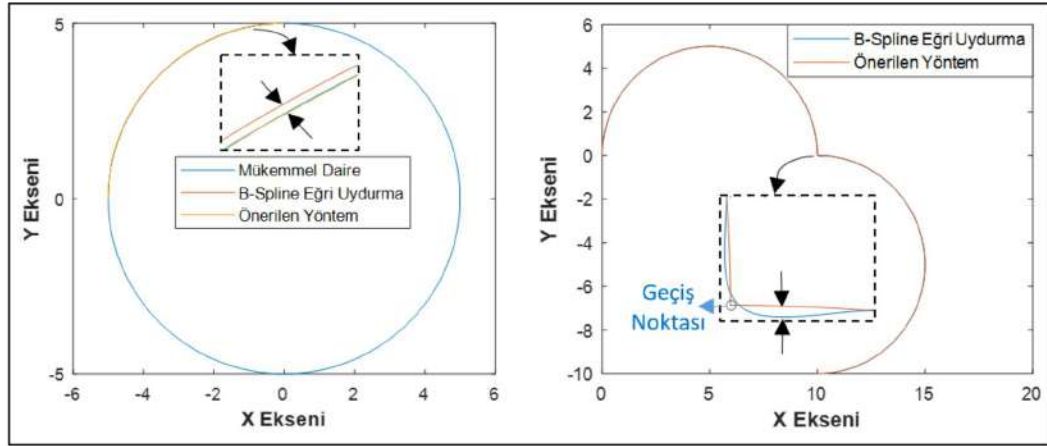
Şekil 3.14. Hedef ve gerçekleşen yer değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması (G02 X9.019 Y2.975 R14.976 F1800)

Tek satırlı uygulamaya ek olarak, G17 düzleminde, altı komut satırından oluşan bir G-kod dosyası üzerinden önerilen yöntemlerin nasıl kullanıldığı Şekil 3.15'te örnek olarak gösterilmiştir. G02 komutları için, merkez noktası (x_c, y_c), başlangıç açısı (θ_0) ve açısal hareket miktar (θ) değerleri bulunarak Şekil 3.15-a'da görülen yörünge elde edilmektedir. G01 doğrusal hareket komutu bu çalışma kapsamına girmediği için sembolik olarak gösterilmiş ve yörünge planlamasına dâhil edilmemiştir. Fakat beşinci satırdaki G02 komutundan sonra G01 komutuna geçiş olduğu için bu noktada $V_{e/s} = 0$ değerini almaktadır. İlk beş satır için tüm $V_{e/s}$ ilerleme hız bilgileri bulunmuş ve bu veriler doğrultusunda oluşturulan genel hız/ivme profili Şekil 3.15-b'de görüldüğü gibi oluşturulmaktadır. Dairesel hareket interpolasyon parametresi bulunduğundan sonra ise X-Y eksenini için oluşan nihai eksen yörüngeleri Şekil 3.18-a'da görüldüğü gibi elde edilmektedir. Z ekseninde herhangi bir hareket olmadığı için ürün işleme sürecinde sıfır olarak kalmaktadır.



Şekil 3.15. Kartezyen uzayda işlenecek dairesel yörünge ve kesici takım hız profili

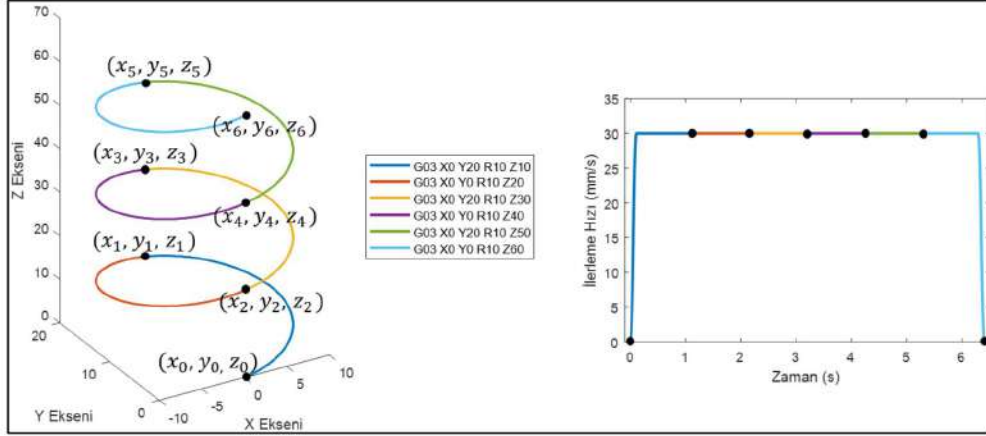
Bu çalışmada önerilen yörünge planlama algoritmasında doğrudan G02 ve G03 komutları ile verilen X-Y-Z ve R bilgileri kullanıldığı için normalde kontur hatalarına yol açan ve ana yörüngeyi terk eden mevcut eğri uydurma (curve fitting) ve köşe yumuşatma (corner smoothing) yöntemlerinin bu dezavantajı ortadan kaldırmaktadır. Yarıçapı 5 olan bir radyus için, önerilen yöntem ve literatürdeki en gelişmiş eğri uydurma yöntemlerinden biri olan B-spline eğri uydurma yöntemi [8, 10, 25] ile çıkarılan yörüngeler, yüksek çözünürlüklü mükemmel daire olarak nitelendirilen dairesel yörünge üzerinde Şekil 3.16-a'da görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.16. Önerilen yöntem ve B-spline eğri uydurma yöntemi ile çıkarılan yörüngelerin karşılaştırılması

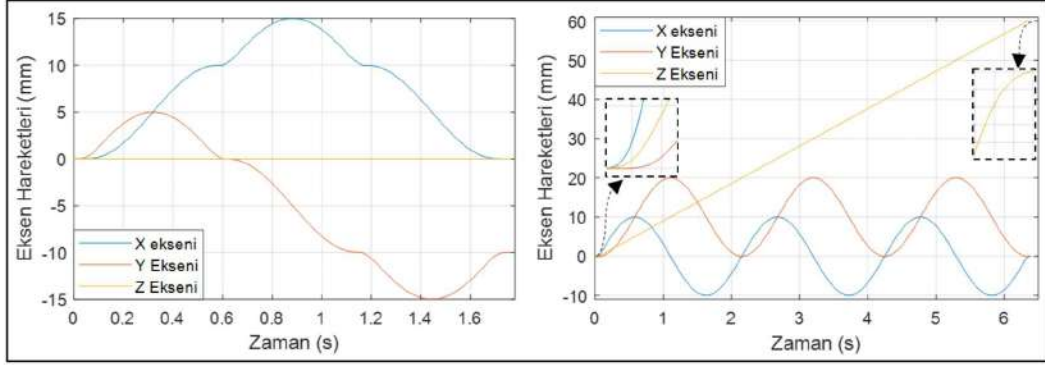
B-spline eğrisi G-kod dosyasında daire üzerinde belirli aralıklarla verilen nokta bulutlarına uygun yörünge planlaması yaptığı için Şekil 3.16-a'da görüldüğü gibi

kontur hatası oluşurken, önerilen yöntemle çıkarılan yörüngenin mükemmel daire üzerinde olduğu görülmektedir. Şekil 3.16-b’de ise ardışık iki dairesel harekete ilişkin yörünge karşılaştırılması yer almaktadır. B-spline eğrisi ile elde edilen yörüngenin iki dairesel hareket arasındaki geçiş noktasında ana yörüngeden bir miktar sapma yaptığı Şekil 3.16-b’de görülmektedir. Fakat önerilen yöntemde G komutları ile verilen X-Y-Z ve R verilerine uygun yörünge planlaması yapıldığı için geçiş noktasında sapma meydana gelmemektedir. Helisel yörüngelerde dairesel harekete senkron çalışan üçüncü eksen için nasıl yörünge planlaması yapıldığını göstermek için ise G17 düzleminde yine altı komut satırından oluşan G03 komut temelli G-kod dosyası kullanılmıştır. G-kod dosyasına uygun çıkarılan yörünge ve bu helisel yörünge için oluşturulan hız profili ise Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Kartezyen uzayda işlenecek helisel yörünge ve CNC tezgâhının ve kesici takım hız profili

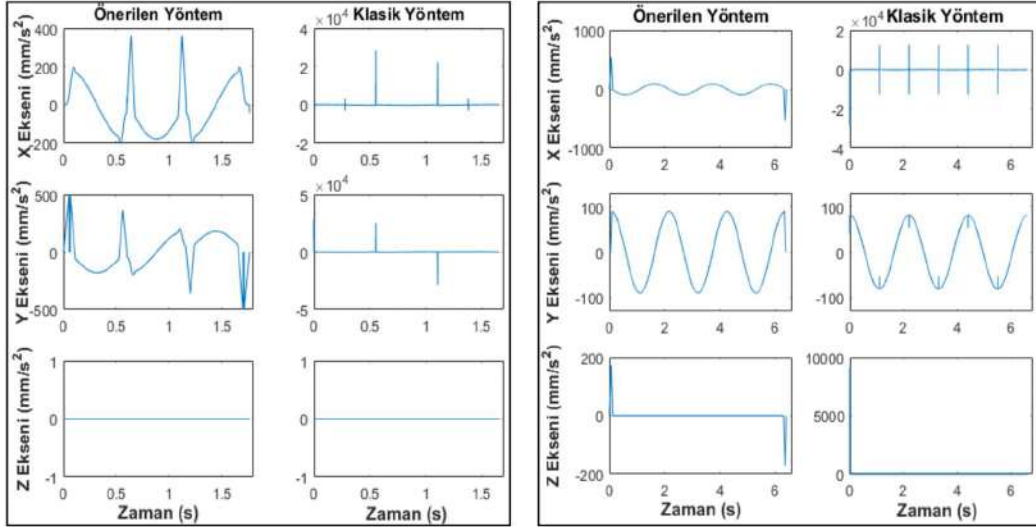
Her komut satırı için β açısı 90 dereceden küçük ve her satırda G03 komutu kullanıldığı için komut geçiş hızları Tablo 3’ten $V_{e/s} = V_{max}$ olarak elde edilmekte ve bu nedenle Şekil 3.17’de görüldüğü gibi sabit hızlı hareket planlaması oluşmaktadır. Denklem (15) ile bulunan interpolasyon parametresi (α), Denklem (3.26)’da kullanılarak Şekil 3.18-b’de görülen X, Y ve Z eksen yörüngeleri üretilmektedir. X-Y ekseninde dairesel hareket meydana gelirken, Z ekseninde ise kalkış ve duruşta sabit jerkli hız profili nedeniyle yumuşak geçişleri olan doğrusal hareket gerçekleşmektedir. Z eksenini X-Y eksenine senkronize hareket ettiği için helisel yörüngede doğrusal hareketten kaynaklı bir kayma oluşmamaktadır.



Şekil 3.18. Eksen yörüngeleri (a) dairesel hareket (b) helisel hareket için

Jerk ve ivme sınırlandırılmalı hareket planlaması kartezyen uzayda yapılmasına rağmen eksenlerde oluşan ivme değerleri de motor kapasitelerini zorlamayacak düzeyde oluşmaktadır. Çünkü hız profiline parametreleri olan maksimum jerk ve ivme değerleri tezgâh üzerindeki eksen motor kapasitelerine uygun seçilmektedir.

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \frac{(V_{\max})(T_s)(\theta \frac{\pi}{180})}{L_{\text{seg}}} \quad \alpha_0 = \theta_{02/03} \frac{\pi}{180} \quad (3.26)$$



Şekil 3.19. Önerilen interpolasyon yönteminin klasik yöntemle karşılaştırması (a) dairesel yörünge (b) helisel yörünge için

Ayrıca aksenal ivmeleri etkileyen bir diğer önemli parametre ise komut satırları arasındaki geçişte oluşan eksen yörüngelerinin yönelimidir. Eğer bir komuttan diğerine geçerken bir eksen ters yönlü hareket ortaya çıkarsa bu noktalarda yüksek ivmelenme görülür. Bu tür sorunların önüne ise Tablo 3.2'deki hız seçim işlemi

geçmektedir. Genel yapısı ile önerilen yöntemler eksenlerde oluşabilecek yüksek ivmeleri de engellemiş olmaktadır. Çalışmanın eksen ivmelerindeki etkisini göstermek için, eksenel ivme sonuçları, interpolasyon parametresinin klasik bir yöntem olan sabit artımlı olarak belirlenmesi sonucunda (Denklem (3.26)) oluşan eksenel ivmelerle karşılaştırılmıştır. Dairesel ve helisel yörüngelerin işlenmesinde oluşan eksen ivmeleri Şekil 3.19’da görülmektedir. Önerilen yöntemle yapılan interpolasyon işlemlerinde eksen ivme değerleri 500 mm/s^2 değerini aşmaz iken, klasik yöntemde özellikle komut satır geçişlerinde çok yüksek ivmeler oluşmaktadır. Ayrıca eksenlerin kalkış ve duruş hareketlerinde ivmeler yavaş yavaş değişirken, klasik yöntemde bu şekilde bir kontrol yapısı bulunmamaktadır.

3.3. Eğrisel Fonksiyonlar İçin Yörünge Planlamasının Yapılması

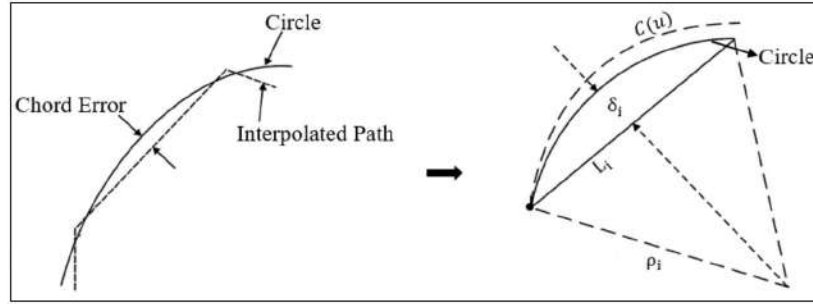
Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere dairesel ve doğrusal yörüngelerle ifade edilemeyen karmaşık yüzeyler CNC tezgâhlarında iki yöntemle işlenmektedir. Eğer CAM programı ve tezgâh kontrol ünitesi NURBS komutlarını destekliyorsa eğrisel yörüngeler G06.2 komutu üzerinden tanımlanmaktadır. Aksi durumda ise bir eğri küçük doğrusal parçalara bölünmekte ve tezgâh kontrol ünitesi de o parçaları bir eğriye dönüştürmektedir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen kontrol ünitesi, doğrudan NURBS komutlarını tanımasının yanında çoklu doğrusal parçaları da NURBS fonksiyonlarına çevirdiği için hem G06.2 hem de G05.1 komutlarının yörünge interpolasyon işlemleri bu bölümde tek başlık altında açıklanmıştır.

NURBS eğrilerinde, doğrusal, dairesel ve helisel yörüngelerden farklı olarak sabit hızda yörünge planlaması yapmak mümkün değildir. Çünkü bir eğrinin sabit hızda işlenmesi üç boyutlu uzayda kesici takımın yaptığı hareketin her örnekleme zamanında aynı uzunlukta olmasını gerektirir. Fakat eğrinin her bölgesi için sabit uzunlukta değişim oluşturacak bir hareket planlaması yapmak ürün çıktısı açısından uygun değildir. Kontrol ünitesi eksenlere sabit örnekleme zamanında bilgi göndereceği için belirlenen sabit hız doğrudan her adımdaki hareket boyunu etkilemektedir. Bu durumda sabit hızın eğrinin hangi bölgesi göz önünde bulundurarak belirlendiği önemli hale gelmektedir. Eğer eğrinin en hassas değişimler olan bölgesi dikkate alınmış ise hız değerinin düşük olması gerekmektedir. Bu nedenle eğrinin diğer bölgeleri de yavaş işlenecek ve ürün işleme süresini arttıracaktır. Eğrinin normal veya

az hassas olan bölgelerine göre seçilen bir hız olması durumunda ise hareket boyları uzayacak dolayısıyla eğrinin hassas yerlerinde veri kayıpları artmış olacaktır. Sonuç olarak sabit hızda eğrinin işlenmesi ya işlem süresini arttırmakta ya da hassas bölgelerde veri kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle bir NURBS eğrisi için hız profili çıkartılırken hız optimizasyonu yapılması gerekmektedir.

3.3.1. Eğrilik yarıçapı ve kiriş hatası (chord error)

Bu eğrinin veri kaybı olmadan yüksek hızda işlenebilmesi için öncelikle eğrinin her noktası için eğrilik değerlerinin (k) elde edilmesi gerekmektedir. Eğrilik değerleri üzerinden eğrilik yarıçapları (ρ) bulunmakta ve sonrasında ise interpolasyon yörüngesi ile eğrilik yarıçapına göre uydurulan dairesel yörüngenin arasındaki kiriş hata (δ) değerleri hesaplanmaktadır. Şekil 3.20’de eğrilik yarıçapları ve kiriş hatası (chord error) arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Eğrilik yarıçapı ve kiriş hatası

Bir NURBS eğrisi üzerindeki eğrilik değerleri (k) ve eğrilik yarıçapları (ρ) Denklem (3.27) ve (3.28)’de yer alan eşitliklerle ayrı ayrı elde edilmektedir.

$$k_i = \frac{\|C'(u_i) C''(u_i)\|}{|C'(u_i)|^3} \quad \rightarrow \quad C'(u) = \frac{A'(u) - w'(u)C(u)}{w(u)} \quad (3.27)$$

$$\rho_i = \frac{1}{k_i} \quad (3.28)$$

Eğrilik yarıçaplarının ve kiriş hatlarının yüksek olduğu yerlerde hassas işleme yapabilmek için ilerleme hızının düşürülmesi gerekmektedir. Bu noktalarda olması gereken hız değerlerinin tespiti için öncelikle Denklem (3.29)’da görülen kiriş hatalarının hesaplanması gereklidir.

$$\delta_i = \rho_i - \sqrt{\rho_i^2 - \left(\frac{L_i}{2}\right)^2} \quad (3.29)$$

Elde edilen parametreler doğrultusunda, eğrilik ve eğrilik yarıçapı/kiriş hatası değerlerinin etkin olduğu iki farklı hız değerleri oluşturulmaktadır. Eğrilik parametresine ilişkin hız değerleri (V_c) Denklem (3.30), eğrilik yarıçapı/kiriş hatasına bağlı bulunan hız değerleri (V_{ce}) ise Denklem (3.31) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır

$$V_c(u_i) = \left\{ \begin{array}{l} V_{\max} \\ \frac{k_{cs}}{k(u_i) + k_{cs}} (V_{\max}) \end{array} \quad \begin{array}{l} k(u_i) \leq k_{thr} \\ k(u_i) > k_{thr} \end{array} \right\} \rightarrow k_{thr} = \frac{A_{\max}}{V_{\max}^2} \quad (3.30)$$

$$V_{ce}(u_i) = \left\{ \begin{array}{l} V_{\max} \\ \frac{2}{T_s} \sqrt{\rho_i^2 - (\rho_i - \delta)^2} \end{array} \quad \begin{array}{l} \frac{2}{T_s} \sqrt{\rho_i^2 - (\rho_i - \delta)^2} > V_{\max} \\ \frac{2}{T_s} \sqrt{\rho_i^2 - (\rho_i - \rho_i)^2} \leq V_{\max} \end{array} \right\} \quad (3.31)$$

Nihai hız değerleri ise Denklem (3.32) ile belirlenmektedir. Fakat Denklem (3.32)'nin çıktısı olan V_{u_i} değeri, sürekli fonksiyona sahip bir hız eğrisi olmadığı için bir NURBS eğrisinin doğrudan hız profili olarak kullanılamamaktadır. Bu nedenle V_{u_i} içerisinde gerekli hız değerleri alınarak jerk ve ivme sınırlandırılmalı sürekli fonksiyona sahip hız profilleri oluşturulmaktadır.

$$V_{u_i} = \max\{\min\{V_c(u_i), V_{ce}(u_i), V_{\max}\}, V_{\min}\} \quad (3.32)$$

V_{u_i} içerisinde gerekli değerler ise eğrilik grafiğinin (k) bölgesel maksimum ve minimum noktalarının bulunması sonucunda belirlenmektedir (Denklem (3.33)). k_{\min} ve k_{\max} noktalarındaki u_i değerlerine karşılık gelen V_{u_i} değerleri NURBS eğrisi içindeki segmentlerin başlangıç ve bitiş hızları (V_s, V_e) olarak kullanılmaktadır. Başlangıç ve bitiş hızlarının bulunması sonrasında, Şekil 3.3'te yer alan hız profil seçim diyagramı yardımı ile uygun hız profili seçilmektedir.

$$k_{\min} = \text{local min}(k) \quad (3.33)$$

$$k_{\max} = \text{local max}(k)$$

Şekil 3.3'te görülen L_{seg} parametresi, eğrisel hareketlerde Denklem (3.34)'te verilen eşitlikle elde edilmektedir.

$$L_{seg}^m = \sum_{i=1}^{N_m} |C_{(u_{i+1})} - C_{(u_i)}| \quad (3.34)$$

Denklemden, m ilgili segmentin dizinini, N_m ise ilgili segmentteki interpolasyon sayısını ifade etmektedir. Hedeflenen sabit jerkli hız ve ivme profillerinin, eğrisel yörüngelerin interpolasyon işleminde uygulanabilmesi için Denklem (3.35)'te yer alan Taylor denklemi kullanılmaktadır.

$$u_{i+1} = u_i + \frac{V(u_i)}{|C'(u_i)|} T_s + \frac{1}{|C'(u_i)|} \left(A(u_i) - \frac{C'(u_i)C''(u_i)}{|C'(u_i)|^3} V(u_i)^2 \right) \frac{T_s^2}{2} \quad (3.35)$$

Denklemden u değeri NURBS eğrisine ait interpolasyon parametresidir. u parametresi hedeflenen hız ve ivme profili dikkate alınarak bulunmaktadır. Ayrıca denklemden $C'(u_i)$ ve $C''(u_i)$ ifadeleri her u_i değeri için elde edilen eğrinin birinci ve ikinci türevleri, $V(u_i)$ ve $A(u_i)$ ise hedeflenen hız ve ivme profillerinin her u_i parametresine karşılık gelen değerleridir. NURBS eğrisinin birinci ve ikinci türevleri olan $C'(u_i)$ ve $C''(u_i)$ parametreleri Denklem (3.36)'da yer alan genel NURBS türev eşitliği üzerinden Denklem (3.37) ve (3.38)'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$C^{(m)}(u) = \frac{d^m C(u)}{du^m} = \frac{A^{(m)}(u) - \sum_{i=1}^m \frac{m!}{i!(m-i)!} w^i(u) C^{(m-i)}(u)}{w(u)} \quad (3.36)$$

$$C'(u) = \frac{A'(u) - w'(u)C(u)}{w(u)} \quad (3.37)$$

$$C''(u) = \frac{A''(u) - 2w'(u)C'(u) - w''(u)C(u)}{w(u)} \quad (3.38)$$

Denklem (3.39)'da yer alan NURBS parametreleri üzerinden önerilen yöntemlerin nasıl kullanıldığı örnek olarak incelenmiştir. Denklem (3.39)'daki kontrol noktaları, düğüm vektörü ve ağırlık vektörü bilgileri ile Şekil 3.21'de görülen NURBS eğrisi elde edilmiştir. Bu NURBS eğrisinin bir CNC tezgâhında titreşimsiz ve yüksek hassasiyette işlenebilmesi için eğrilik, eğrilik yarıçapı ve giriş hatası parametreleri temelinde kesici takım hız vektörü (V_{u_i}) oluşturulmaktadır. Hız vektörü içinden gerekli

bilgiler ise Şekil 3.22-a'da görülen eğrilik grafiği üzerindeki analiz sonucunda alınmıştır. Öncelikle eğrilik grafiğinin bölgesel maksimum ve minimum noktaları tespit edilmiş ve eğrilik eşik değerinin üzerindeki noktalardaki u_i değerlerine karşılık gelen hız değerleri saptanmıştır. Şekil 3.22-a'da görüldüğü üzere eşik değerini (1) geçen üç nokta (A-B-C) bulunmaktadır. Eğrilik değerlerinin yüksek olduğu yerler (A-B-C noktaları) Şekil 3.22-b'de NURBS eğrisi üzerinde de gösterilmiştir.

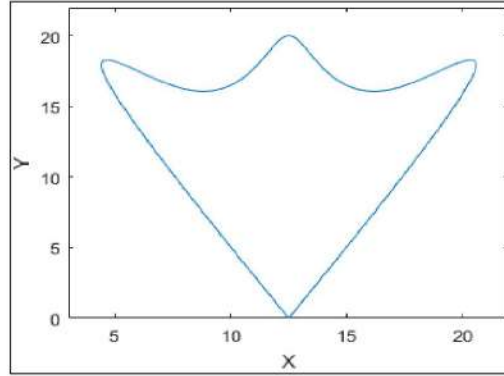
X Kontrol Noktası: [12.5, 25, 15, 12.5, 10, 0, 12.5]

Y Kontrol Noktası: [0, 25, 10, 25, 10, 25, 0]

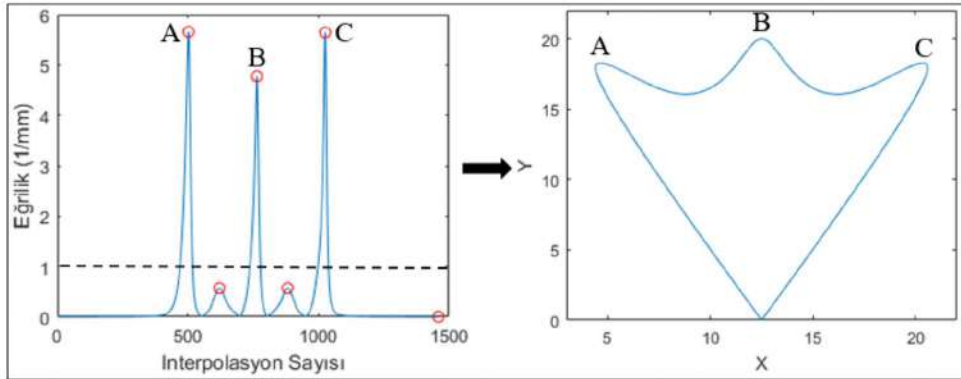
Z Kontrol Noktası: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] (3.39)

Düğüm Vektörü: [0 0 0 0 0.25 0.50 0.75 1 1 1 1]

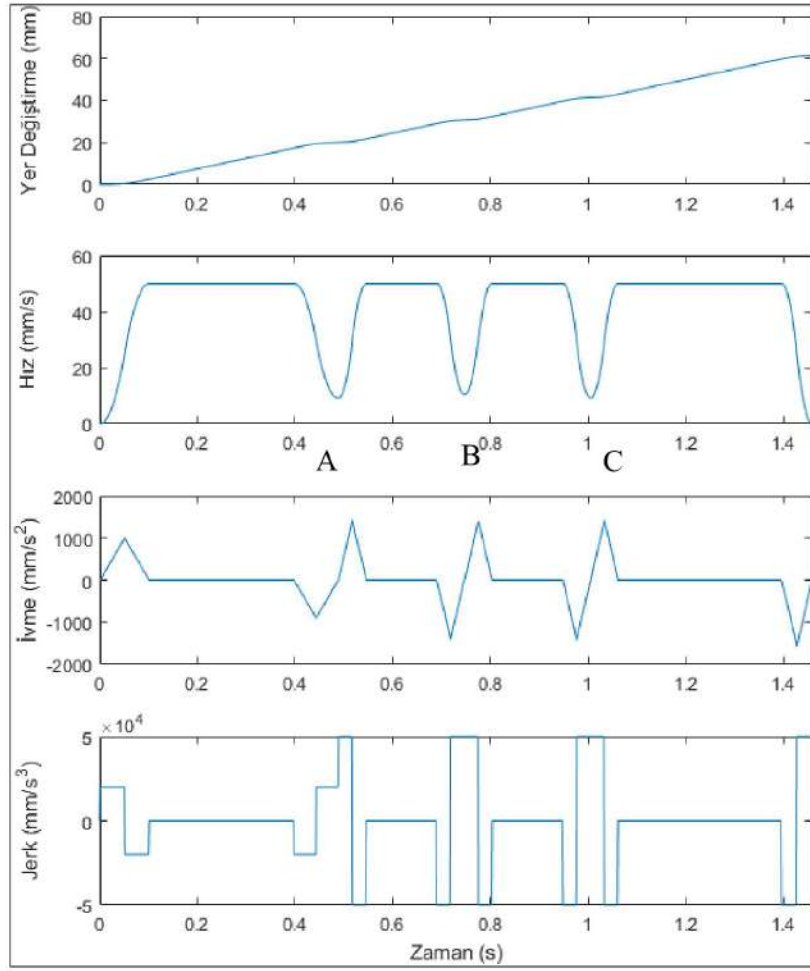
Ağırlık Vektörü: [1 1 1 1 1 1 1]



Şekil 3.21. Denklem 3.13 parametrelerine göre elde edilen NURBS eğrisi



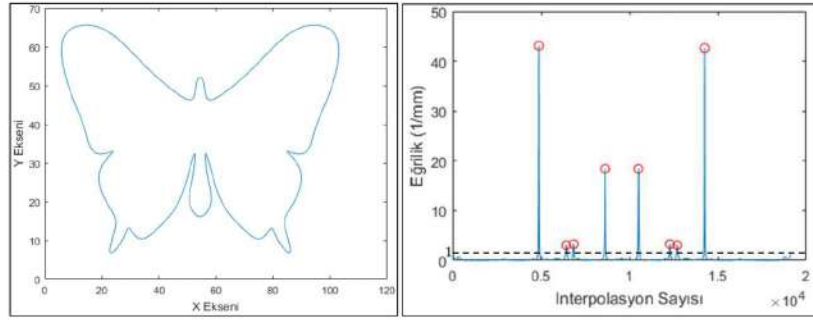
Şekil 3.22. Eğrilik grafiği ve eşik değeri üzerindeki bölgesel maksimum/minimum noktalarının bulunması



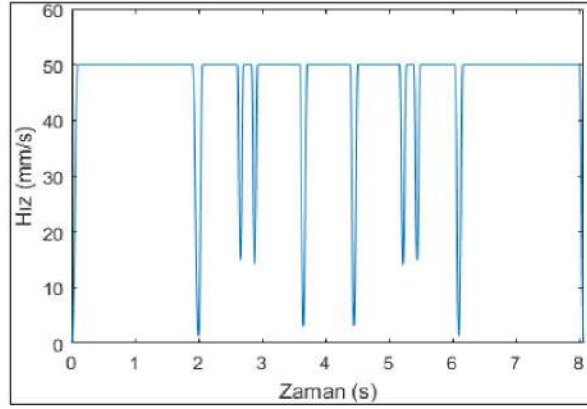
Şekil 3.23. Hedef jerk, ivme, hız ve yer değiştirme grafikleri (Şekil 3.21'deki NURBS eğrisi için)

Eşik değerinin üzerinde hiçbir nokta olmaması NURBS eğrisinin sabit hızla işlenebileceğini göstermektedir. Fakat bu uygulamada eğrilik değerinin yüksek olduğu bölgeler olduğu için bu bölgelerde hız düşümü olması gereklidir. Ayrıca hız düşümü olan noktalar aynı zamanda NURBS eğrisinin segment ayrım noktaları olmaktadır. Bir segmentin bitiş hızı ve diğer segmentin başlangıç hızı (V_e, V_s) V_{u_i} vektöründen alınan değerlerdir. V_e ve V_s değerlerinin bulunması sonrasında Şekil 3.23'te görülen jerk, ivme, hız ve yer değiştirme profilleri oluşturulmaktadır. A-B-C noktalarında hız profillerinin nasıl değişim gösterdiği şekil üzerinde görülmektedir. Hedef jerk, ivme ve hız profilleri temelinde yapılan interpolasyon işleminin başarısının gösterimi için de yine yer değiştirme grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.24'teki hedef ve gerçekleşen yer değiştirme grafiklerinden NURBS eğrisinin interpolasyon işleminin doğru yapıldığı gözlemlenmiştir.

Denklemler (3.40)'ta NURBS eğrisine ilişkin düğüm vektörü, kontrol noktaları ve ağırlık vektörü bilgileri verilmiştir. İlgili parametreler kullanılarak elde edilen NURBS eğrisi Şekil 3.25-a'da görülmektedir. Bu NURBS eğrisine ait eğrilik grafiği ise Şekil 3.25-b'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Eğrilik grafiği üzerinde eşik değerinin üzerinde sekiz nokta olduğu tespit edilmiş ve bu noktalardaki hız değerleri bulunmuştur. Sonrasında ise Şekil 3.26'da yer alan hız profili elde edilerek interpolasyon işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.25. NURBS kelebek eğrisi ve eğrilik grafiği



Şekil 3.26. NURBS kelebek eğrisine ait kesici takım hız profili

4. CNC KONTROL ÜNİTESİ YAZILIM VE DONANIM GELİŞTİRME İŞLEMLERİ

CNC kontrol ünitelerini temel olarak iki bölüme ayırırsak, CAM programından alınan G-kod dosyasındaki G ve M kodlarının okunmasından, ürünün işlenmesine kadar tamamen kontrol ünitesinin denetiminde olan süreç bir bölümü kapsarken, dokunmatik ekran ve gerekli diğer kontrol donanımlarını kullanarak, makine sıfır, parça sıfır, eksen tanımlama, parametre girme gibi tezgâh ayarlarının ve program yazma-değiştirme, spindle aç-kapat gibi tezgâh operatörünün manuel kullanımına yönelik tüm işlemler ise diğer bölümde gerçekleşmektedir. Belirtilen bu iki bölüm operatör paneli üzerinde birbirlerine entegre çalışmaktadırlar. Bu doğrultuda yapılan çalışmada öncelikle endüstriyel bir operatör panel donanımı tasarımı yapılmıştır. Şekil 4.1'de görülen operatör panelinde, Beckhoff UltraCompact (PC C6030) endüstriyel bir bilgisayar ve 19" dokunmatik bir ekran bulunmaktadır. Bununla birlikte gerekli bağlantı kabloları, sigortalar, kontrol tuşları ve el kumandası bu kontrol ünitesine dâhil edilmiştir.

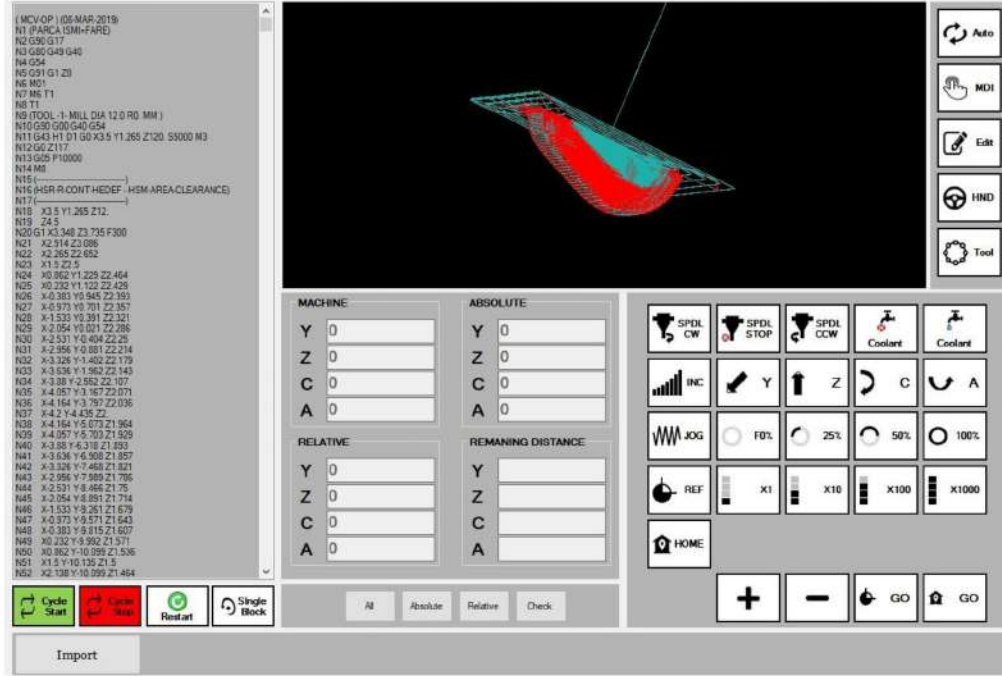


Şekil 4.1. Geliştirilen operatör paneli

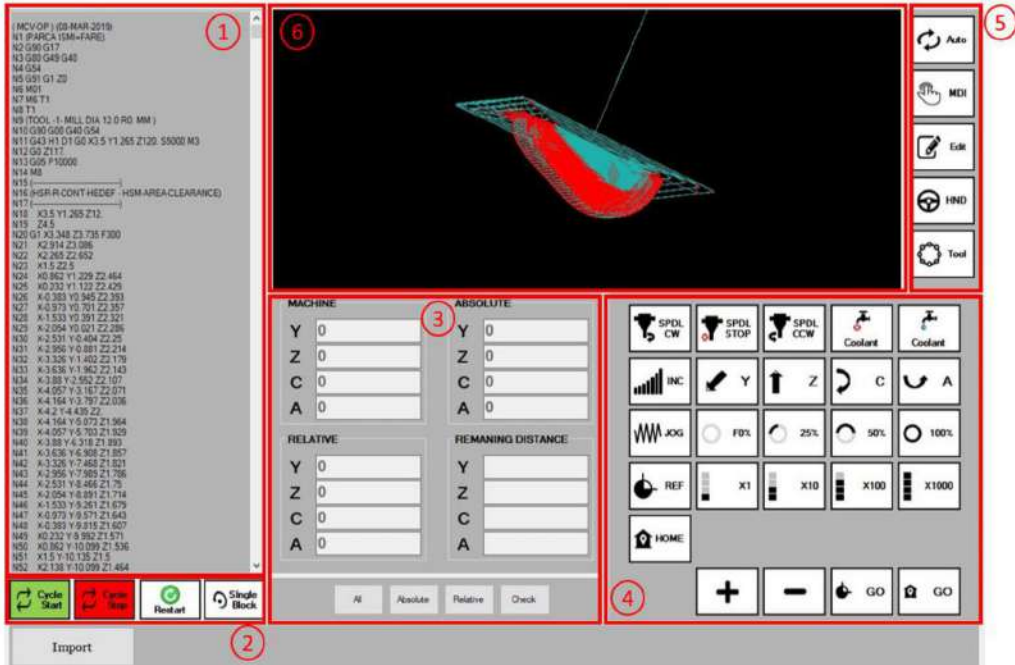
4.1. Operatör Panel Arayüzünün Geliştirilmesi

Donanım tasarımından sonra ise bir operatör tarafından tezgâhın tüm kontrol işlemlerinin yürütülebilmesi için operatör panel arayüzü geliştirilmiştir. Visual Studio ortamında C# dili ile geliştirilen kullanıcı arayüzünde, hem önceki bölümlerde anlatılan matematiksel yöntemler ve algoritmalar yazılım diline çevrilmiş hem de tezgâhın manuel kullanımına yönelik yazılım altyapısı oluşturulmuştur. 4 eksen (Y-Z-

C-A) bir CNC-Freze tezgâhı için geliştirilen kullanıcı arayüzü Şekil 4.2'de örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.2. Operatör panel arayüzü



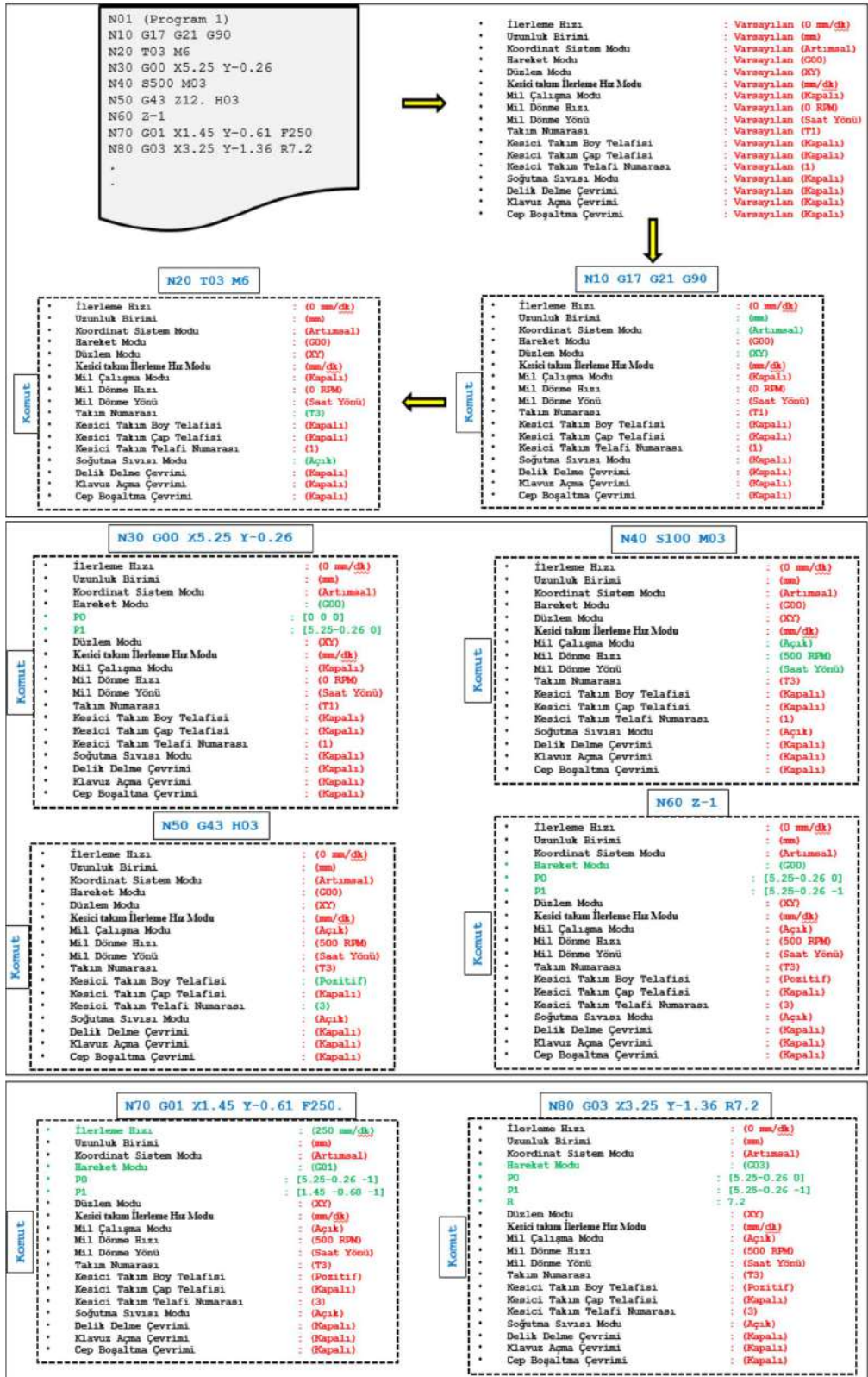
Şekil 4.3. Operatör panel arayüzü bölümleri

Kullanıcı arayüzü üzerinde farklı görevleri olan birimler bulunmaktadır. Bu birimlerin görevlerinin anlaşılabilmesi için kullanıcı arayüzü Şekil 4.3'te görüldüğü gibi gruplara ayrılmıştır.

1 numaralı bölümde tezgâhın üretim planlamasına ilişkin NC Kodları görülmektedir. Bu kod satırları CAM Programları tarafından üretilen CNC G-Kodlarına uygun çıkartılan *.text dosyasından alınmaktadır. Bu nedenle yazılımın ilk çalışması *.text dosyasından okunan kod satırlarının tek tek ayırt edilmesi olmuştur. Çünkü her G koduna ait işlem ve fonksiyonların farklılık göstermektedir. Bu doğrultuda G-Kodlarının *.text dosyasından hatasız okunması tezgâhın doğru üretimi yapması açısından çok önemlidir. Dosya okuma işleminin başarılı bir şekilde yapılmasından sonraki adım ise her satıra ait G-Kodunun, yorum, komut, doğrusal hareket, dairesel hareket, eğrisel hareket vb. olmak üzere sınıflara ayrılması olmuştur. NC Kodlarına ilişkin sınıflandırma işlemi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Sınıflandırma işlemi sonrasında ise her NC Kod satırındaki bilgilerin kod özelliğine göre ilgili parametrelerinin sisteme tanımlanması işlemi yapılmıştır. Şekilde 4.5'te sekiz satırlı örnek bir NC kod için yazılım tarafından sınıflandırma işlemi sonrasında yapılan işlemler adım adım gösterilmiştir.

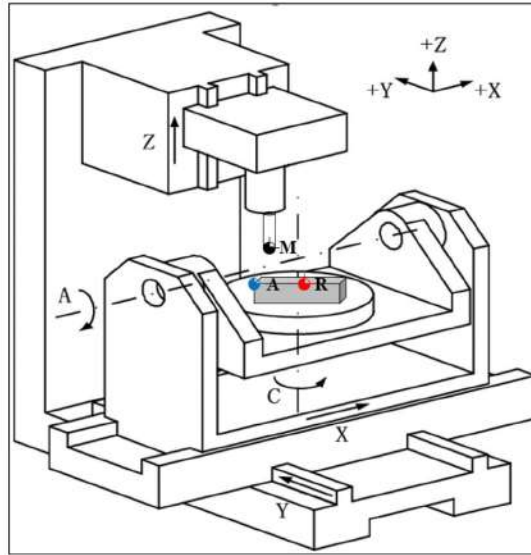
Kod Türü	Varsayılan	Komut	Yorum		
Koordinat Sistem Modu	Varsayılan	G90-Artımsal	G91-Mutlak		
Hareket Türü	Varsayılan	G00/G01 Doğrusal	G02-G03 Dairesel	G05.1 Q1- Eğri Uydurma	G06.2- NURBS
Düzlem Türü	Varsayılan	G17-XY	G18-XZ	G19-YZ	
Mesafe Birimi	Varsayılan	G20-mm	G21-inch		
Kesici Takım Yarıçap Telafisi	Varsayılan	G41-Sağdan	G42-Soldan	G40-İptal	
Kesici Takım Boy Telafisi	Varsayılan	G43-Pozitif	G44-Negatif	G49-İptal	
Mil Dönme Yönü	Varsayılan	M03-Saat Yönü	M04-Saat Yönü Tersi	M05-Mil Durdur	
Kesici takım İlerleme Hız Modu	Varsayılan	G93-T=1/F	G94-mm/dk	G95-mm/devir	
Delik Delme Çevrimi	Varsayılan	G73- Derin Delik Delme	G76- Delik Büyütme	G80- Çevrim İptali	
Klavuz Açma Çevrimi	Varsayılan	G74-Sol Klavuz	G84-Sağ Klavuz		
Cep Boşaltma Çevrimi	Varsayılan	G24- Dikdörtgen	G25- Dairesel		

Şekil 4.4. Operatör panel yazılımında G-M komut sınıflandırması



Şekil 4.5. NC dosyası okuma ve sınıflandırma işlemleri

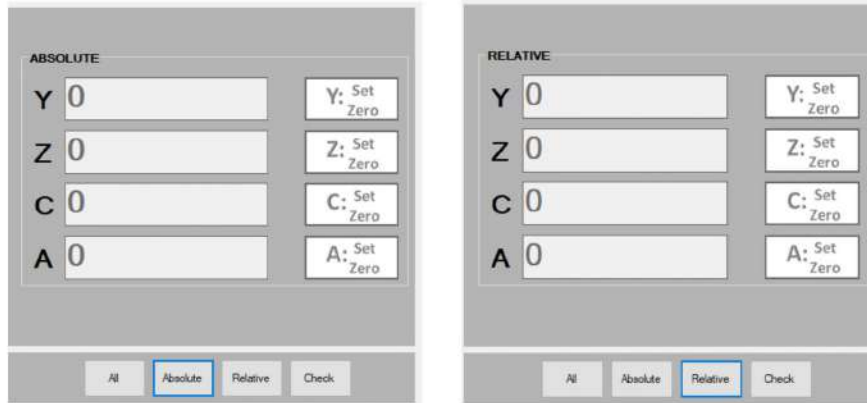
NC kodların okunması ve sınıflandırılması işlemi sonrasında, her komut satırındaki komutlar ve parametreler yazılan fonksiyon bloklarında işlenerek tezgâhın hareket planlaması yapılmaktadır (Not: Tezgâh hareket planlamasına ilişkin geliştirilen yöntemler önceki bölümlerde anlatılmıştır). 2 numaralı bölümde görülen kontrol tuşları ile NC kodların çalıştırılma seçenekleri belirtilmektedir. Eksen koordinat bilgileri ise 3 numaralı bölümde bulunmaktadır. Bu bölümde makine (machine), mutlak (absolute), bağıl (relative) koordinat bilgileri ve işlenen komut satırı için hedef noktaya kalan mesafe değeri görülmektedir. Bu değerlerin anlaşılabilmesi için tezgâhın koordinat sistemlerinin bilinmesi gereklidir. Bir tezgâha ilk enerji verildikten sonra, tezgâh eksen referanslarını ayarlamak için makine sıfırına gitmektedir. Tezgâh motorlarında kullanılan enkoderler mutlak (absolute) ise motor enkoderlerini kullanarak tezgâh kendi sıfırını bulmaktadır. Enkoderlerin artımsal (incremental) olması durumunda ise eksen sınır anahtarları kullanılmaktadır. Her eksen, sınır anahtarına ulaştıktan sonra tezgâh tüm eksenlerini sıfırlamaktadır. Makine sıfır bilgileri hafızada tutularak kesici takımın makine sıfırına göre hangi konumda olduğu ilgili bölüm ekranından takip edilmektedir. Mutlak koordinat sistemi ise parça sıfırıyla ilişkilidir.



Şekil 4.6. Makine (M), parça (A) ve bağıl (R) sıfırı referans noktaları

Tezgâh üzerinde ürün işlemeye başlamadan önce, kesici takım CAM programında parça sıfırı olarak kabul edilen koordinata getirilerek parça sıfırlama işlemi







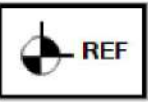



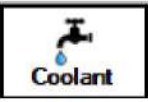

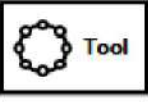
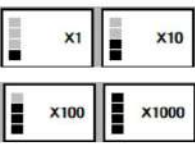
yapılmaktadır. Ürünün CAM program çıktısına uygun işlenmesi için bu işlem çok kritiktir ve doğru bir şekilde yapılması gereklidir. Parça sıfır bilgileri de makine sıfırında olduğu gibi hafızada tutulur ve kesici takımın parça sıfırına göre hangi konumda olduğu ekran üzerinde takip edilmektedir. Son olarak bağıl koordinat sistemi ise ürün üzerinde parça sıfırından farklı bir konumun referans alınması gerektiği zamanlar kullanılmaktadır. Parça üzerinde bağıl sıfırlama işlemi yapılmış ise kullanıcı ekranında kesici takımın bağıl sıfıra göre konumu izlenebilmektedir. Makine (M), mutlak (A) ve bağıl (R) koordinat referans konumları Şekil 4.6'da bir CNC-Freze tezgâhı üzerinde örnek olarak gösterilmiştir. Parça sıfırlama ve bağıl sıfırlama işlemleri operatör tarafından belirlendiği için, bu işlem kullanıcı arayüzünde 3 numaralı bölümdeki kontrol butonları ile yapılmaktadır. Mutlak (absolute) ve bağıl (relative) butonlarına basılması durumunda 3 numaralı bölüm ekranında Şekil 4.7-a ve 4.7-b'de ayrı ayrı görülen bilgiler gelmektedir. Eksen yanlarında bulunan sıfırlama butonları ile eksenin anlık konumu sıfır olarak sisteme tanımlanmakta ve bu değerler hafızada tutulmaktadır. Önceden de belirtildiği üzere kullanıcı arayüzü 4-eksen (Y-Z-C-A) bir CNC tezgâhı için yapılandırıldığı için, sıfırlama ekranlarında 4 eksen bilgisi yer almaktadır. Sıfırlama işlemleri bittikten sonra 'All' butonu ile ana ekrana dönüş yapılmaktadır. Sadece mutlak veya bağıl konumlardan birinin takip edilmesi yeterli ise Şekil 4.7'de görülen sıfırlama ekranlarında konum izlemesi yapılabilmektedir.






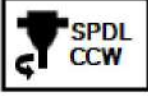

Şekil 4.7. Operatör panel arayüzünde parça ve bağıl sıfırlama işlemleri

4 numaralı bölüm ise tezgâhın manuel kullanımına yönelik doğrudan operatör tarafından kumanda edilen birimdir. 5 numaralı bölüm de yine operatör tarafından belirlenen kontrol modlarının bulunduğu birimdir. Kullanıcı arayüzünde bulunan kontrol butonlarının açıklamaları Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Operatör panel arayüzünde bulunan kontrol butonları

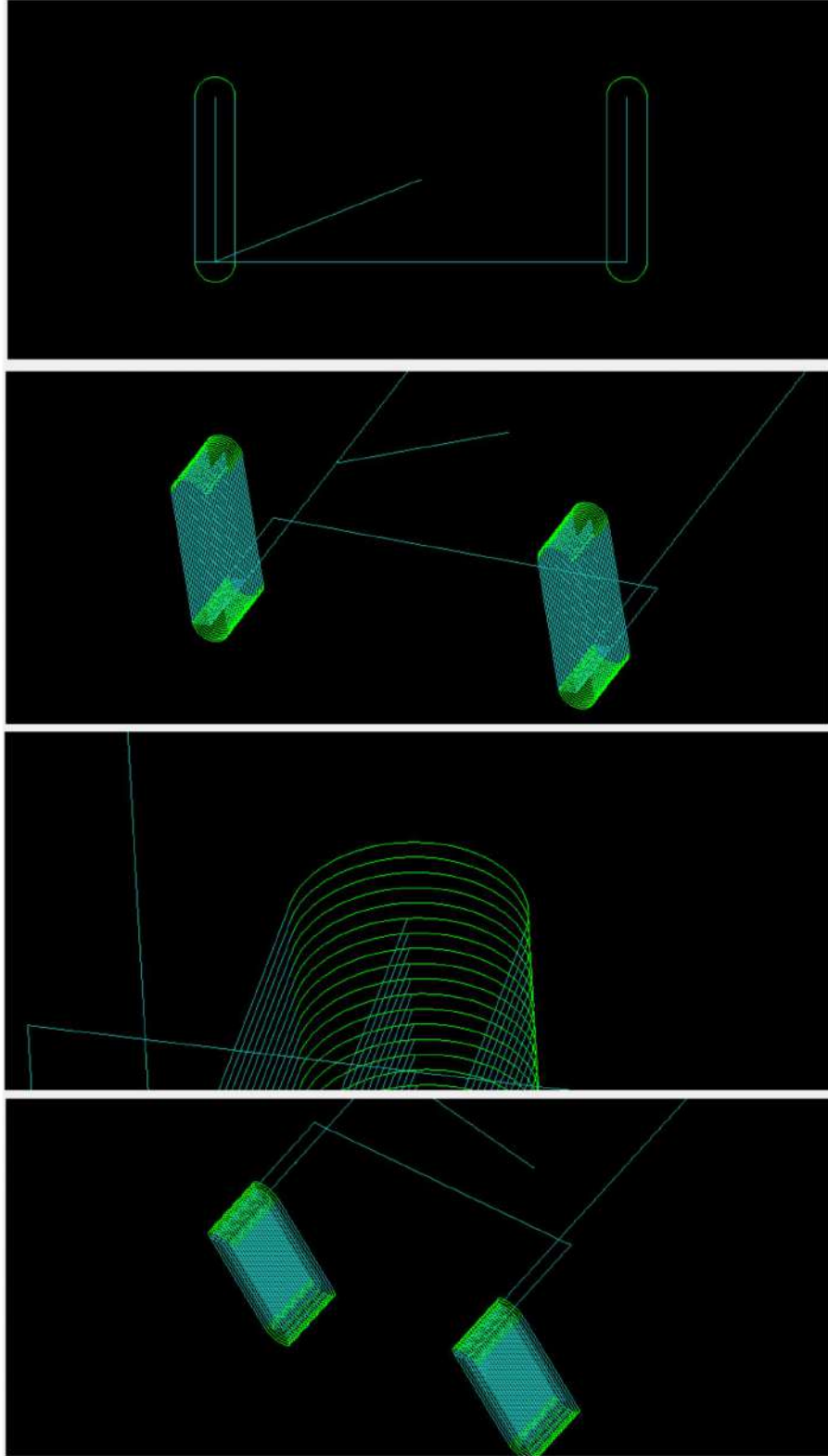
	Program yazma, programda araya girme, silme, değiştirme gibi işlemler EDIT modunda geçerlidir.
	Automatic: Yazılıma yüklenen NC Kod dosyasının otomatik çalıştırılmasını sağlar.
	(Manuel Data Input): Kısa programlar (Takım değiştirme, iş miline devir verme vb.) yazmak için kullanılır. Yazılan programı hafızaya almaz. Yani bir defaya mahsus programı çalıştırır ve siler.
	Program Restart: Çalışan programın sonu geldikçe tekrar başa dönerek çalışmasını sağlar.
	Programı başlatma tuşudur. Memory ve MDI modundayken çalışır.
	M00 Stop: Program otomatik modda çalışırken M00 kodunu gördüğünde durur ve bu düğme aktif hale kendiliğinden gelir.
	REF – Referans (ZERO RETURN): Kesici takımın, seçilen eksende tezgâhın referans noktasına gönderilmesinde kullanılır
	JOG (Jog Feed): Seçili eksende manuel talaş almak için veya manuel kısa hareketler vermek için kullanılır.
	INC: Seçili eksende manuel talaş almak için veya manuel istenilen miktarda hassas hareketler vermek için kullanılır.
	Handle: Tezgâhta bulunan el kumandasını aktif hale getirip tezgah hareketlerinin el ile operatör tarafından kontrol edilmesini sağlar.
	Coolant: Tezgâhta soğutma suyunun manuel açılmasını sağlar.
	Coolant: Tezgâhta soğutma suyunun manuel kapatılmasını sağlar.
	Tool: Takım magazini çevirmek için kullanılır.
	INC Mod Butonları: Seçili eksene, X1 (0.0001 mm) X10 (0.001 mm) X100 (0.01 mm) ve X1000 (0.1 mm) hassas hareket verir.

Tablo 4.1. (Devam) Operatör panel arayüzünde bulunan kontrol butonları

	Seçili eksene pozitif yönde manuel hareket verilmesi için kullanılır.
	Seçili eksene negatif yönde manuel hareket verilmesi için kullanılır.
	Spindle CW: İş milinin saat yönünde manuel olarak döndürülmesi için kullanılır.
	Spindle CCW: İş milinin saat yönü tersinde manuel olarak döndürülmesi için kullanılır.
	Spindle Stop: İş milinin manuel olarak durdurulması için kullanılır.

Son olarak 6 numaralı bölüm ise, tezgâh üzerinde kesici takımın izleyeceği tüm yörüngenin kartezyen uzaydaki 3 boyutlu analizinin yapıldığı yerdir. Ekran üzerinde detaylı analiz için yörüngenin yakınlaştırılıp uzaklaştırılması, 360° döndürülmesi gibi esnek kullanım özelliği bulunmaktadır. Ürün işleme başlamadan önce operatör tarafından yapılan analiz işlemi, tezgâh üzerinde meydana gelebilecek olası sorunları ve hataları önlemek adına önemli bir yere sahip olduğu için geliştirilen kullanıcı arayüzüne bu özellik eklenmiştir.

Ayrıca analiz kolaylığı için, ekran üzerinde doğrusal hareketler turkuaz, dairesel, helisel ve spiral hareketler yeşil, G05.1 komutuna ilişkin hassas işleme hareketleri kırmızı ve G06.2 komutuna ilişkin NURBS eğrisel hareketleri sarı renkle gösterilmektedir. Şekil 4.8’de bir NC kod için yapılan yörünge analizine ilişkin kesitler örnek olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere kesici takımın izleyeceği yörüngeler farklı açılardan ve mesafelerden detaylı analiz edilebilmektedir. Farklı açılardan analiz edilebilmesinin en büyük avantajı tezgâh üzerinde ürün işleme başlatılmadan önce, çalıştırılacak NC dosyasının başından sonuna kadar kontrol işleminin yapılabilmesidir. Bu kontrol işlemi tezgâh üzerinde gerçekleştirilecek olası çarpışmaların önüne geçmesini sağlamaktadır. Ayrıca bir sorun tespit edilmesi durumunda ise sorunlu bölgenin hareket renginden sorunun hangi hareket türüne ilişkin olduğu da bulunabilmektedir.



Şekil 4.8. Operatör panel arayüzünde esnek yörünge inceleme işlemleri

4.2. TwinCat Yazılım İşlemleri

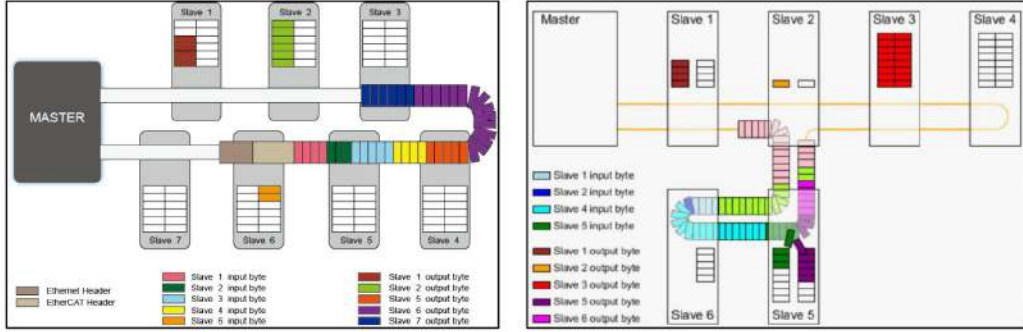
Endüstriyel CNC tezgâhlarında kullanılan AC servo motor sürücüler büyük oranda Ethernet, EtherCat, Profibus, Modbus vb. endüstriyel haberleşme protokollerinden birisine sahiptirler. Endüstriyel seri haberleşme protokollerinden farklı olarak bazı firmaların geliştirmiş olduğu fiber optik temelli AC servo sürücüler de bulunmaktadır. Fakat bu özel sürücülere dışarıdan erişim engeli bulunduğu için sürücü markasından farklı bir kontrol ünitesi ile sürücülerle haberleşme imkânı bulunmamaktadır. Bu nedenle, geliştirilen kontrol ünitesinin servo motorlarla haberleşebileceği sürücü protokolleri, sadece endüstriyel haberleşme protokolleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan tez çalışmasında, bu protokoller arasından en hızlı ve güvenli bir yapıya sahip olması nedeniyle EtherCat protokolü tercih edilmiştir. Ayrıca EtherCat protokolünün Endüstriyel 4.0 kapsamında geliştirilen uygulamalarda sıklıkla kullanılması ve neredeyse tüm AC servo motor sürücüsü geliştiren markaların EtherCat protokol desteği vermesi, tercih sürecinde önemli rol oynamıştır.

4.2.1. EtherCat protokolü

2000’li yıllarda ilk temelleri atılmış EtherCat teknolojisi Ethernet altyapısını kullanan yüksek performanslı bir haberleşme protokolü olarak karşımıza çıkmıştır. Her EtherCAT terminali, iletişim kurallarını işlemekle görevli bir EtherCAT slave denetleyicisi ile donatılmıştır. EtherCat protokolünün Ethernet altyapısını kullanmasına rağmen, Ethernet protokolünden daha hızlı olmasının temel nedeni, ethernet paketinin, ağ düğüm noktasında alınıp yorumlanarak, işlem verileri kopyalandıktan sonra iletilmesi yerine doğrudan süreç içinde işlenmesidir. EtherCAT slave cihazlar, veri paketi geçtiği sırada kendilerine atanan verileri alırken aynı zamanda pakete giriş verilerini ekler. Slave cihazların veriyi alma ve sisteme veri ekleme işlemlerini birkaç nanosaniye içinde gerçekleştirmesi, protokolün yüksek performans göstermesini sağlamaktadır.

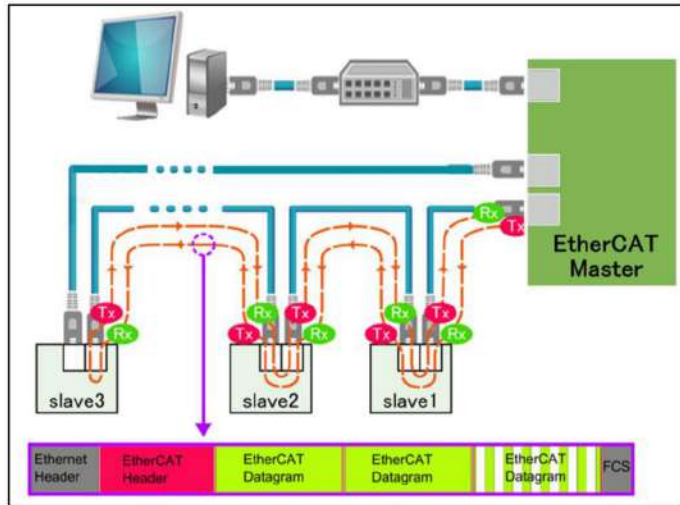
Şekil 4.9’da, Master-Slave arasında veri paketlerinin süreç içinde nasıl okunup-yazıldığı gösteren çalışma yapısı verilmiştir. EtherCat protokolünün çalışma prensibi, veri paketlerinin Master-Slave hattında hiç durmaması (On the Fly) ve veri paketlerinin bir trenin vagonu gibi eklenip çıkarılabilmemesinin kolay olması yönlerinden literatürde yüksek hızlı trene benzetilmektedir. Şekil 4.9’daki veri paketi taşıma

sistemini de bir tren olarak düşünürsek, her bir Slave istasyonu, hattaki her bir renk trenin bir vagonunu ve renk gruplarının elaman sayısı ise tren vagonundaki kişileri temsil etmektedir. Çalışma sisteminin benzetimi ise tren bir hat üzerinde hiç durmadan hareket ederken ilgili istasyonlarda tren vagonları bırakılmakta ya da trene yeni vagonlar eklenmesi olarak tarif edilebilmektedir.



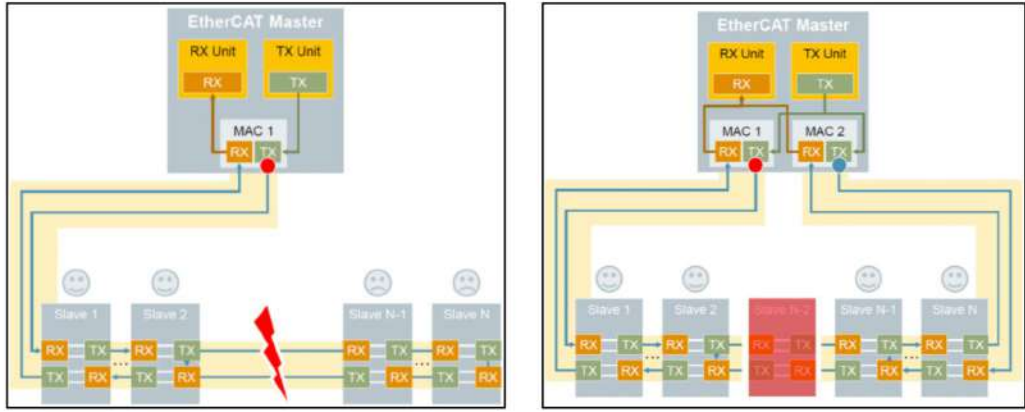
Şekil 4.9. EtherCat çalışma yapısı

Endüstriyel kontrol sistemleri de Master-Slave prensibine göre planlandığı için Şekil 4.9'da görüle çalışma yapısı, endüstriyel uygulamalarda aynı performansta kullanılabilir. Geliştirilen kontrol sistemlerinde Master, sistemin kontrol birimi (bilgisayar, kontrol kartı, vb.) Slave cihazlar ise motor sürücüler, Giriş/Çıkış (IO) terminalleri, sensörler veya aktüatörler olmaktadır. Master-Slave arası sürekli dönen veri paketleri ise kontrol sinyalleri, konum, hız, ivme, tork, vb. sistemle ilişkili bilgileri taşımaktadır. Fiziksel olarak Master-Slave haberleşme sistemi ise Cat5 ethernet kabloları ile sağlanmaktadır.



Şekil 4.10. EtherCat bağlantı yapısı

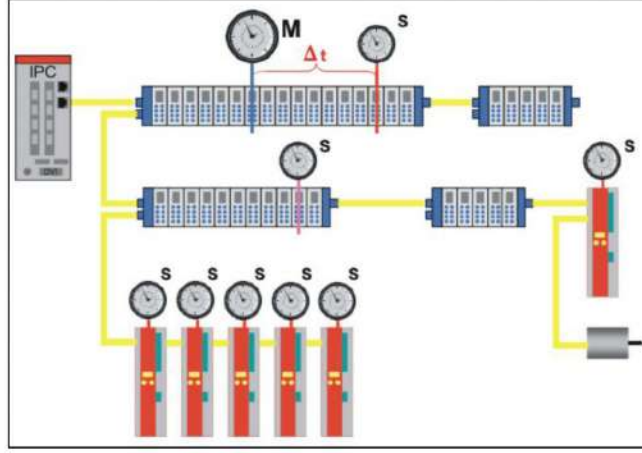
Her Slave cihazında bir giriş bir çıkış olmak üzere iki Ethernet Soketi bulunmakta ve Şekil 4.10'da görülen yapıda bağlantı hattı oluşturulmaktadır. İstenmesi durumunda son Slave cihazından Master cihaza kablo çekilerek kapalı bağlantı hattı kurulabilmektedir. Fakat kapalı bağlantı sisteminin kurulmasının önemli bir avantajı bulunmaktadır. Haberleşme sisteminde bulunan herhangi bir Slave cihazın arızalanması durumunda diğer Slave cihazların durumdan etkilenmemesi ancak kapalı bağlantı sisteminde mümkün olmaktadır. Şekil 4.11'de bir Slave cihaz arızasında, genel haberleşme sisteminin nasıl etkilendiği kapalı ve açık bağlantı hattı için ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 4.11. EtherCat bağlantı yapısı (açık-kapalı)

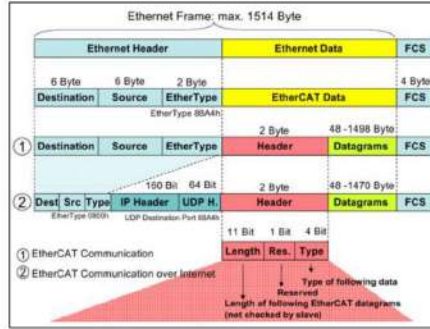
Diğer endüstriyel haberleşme protokollerinde bulunmayıp sadece EtherCat protokolünün bir özelliği olan Master-Slave arası senkronizasyon sağlama desteği, bu çalışmada EtherCat protokolünün seçiminde rol oynayan diğer bir özellik olmuştur. Haberleşme sistemlerinde fiziksel bağlantı Master-Slave₁ -Slave₂-...Slave_N şeklinde sıralı kurulduğu için aradaki gecikmelerden dolayı Slave₁ ile Slave_N'e eş zamanlı bilgi göndermek normal protokollerde mümkün olmamaktadır. Fakat bu fiziksel gecikmeler EtherCat protokolünde dağıtılmış saat özelliği (distributed clock) ile büyük oranda ortadan kaldırılmaktadır. Şekil 4.12'de dağıtılmış saat sisteminin çalışma yapısı gösterilmiştir. Master saat (M) ile Slave cihazlara dağıtılmış saatler (S) ile aradaki zaman farklılıkları (Δt) ölçülmekte ve sinyallerin eş zamanlı Slave cihazlar tarafından işlenmesi sağlanmaktadır. Endüstriyel kontrol uygulamalarında eksenler arası senkronizasyon çok önemlidir. Çünkü bir makinede birbirleriyle uyumlu çalışması gereken eksenler bulunmakta ve bu eksenlere aynı zaman içinde bilgilerin gitmesi gereklidir. Dağıtılmış saatler bu anlamda endüstriyel uygulamalar açısından büyük

fayda sağlamaktadır. Ayrıca eksen sayısı artsa da eksenler arası senkronizasyon performansı büyük oranda aynı kalması bu özelliğin diğer önemli faydasıdır.



Şekil 4.12. Dağıtılmış saat kullanımı

EtherCat protokolüyle ilgili değinilmesi gereken önemli bir konu da Master-Slave hattında sürekli dolaşan veri paketlerinin yapısıdır. Bu veri paketi EtherCat çerçevesi (frame) olarak isimlendirilmektedir ve Şekil 4.13'te görülen yapıya sahiptir. EtherCat protokolünün temelinde EtherNet altyapısı kullanıldığı için çerçeve (frame) yapıları da Ethernet ile benzerlik göstermektedir.



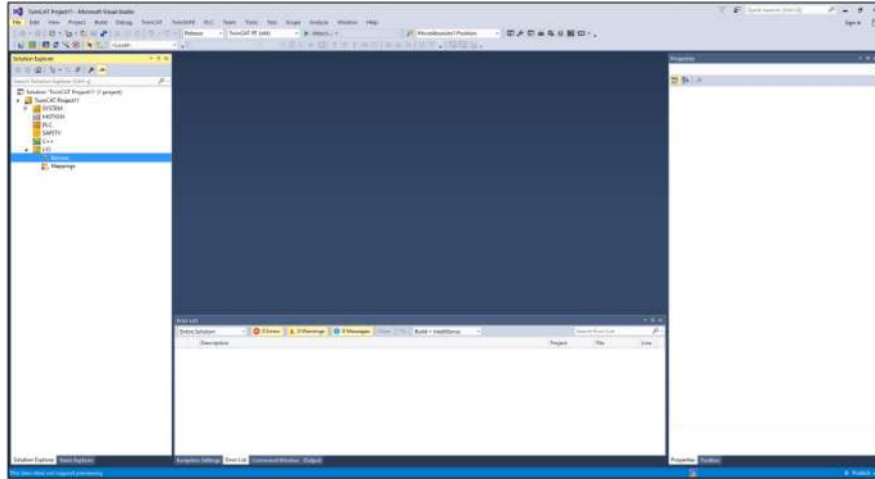
Şekil 4.13. EtherCat frame yapısı

Çerçevenin solunda yer alan mavi kısım, temel bir EtherCAT çerçevesi için 6 byte hedef, 6 byte kaynak ve 2 byte EtherType bilgilerinden oluşan paket başlığıdır. Aslında EtherCat protokolü ile gönderilen veriler, EtherType 0x88A4 kullanılarak doğrudan standart IEEE 802.3 Ethernet çerçevesi içinde taşınmaktadır. İkinci (sarı veya kırmızı/yeşil) kısım, bir EtherCAT başlığına ve bir veya daha fazla EtherCAT datagramına (veri) bölünebilen EtherCAT verilerini içerir. EtherCAT başlığı, protokol tipini ve EtherCAT datagramlarının uzunluğu hakkında bilgi içerir. Başlıktan sonra,

aktarılmakta olan ham veri bitlerini (EtherCAT konfigürasyon verileri ve okuma/yazma işlem verileri) içeren bir veya daha fazla datagram bulunmaktadır. Çerçevenin son kısmı ise, hata tespiti için kullanılan çerçeve kontrol dizisidir (FCS: Frame Check Sequence).

4.2.2. TwinCat programı

Visual Studio ortamında C# dili ile geliştirilen operatör panel yazılımı CNC tezgâhının ana kontrol merkezidir. Bu yazılıma ek olarak, EtherCat protokolü üzerinden fiziksel sistemle haberleşme ağı kurulabilmesi için Beckhoff® firmasına ait olan TwinCat programı kullanılmıştır. TwinCat aslında endüstriyel otomasyon uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir PLC (Programmable Logic Control) programıdır. CNC tezgâhlarında PLC tarafından kontrol edilmesi gereken aktüatörler ve PLC tarafından okunması gereken sensörler olmasından dolayı kontrol ünitesinin bir PLC birimine ihtiyaç duyması, TwinCat programının haberleşme altyapısının EtherCat olması ve TwinCat programının Visual Studio ortamında çalışıyor olması bu çalışmada da TwinCat programının tercih edilmesinin temel sebepleri olmuşturlar. Visual Studio ortamında çalışan TwinCat programı Şekil 4.14'te görülen ara yüze sahiptir.



Şekil 4.14. TwinCat arayüzü

Normalde endüstride kullanılan PLC ürünlerine bakıldığında fiziksel bir donanıma sahip oldukları görülür. Fakat bilgisayar ortamında bulunan TwinCat programı, üzerinde çalıştığı bilgisayarı hareket kontrol ya da PLC kontrol cihazına dönüştürerek işletim sisteminin gerçek zamanlı çalışmasını sağlayabilmektedir. Bu nedenle

bilgisayar haricinde bir donanım ihtiyacı bulunmamaktadır. TwinCat programının kurulu olduğu bir bilgisayarın gerçek zamanlı çalışma gösteremediği durumlarda olabilir. Bu durumun sebebi ise, bilgisayarda bulunan ethernet kartının gerçek zamanlı çalışmaya uyumlu olmamasıdır. Bu nedenle bilgisayar üzerinde TwinCat yazılım işlemlerine başlamadan önce, program içerisinde ethernet kartının uyumlu olup olmadığının sorgulanması önemlidir. Uyumluluk sorgulamasından slave cihazın EtherCat hattında bulunması ve sonrasında PLC yazılımına başlanmasına kadar olan süreç Ek-A'da detaylı anlatılmıştır.

TwinCat ortamında yazılım işlemlerine başlamadan önce, TwinCat programının CNC kontrol ünitesindeki görev tanımının net bir şekilde ifade edilmesi gerekir. TwinCat yazılımının temel görevi, operatör panel yazılımı ile fiziksel sistem arasında EtherCat protokolü üzerinden köprü kurmaktır. CNC-Freze tezgâhları, kullanım yerlerine ve ihtiyaçlarına göre farklı donanımlara sahip olurlar. Fakat neredeyse her CNC tezgâhında eksen motorları ve sürücüler, spindle motoru ve sürücüsü, IO terminali, el kumandası ve klavye takımı bulunmaktadır. Bu ortak donanımlar dışında, takım değiştirme magazini, soğutma sıvısı sistemi, spindle soğutma fanı gibi farklı aktüatörler, motorlar veya sensörler de tezgâh üzerinde bulunabilir. Ortak veya özel, tezgâh üzerindeki tüm donanım ekipmanlarına giden veya bu ekipmanlardan gelen tüm veriler (sinyaller) TwinCat ortamından gönderilmekte veya okunmaktadır. Fakat gönderilen ve alınan tüm veriler, operatör panel yazılımında değerlendirildiği için TwinCat yazılımı ile operatör panel yazılımının birbirlerine entegre çalışması gerekmektedir. Bu aşamada ise ADS (Automation Device Specification) haberleşme sistemi kullanılmaktadır. ADS protokolü, TwinCat sistemi içindeki bir aktarım katmanıdır ve farklı yazılım modülleri arasında veri alışverişi için geliştirilmiştir. TCP/IP'nin üst katmanında yer alan ADS protokolü, TwinCat içindeki herhangi bir noktadan diğer araçlarla haberleşebildiği için yazılım entegrasyonlarında önemli rol oynamaktadır. Şekil 4.15'te farklı yazılım modülleri (Visual Basic, C++, Visualisation, TwinCat) arasında ADS üzerinden nasıl haberleşme sistemi kurulduğu gösterilmiştir. Ayrıca şekilde görüldüğü üzere başka bir bilgisayar veya cihazla (BK9000:Bus Coupler) da iletişim kurmak ADS protokolü üzerinden mümkün olmaktadır.

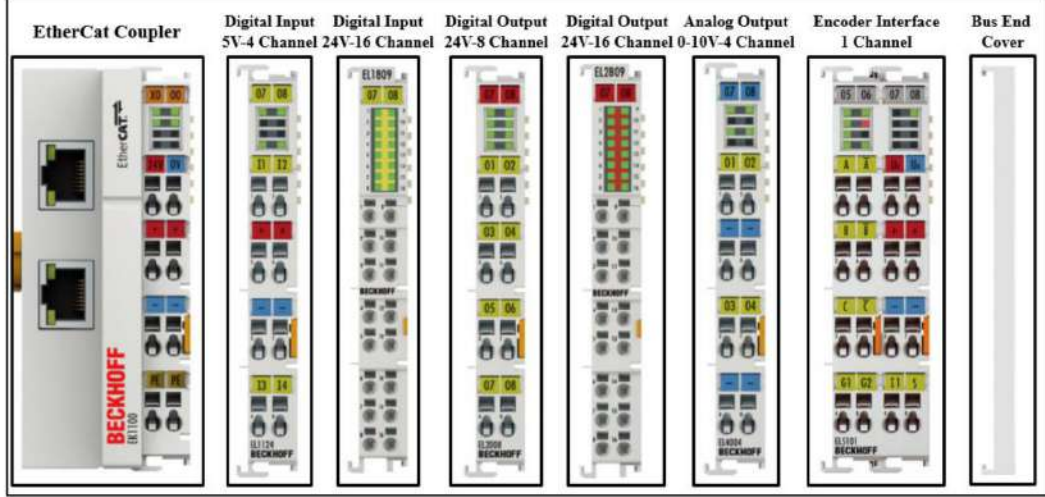
terminallerine bağlı donanım sayıları da her tezgâh için değişkenlik gösterebilmektedir. Şekil 4.16’da görüldüğü üzere, yapılan çalışmada IO terminali EtherCat protokolüne bağlı, Tuş takımı ve el kumandası ise IO terminaline bağlıdır. Bu haberleşme sisteminin fiziki ortamda kurulabilmesi için bazı donanımlara ihtiyaç vardır. Bu donanımların başında EtherCat bağlayıcı (EtherCat Coupler) gelmektedir. EtherCat bağlayıcılar, fiziksel IO sinyallerinin, dijital sinyallere dönüştürölüp EtherCat protokolü üzerinden Master PC’ye gönderilmesi işlemini yürütmektedir. EtherCat haberleşme hattı bus topolojisi temelinde kurulduğu için, bir EtherCat bağlayıcı da giriş ve çıkış olmak üzere iki ethernet soketi bulunmaktadır. Master veya Slave cihazdan gelen ethernet kablosu girişe bağlanırken, başka bir Slave cihaza giden ethernet kablosu ise çıkış hattına bağlanmaktadır. Bu özelliklere sahip Omron ve Beckhoff markalarına ait EtherCat bağlayıcıları Şekil 4.17’de örnek olarak gösterilmiştir.



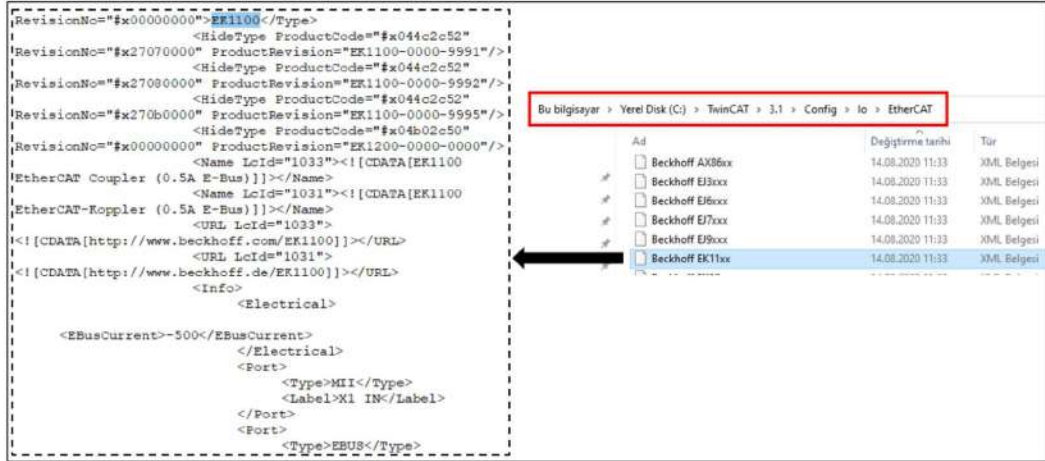
Şekil 4.17. EtherCat bağlayıcıları

EtherCat bağlayıcısından sonra, tezgâh üzerindeki donanımların fiziksel sinyal özelliklerine uygun modüller seçilerek bir terminal oluşturulmaktadır. Örneğin, 4 adet 5V, 16 adet 24V dijital giriş, 24 adet 24V dijital çıkış, 4 adet analog çıkış ve 1 adet el kumandası enkoder girişinin bulunduğu bir tezgâh için, Şekil 4.18’de görülen fiziksel yapı kurulmaktadır. Tüm modüller EtherCat bağlayıcıya bağlıdır ve terminal sonunda da bir sonlandırıcı bulunmaktadır. Fiziksel sinyallerin toplandığı Şekil 4.18’deki IO terminalinin EtherCat üzerinden gönderdiği bilgilerin, Master PC (TwinCat yazılımı) tarafından anlaşılabilmesi için EtherCat bağlayıcıya ait bir dosyanın (XML dosyası) Master PC’de çalışan TwinCat yazılımına tanıtılması gereklidir. Bu dosyada, EtherCat bağlayıcının gönderdiği tüm EtherCat paketlerinin bilgileri bulunmaktadır. İlgili XML

dosyasının, Master PC’de bulunması gereken adresi ve dosya içerisinde kısa bir bölüm Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

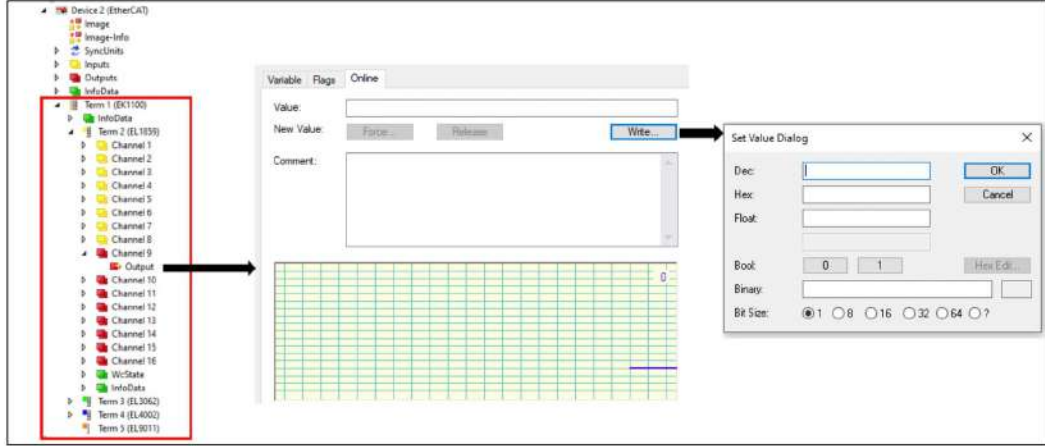


Şekil 4.18. EtherCat bağlayıcı ile IO terminal kurulumu



Şekil 4.19. EtherCat bağlayıcısına ait XML dosyasının TwinCat yazılımına eklenmesi

Gerekli ön işlemlerin yapılması sonrasında TwinCat ortamında Slave cihaz araması yapılarak EtherCat hattına bağlı IO terminaline ait bilgilere ulaşılmaktadır. Şekil 4.20’de, EK1100 EtherCat bağlayıcısına bağlı IO modüllerine (EL1859, EL3062, EL4002, EL9011) ait bilgilere nasıl ulaşıldığı gösterilmiştir. Bir PLC programı yazmadan IO modüllerinin manuel kontrolü de mümkündür. Şekil 4.20’de görüldüğü üzere kontrol edilecek modülün ilgili kanal numarası seçilerek gerçek zamanlı bilgiler yazılabilmekte veya okunabilmektedir.



Şekil 4.20. IO terminaline bağlı modüllerin kontrolü

4.2.2.2. Motor sürücü EtherCat bağlantısının kurulması

EtherCat protokolünün endüstriyel uygulamalarda kullanımının yaygınlaşması, AC servo motor sürücülerinde de EtherCat protokolünün kullanımını artırmıştır. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen önemli servo motor markalarının neredeyse tümünde EtherCat destekli servo sürücüler bulunmaktadır. Fakat servo motor alanında hizmet veren firmalar var olan sürücülerini EtherCat protokolüne dönüştürürken sıfırdan bir çalışma yapmak yerine CANopen protokolünde kullandıkları veri paketlerini EtherCat protokolü üzerinden göndermenin yöntemini bulmuşlardır. Böylelikle EtherCat protokolünün ‘On the Fly’ özelliğini kullanarak güvenli ve hızlı servo kontrol imkânı sağlamışlardır. CANopen veri paketlerinin EtherCat protokolü üzerinden gönderilmesi ‘CANopen over EtherCAT (CoE)’ ismiyle ifade edilmektedir.

CoE protokolü, tüm CANopen profil ailesinin EtherCAT aracılığıyla kullanılmasını sağlarken 8 bayt sınırını kaldıran ve nesne listesinin tam olarak okunabilirliğini sağlayan isteğe bağlı uzantılar tanımlanabilmektedir. İşlem verileri, EtherCAT ‘in verimli araçları kullanılarak 8 bayt sınırı olmadan aktarılan işlem verisi nesnelere (PDO: Process Data Object) düzenlenmektedir. PDO’lar servo motor sürücüsüne gönderilen ve servo sürücüsünden gelen gerçek zamanlı verileri taşıyan nesnelere. Ayrıca servo sürücüler için önemli bir diğer nesne türü ise servis verisi nesnelere (SDO: Service Data Object). SDO’lar gerçek zamanlı gönderilmesi gerekmeyen, sürücülerin yapılandırılmasına ilişkin parametreleri taşımakla görevlidir. Özetle bir

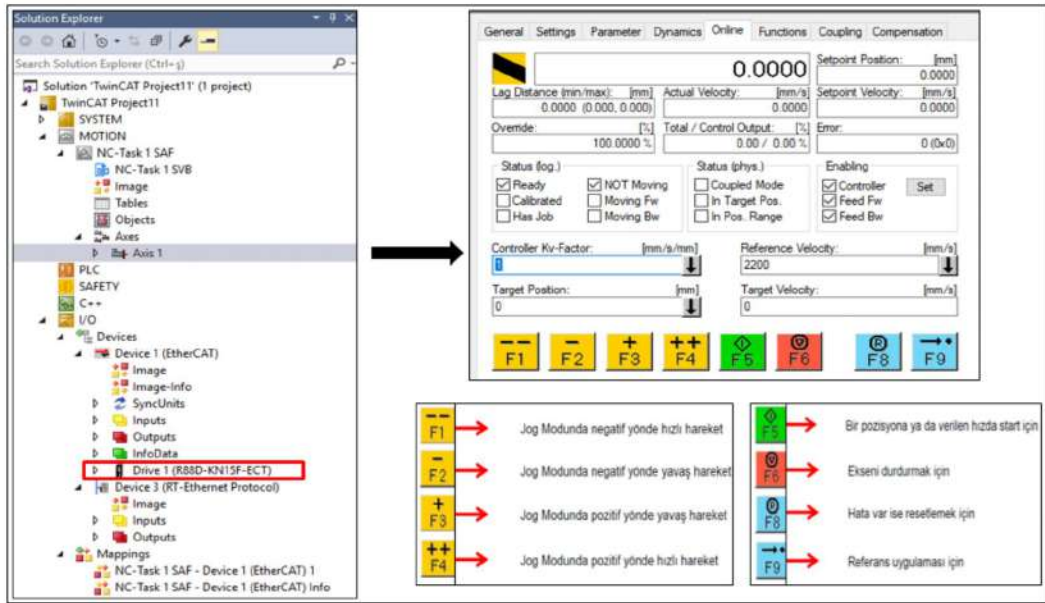
servo sürücüsünün kontrolü PDO ve SDO nesneleriyle sağlanmaktadır. EtherCat hattına bağlı kaç AC servo motor sürücüsü varsa her bir sürücü Slave cihaz konumuna geçmektedir. Haberleşme hattındaki her Slave bağlantısı bir düğüm olarak adlandırılır ve CANopen haberleşme hattındaki her düğümün yani hattaki her cihazın “ID” kimlik numarası olması gerekir. Bu kimlik numarası olası çakışmaları engellemek için her cihaz için farklı olmak zorundadır. ID numaralarıyla kategorize edilen servo sürücüler PDO ve SDO nesnelerini, nesne dizini ve nesne alt dizini adresleriyle Master PC’ye göndermektedir. Dolayısıyla her bir servo sürücüye ait nesne dizini ve nesne alt dizinlerinin açıklamalarının olduğu bir dosyaya ihtiyaç vardır. Bu dosya EtherCat bağlayıcılarında olduğu gibi sürücülere ait XML dosyalarıdır. XML dosyaları bir sürücünün tüm CANopen haberleşmesine ilişkin bilgileri içerdiği için kritik öneme sahiptir. XML dosyasının sürücü modeli ile uyumlu olmaması durumunda EtherCat protokolü üzerinden sürücü ile haberleşmek imkansız hale gelmektedir. Uyumluluk sorunu ise en çok kullanılan sürücü modeliyle XML dosyası arasındaki versiyon farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle mutlaka XML dosyasının kullanılan sürücüye ait olup olmadığının kontrol edilmesi gereklidir. EtherCat hattındaki servo sürücülerin TwinCat yazılımı ile kontrol edilebilmesi için XML dosyalarının tanıtılması işlemi yapılır. Şekil 4.21’de, Omron R88D-KNxxx-ECT sınıfından bir servo sürücünün TwinCat yazılımının çalışacağı Master PC’de bulunması gereken adresi gösterilmiştir. Ayrıca XML dosyası içinde yer alan bir PDO nesnesine (hedef pozisyon) ilişkin bilgiler örnek olarak verilmiştir.



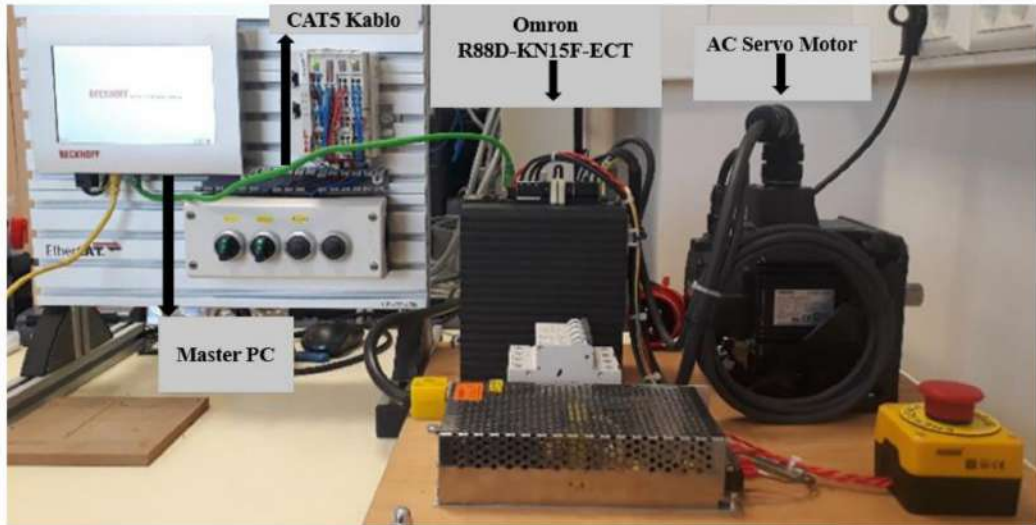
Şekil 4.21. Servo sürücüsüne ait XML dosyasının TwinCat yazılımına eklenmesi

Gerekli ön işlemlerin yapılması sonrasında TwinCat ortamında Slave cihaz araması yapılarak EtherCat hattına bağlı servo sürücülere ait bilgilere ulaşılmaktadır. Tarama

işlemi sonrasında hatta bulunan servo sürücü otomatik olarak eksen (axes) olarak atanmaktadır. Oluşturulan bu eksen üzerinden manuel servo motor kontrolü yapmak mümkündür. Şekil 4.21’de görülen XML dosyası kullanılarak Omron R88D-KN15F-ECT model sürücünün hatta bulunması sonrasında bilgilerine nasıl ulaşıldığı Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Ayrıca şekilde, oluşturulan eksen (Axis1) üzerinden manuel kontrol işlemlerinin yürütüldüğü bölüm de yer almaktadır. Yazılım bölümünde bilgileri görülen servo motor ve sürücüsünün, Master PC ile fiziksel bağlantısı Şekil 4.23’te yer almaktadır.



Şekil 4.22. TwinCat yazılımı ile servo sürücünün kontrol edilmesi

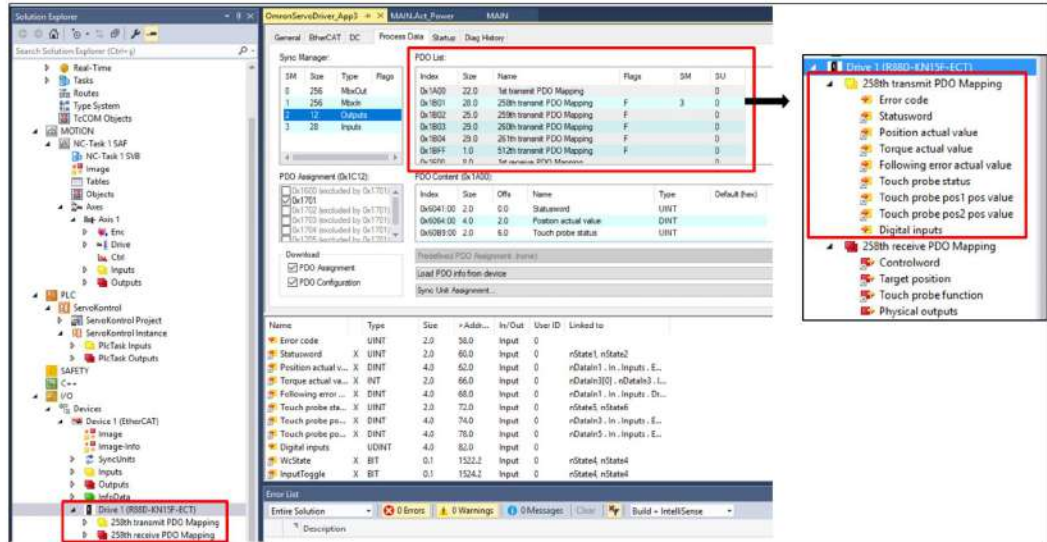


Şekil 4.23. Master PC ile servo sürücü arasındaki fiziksel bağlantının kurulumu

EtherCat protokolünün CANOpen veri paketleri üzerinden çalışmasının önemli bir avantajı da PDO haritalandırma (mapping) işlemidir. Sürücüyü geliştiren firma tarafından birbiriyle ilişkili PDO'lar gruplandırılarak bir harita altında saklanmaktadır. Omron R88D-KN15F-ECT)sürücüsüne ait bir PDO haritalandırılması (258th transmit PDO Mapping) Şekil 4.24'te örnek olarak gösterilmiştir.

1B01 hex 258th transmit PDO Mapping						
Sub-index 00 hex		Number of objects in this PDO				
Range	-	Unit	-	Default	09 hex	Attribute -
Size	1 byte (U8)		Access	RO	PDO map	Not possible
Sub-index 01 hex		PDO entry 1 (1st Input Object to be mapped)				
Range	-	Unit	-	Default	603F 0010 hex	Attribute -
Size	4 bytes (U32)		Access	RO	PDO map	Not possible
Sub-index 02 hex		PDO entry 2 (2nd Input Object to be mapped)				
Range	-	Unit	-	Default	6041 0010 hex	Attribute -
Size	4 bytes (U32)		Access	RO	PDO map	Not possible
Sub-index 03 hex		PDO entry 3 (3rd Input Object to be mapped)				
Range	-	Unit	-	Default	6064 0020 hex	Attribute -
Size	4 bytes (U32)		Access	RO	PDO map	Not possible
Sub-index 04 hex		PDO entry 4 (4th Input Object to be mapped)				
Range	-	Unit	-	Default	6077 0010 hex	Attribute -
Size	4 bytes (U32)		Access	RO	PDO map	Not possible
Sub-index 05 hex		PDO entry 5 (5th Input Object to be mapped)				
Range	-	Unit	-	Default	60F4 0020 hex	Attribute -
Size	4 bytes (U32)		Access	RO	PDO map	Not possible
Sub-index 06 hex		PDO entry 6 (6th Input Object to be mapped)				
Range	-	Unit	-	Default	60B9 0010 hex	Attribute -
Size	4 bytes (U32)		Access	RO	PDO map	Not possible
Sub-index 07 hex		PDO entry 7 (7th Input Object to be mapped)				
Range	-	Unit	-	Default	60BA 0020 hex	Attribute -
Size	4 bytes (U32)		Access	RO	PDO map	Not possible
Sub-index 08 hex		PDO entry 8 (8th Input Object to be mapped)				
Range	-	Unit	-	Default	60BC 0020 hex	Attribute -
Size	4 bytes (U32)		Access	RO	PDO map	Not possible

Şekil 4.24. Servo sürücü PDO haritalandırması (mapping)



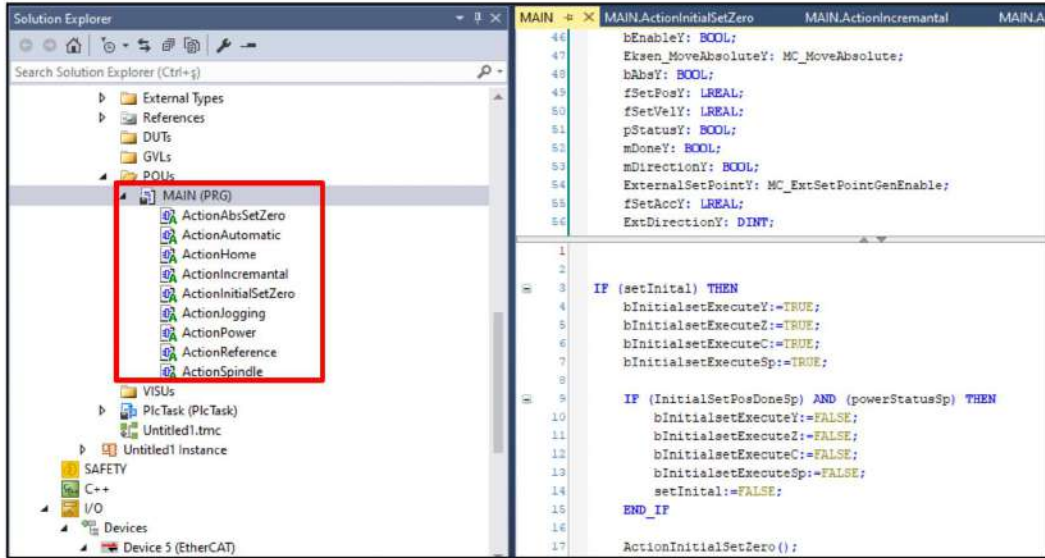
Şekil 4.25. TwinCat yazılımında PDO haritalarının kullanımı

Sürücü özelinde yapılan haritalandırmalar, XML dosyasında belirtildiği için TwinCat ortamında da PDO haritalarına ulaşmak mümkündür. Şekil 4.25'te yine aynı motor

sürücüsüne ait PDO bilgilerine TwinCat ortamında nasıl ulaşıldığı gösterilmiştir. Ayrıca şekilde, Şekil 4.24'te dizin numaraları ile görülen dokuz PDO'dan oluşan 258. gönderim PDO haritasına ait parametrelerin bilgileri de yer almaktadır.

4.2.2.3. TwinCat PLC yazılımı

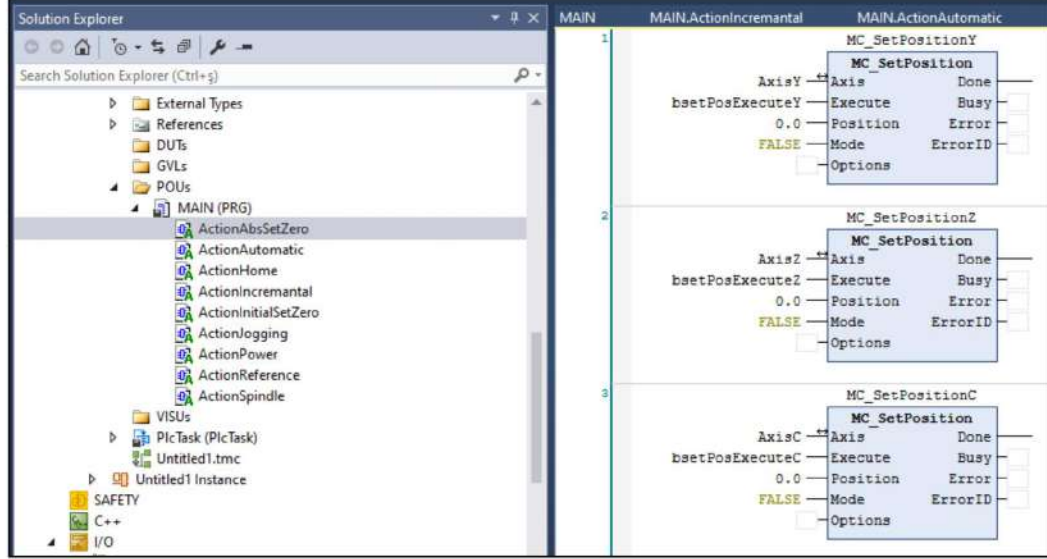
IO terminali ve servo motor sürücüleriyle EtherCat protokolü üzerinden haberleşme işleminin sağlanmasından sonra PLC program yazılımına geçilmektedir. Önceki bölümde belirtildiği üzere TwinCat programı kendi yazılım diline ek olarak, talimat listesi (IL), yapılandırılmış metin (ST), sıralı fonksiyon şeması (SFC), fonksiyon blok şeması (FBD), sürekli fonksiyon şeması düzenleyicisi (CFC) ve merdiven şeması (LD) gibi farklı PLC programlama dillerini de desteklemektedir. Yapılan çalışmada PLC yazılımının ana kontrol birimi olarak TwinCat programının kendi yazılım dili, ek görev birimleri için ise fonksiyon blok (FBD) şeması dili kullanılmıştır. Şekil 4.26'da TwinCat yazılım diliyle geliştirilmiş ana program biriminden bir bölüm, Şekil 4.27'de ise FBD diliyle yazılmış fonksiyonlardan bir bölüm gösterilmiştir.



Şekil 4.26. CNC kontrol ünitesi PLC yazılımı (ana program)

CNC kontrol ünitesinin PLC yazılımı temel olarak yedi bölüme ayrılmıştır. CNC tezgâhının çalışma modları (AUTO, JOG, INC, HOME, REF, HND) yazılımın altı bölümünü kapsarken, bir bölümü de IO terminal kontrolü oluşturmaktadır. Çalışma modları ise kendi arasında pozisyon kontrolü ve hız kontrolü olmak üzere iki gruba

ayrılmıştır. Bu doğrultuda oluşan kontrol türleri ile çalışma modları arasındaki ilişki durumu Tablo 4.2’de gösterilmiştir.



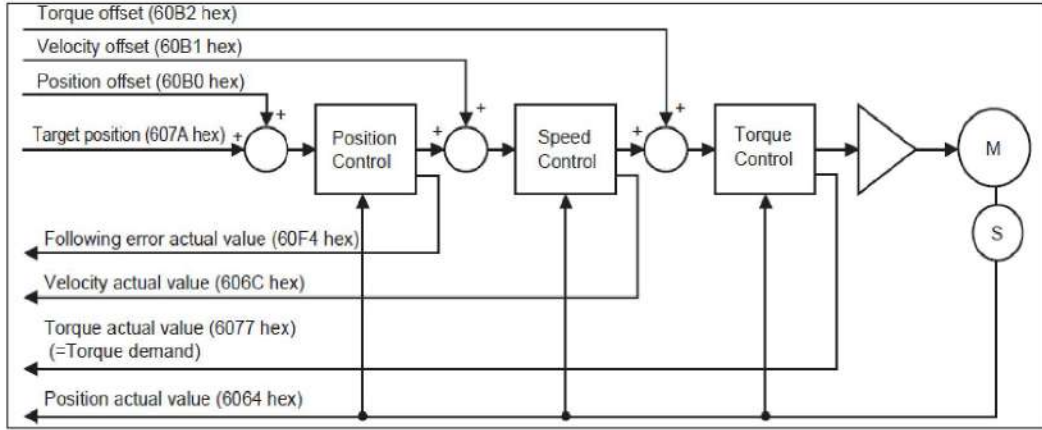
Şekil 4.27. CNC kontrol ünitesi PLC yazılımı (fonksiyon programları)

Tablo 4.2. CNC çalışma modlarına göre kontrol türleri

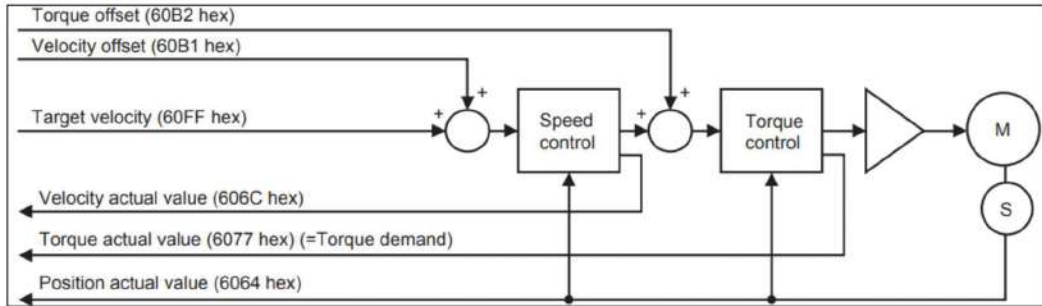
Kontrol Türü	CNC Tezgâhı Çalışma Modları						IO
	AUTO	JOG	INC	HOME	REF	HND	
Pozisyon	X		X	X	X		
Hız		X				X	
IO							X

AUTO modu, CNC tezgâhının G-kodlar temelinde ürün işleme yaptığı en önemli çalışma modudur. Dolayısıyla mikron seviyelerde konum kontrolü ve eksenler arası senkronizasyonun sağlanması gereklidir. INC modu seçili eksende 0.1, 0.01, 0.001 veya 0.0001 mm hassasiyetinde hareketin tanımlandığı bölümdür ve hassas konum kontrolü gereklidir. HOME ve REF modları ise tezgâhın bulunduğu konumdan makine sıfırına veya makine sıfır referanslarına gönderildiği bölümlerdir. Bu iki çalışma modunda yine hassas konum kontrolü ön plandadır. Hız kontrolünün yeterli olduğu JOG ve HND çalışma modlarında ise konum hassasiyeti çok kritik değildir. Doğrudan operatör tarafından yönetilen bu iki bölümde konum hassasiyeti operatör tarafından sağlandığı için hız kontrolü yeterli olmaktadır. Konum veya hız kontrollerinden birinin uygulanması için CANopen veri paketleri içinden ilgili dizin numaralarının bilinmesi gereklidir. Bu bilgiler, tezgâh üzerinde kullanılan servo sürücünün XML dosyasından

öğrenilmektedir. Örneğin önceki bölümde detayları verilen Omron R88D-KN15F-ECT model servo sürücünün, kapalı çevrim pozisyon kontrol yapısı ve kapalı çevrim hız kontrol yapısı Şekil 4.28 ve 4.29’da görüldüğü gibidir.

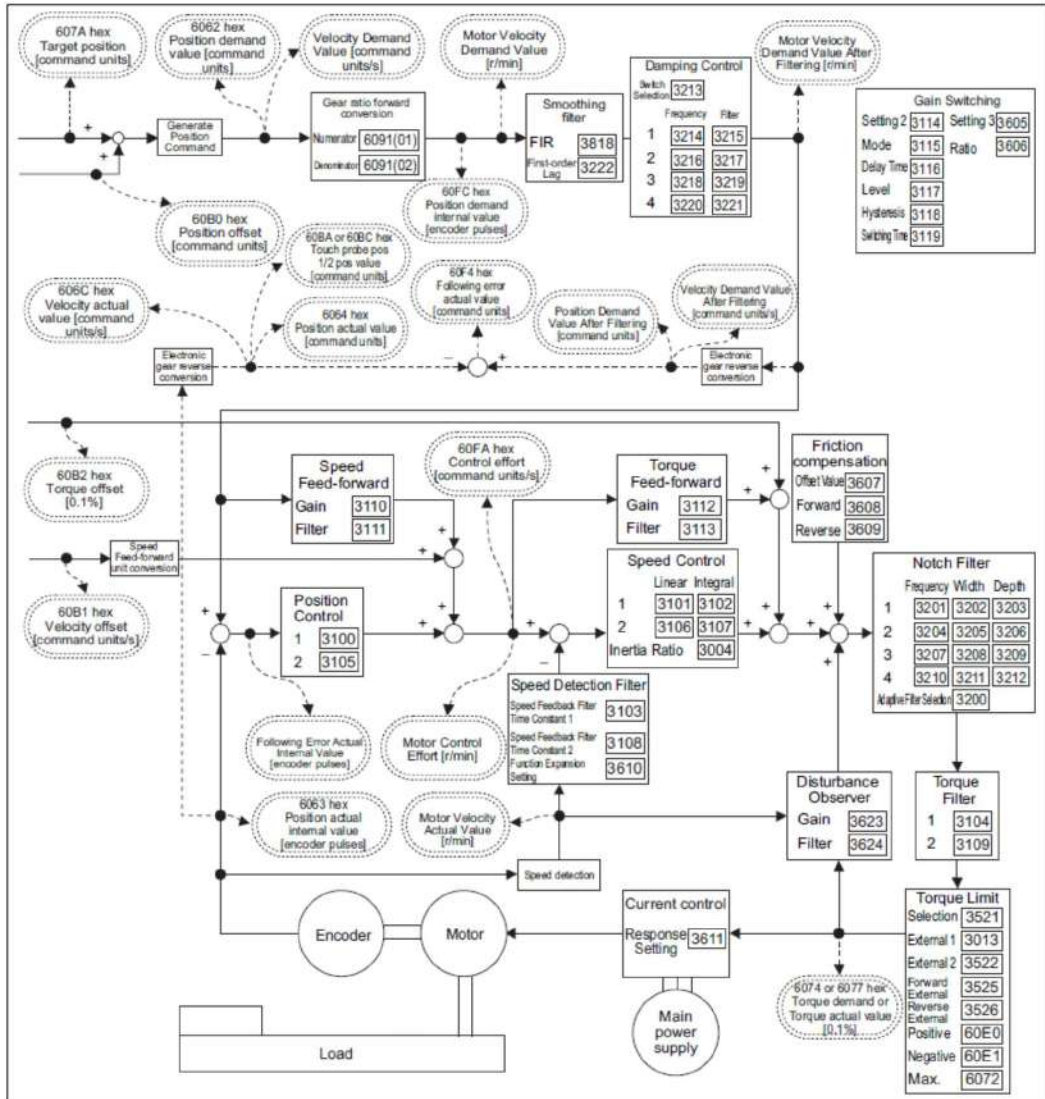


Şekil 4.28. AC servo motor pozisyon kontrol kapalı çevrim yapısı



Şekil 4.29. AC servo motor hız kontrol kapalı çevrim yapısı

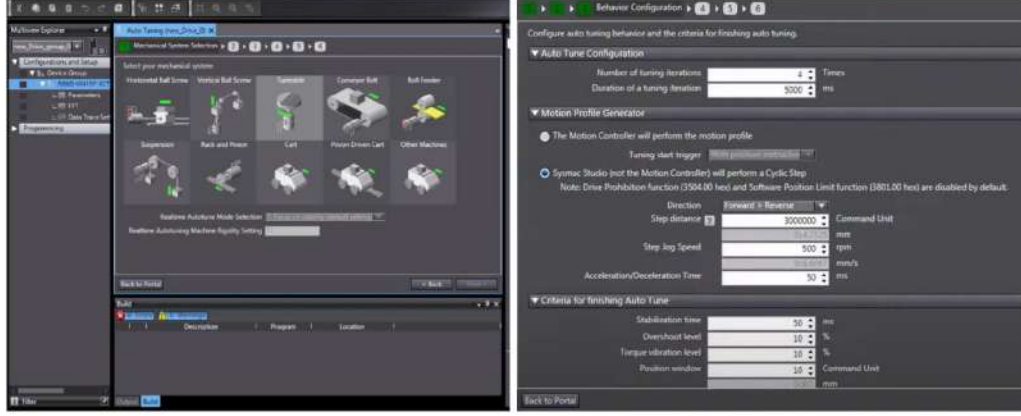
Her iki kontrol yapısında da hedef pozisyon (target position) ve hedef hız (target velocity) değerlerine ilişkin dizin numaraları görülmektedir. EtherCat protokolü üzerinden bu dizin numaralarına gerekli değerlerin gönderilmesi sonucunda hedef kontrol işlemi gerçekleşmektedir. Fakat bunlara ek olarak, servo motor kontrolcü katsayıları, offset değerleri, dişli veya vidalı mil oranları, gürültü filtre katsayıları gibi SDO verilerinin de sürücüye doğru bir şekilde tanımlanması gereklidir. SDO dizin numaraları da yine sürücü XML dosyasında bulunmaktadır. Şekil 4.30’da R88D-KN15F-ECT model servo sürücünün kapalı çevrim pozisyon kontrolünde kullanılan SDO parametreleri örnek olarak gösterilmiştir. Her bir parametreye ilgili dizin numaraları üzerinden erişilebilmektedir.



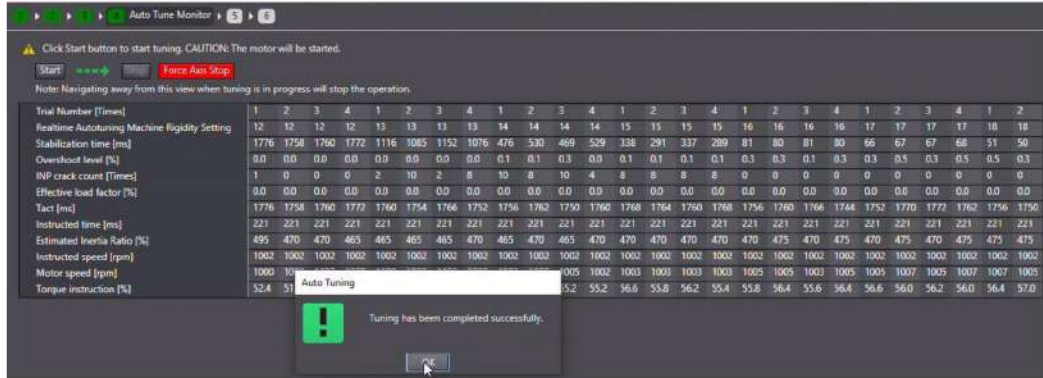
Şekil 4.30. Sürücü kontrol parametreleri

Şekil 4.30'daki kapalı çevrim kontrol parametrelerinin, servo motorun tezgâh üzerine takılması sonrasında yapılması daha sağlıklıdır. Çünkü motorun çalışacağı yük altında kontrol parametrelerinin belirlenmesi, tezgâhın üretim sırasındaki kontrol performansını artırmaktadır. Bu parametrelerin TwinCat yazılımından ayarlanması mümkündür. Fakat bu işlemler genellikle servo sürücünün kendi yazılımı üzerinden otomatik ayar (auto-tune) işlemi ile yapılmaktadır. Omron marka sürücüler Sysmac Studio programını kullandığı için, yukarıda detayları verilen R88D-KN15F-ECT model servo sürücünün auto-tune işlemi ile yapılandırılması da Şekil 4.31'de görüldüğü gibi Sysmac Studio programı ile yapılmıştır. Servo motorun bağlı olduğu mekanik sistem programda belirtildikten sonra motorun auto-tune işlem parametreleri

tanımlanarak süreç başlatılmaktadır. Servo sürücü, servo motor yapısına göre değişkenlik gösteren iterasyon sayısı sonrasında Şekil 4.32’de görüldüğü gibi süreci sonlandırıp sürücü kontrol katsayılarını belirlemektedir.



Şekil 4.31. Sysmac Studio sürücü yapılandırma işlemi

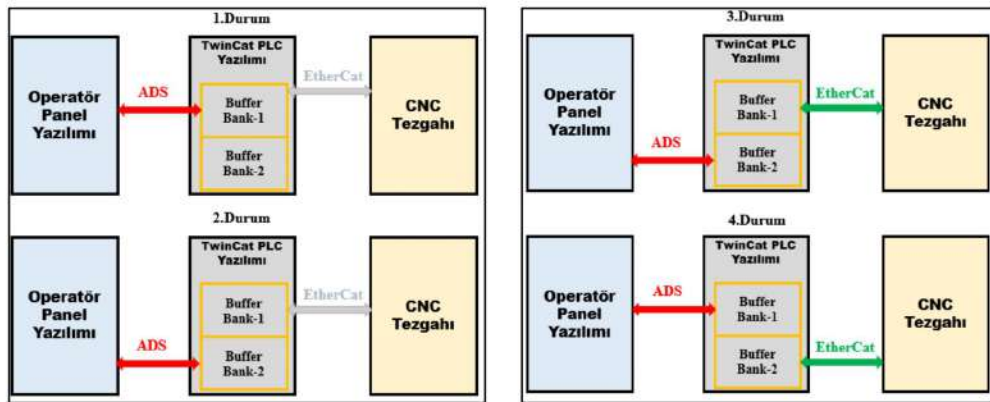


Şekil 4.32. Sürücü yapılandırılması iterasyon işlemlerinin sonlanması

Geliştirilen PLC yazılımı 1ms veri yenileme zamanı ile çalıştığı için kontrol işlemlerinde hedef değerler 1ms aralıklarla gerçek zamanlı yenilenmektedir. Fakat PLC yazılımı, EtherCat protokolüyle fiziksel sistemlere bağlı olurken aynı zamanda da ADS protokolü üzerinden operatör panel yazılımı ile haberleşmektedir. ADS protokolü TCP/IP altyapısıyla çalıştığı için veri gönderim ve alım sürelerinde değişiklik gösterebilmektedir. Fakat EtherCat protokolü gerçek zamanlı fiziksel sisteme veri gönderdiği için sabit örnekleme zamanı (1ms) ile çalışmaktadır. Haberleşme altyapılarından kaynaklı bu zaman farklılığından dolayı, fiziksel sisteme gönderilecek her bir verinin tek tek operatör panel yazılımından alınıp TwinCat yazılımı ile tezgâh donanımlarına gönderilmesi işlemi yapılamamaktadır. Çünkü

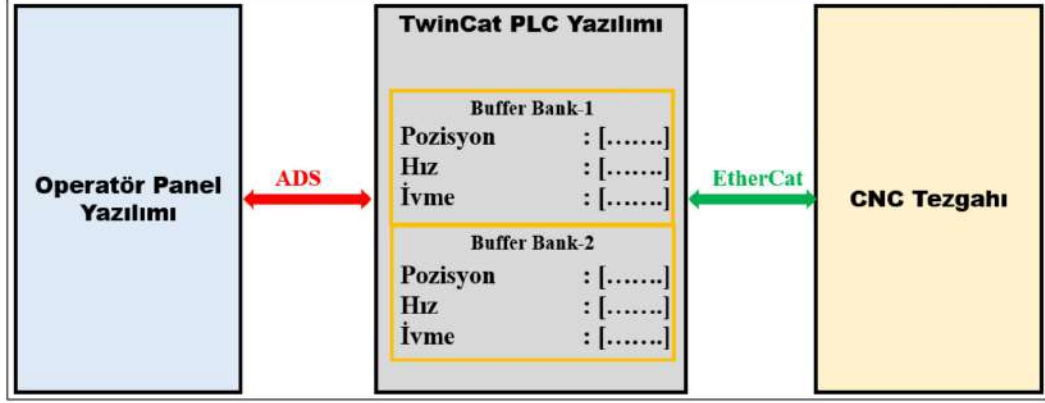
tezgâh kontrolüne ilişkin hareket planlamaları sabit örnekleme zamanına göre oluşturulmaktadır. Bu nedenle de EtherCat protokolü üzerinden her verinin 1ms zaman aralıklarıyla gönderilmesi gerekir. Aksi takdirde ADS protokolünden kaynaklı bir gecikmeden dolayı veriler 1ms’de bir tezgâh motorlarına gönderilemez ise tezgâh hareketlerinde titreşimler ve vuruntular görülür.

Bu doğrultuda haberleşme hızlarındaki farklılık göz önünde bulundurularak, konum kontrolünün ve senkronizasyonun çok önemli olduğu AUTO, HOME ve REF modlarında kullanılmak üzere PLC yazılımında ikili buffer (ping-pong buffer) mekanizması geliştirilmiştir. Diğer üç çalışma modunda (JOG, INC, HND) ve IO terminal kontrolünde ise buffer kullanılmadan kontrol parametreleri gerçek zamanlı ADS protokolü üzerinden alınmaktadır. Geliştirilen ping-pong buffer mekanizması EtherCat ile ADS arasındaki olası haberleşme hız farklılığını ortadan kaldırma görevini üstlenmektedir. CNC kontrol ünitesi için kurulan ikili ping-pong buffer mekanizmasının ilk dört durumunu gösteren blok diyagramı Şekil 4.33’te gösterilmiştir. Başlangıçta ADS üzerinden veri alma işlemi Buffer Bank-1’e aittir. Buffer dolduktan sonra ADS’den gelen veriler Buffer Bank-2’de toplanmaktadır. Bu ilk iki durum için EtherCat protokolü pasiftir. İki Buffer’ın da dolması sonucu Buffer-Bank-1’deki veriler EtherCat protokolü ile tezgâh motorlarına gitmektedir (3.Durum). Buffer-Bank-1 içindeki tüm veriler aktarıldıktan sonra, Buffer-Bank1 ADS’ye dönmekte, Buffer-Bank2 ise gerçek zamanlı EtherCat protokolüne geçmektedir (4.Durum). Tezgâh ürün işlemlerini bitirene kadar veya tezgâh operasyonları durdurulana kadar 3. ve 4. Durumlar arası geçiş devam etmektedir.



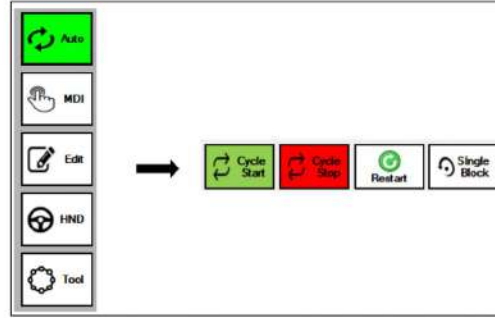
Şekil 4.33. CNC kontrol ünitesi ikili ping-pong buffer mekanizması

AUTO, HOME ve REF modlarında kullanılan buffer mekanizması, eksen motorları için operatör panel yazılımından her eksen için gelen pozisyon, hız ve ivme vektörlerini Şekil 4.34'te görüldüğü gibi ayrı ayrı toplamaktadır.



Şekil 4.34. Pozisyon, hız ve ivme vektörlerinin buffer mekanizmasına aktarılması

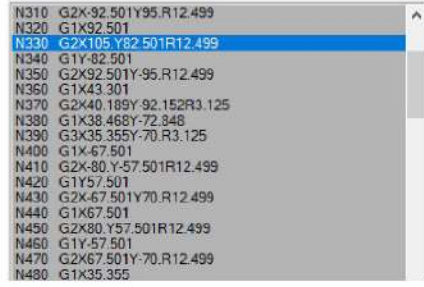
Belirtilen üç çalışma modunda en yoğun veri akışı olan çalışma modu AUTO'dur ve operatör panel arayüzünden Şekil 4.35'te gösterildiği gibi seçilmektedir. G-kod dosyasına göre operatör panel yazılımında işlenen veriler yine Şekil 4.35'te yer alan 'Cycle Start' butonu ile gerçek zamanlı olarak çalıştırılmaya başlanır.



Şekil 4.35. Operatör panel arayüzünde otomatik mod seçimi

Otomatik modda binlerce satırlık G-kod dosyası kullanılarak dakikalarca veya saatlerce bir tezgâhın çalışmasıyla karşılaşılabilir. Bu şekilde bir ürün işleminde ise milyonlarca eksen verisinin motorlara gönderilmesi söz konusudur. Milyonlarca eksen verisinin tek seferde operatör panel yazılımından PLC yazılımına aktarılması hem veri boyutundan hem de veri gönderim süresinden dolayı mümkün değildir. Bu nedenle pozisyon, hız ve ivme vektörlerini her G-kod satırı için motor

sürücülerine ayrı ayrı gönderilmektedir. Vektör uzunlukları o anda yapılacak tezgâh hareketinin boyuna bağlı değişiklik göstermektedir. Buffer mekanizmasında toplanan bu verilerin hiç veri kaybı olmadan ve 1ms aralıklarla eksen motorlarına gönderilmesi gerekir. Veri kaybını engellemek için operatör panel yazılımı ile PLC yazılımı arasında ADS üzerinden kontrol veri alışverişi yapılmaktadır. Bu veri alışverişi sürecinde PLC yazılımı bir Client görevini üstlenmekte ve Master olan operatör panel yazılımından, buffer verileri boşaldıkça veri talep etmektedir. Master tarafından önceden hazır bulundurulmuş veriler PLC yazılımından gelen talep doğrultusunda gönderilmektedir. Gönderilen bilgilerin Buffer'a aktarılmasından sonra gönderilen veri boyutu ile alınan veri boyutu arasında doğrulanma işlemi yapılmaktadır. Doğrulama işlemi başarılı ise Master tarafına veri alındı bilgisi gönderilmekte aksi takdirde ise veri yeniden talep edilmektedir. Ayrıca operatör panel arayüzünde G-kodlarının gösterildiği bölümde tezgâh tarafından işlenen komut satırının gerçek zamanlı takip edilmesi gerektiği için, tezgâh üzerinde o an işlenen komut satır numarası da Master-Client arasında sürekli paylaşılmaktadır. Gerçek zamanlı işlenen komut satırı, operatör panel arayüzünde Şekil 4.36'da yer aldığı gibi görülmektedir. Komut satırı verisi Master tarafından gönderilecek vektörlerin önceden hazırlanmasında da kullanıldığı için, bu alandaki veri takibi kritik öneme sahiptir.

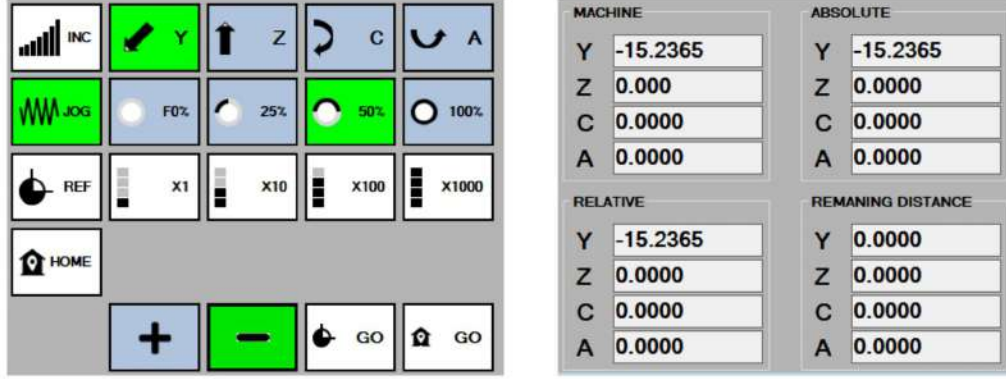


N310	G2X-92.501Y95.R12.499
N320	G1X92.501
N330	G2X105.Y82.501R12.499
N340	G1Y-82.501
N350	G2X92.501Y-95.R12.499
N360	G1X43.301
N370	G2X40.189Y 92.152R3.125
N380	G1X38.468Y-72.848
N390	G3X35.355Y-70.R3.125
N400	G1X-67.501
N410	G2X-80.Y-57.501R12.499
N420	G1Y57.501
N430	G2X-67.501Y70.R12.499
N440	G1X67.501
N450	G2X80.Y57.501R12.499
N460	G1Y-57.501
N470	G2X67.501Y-70.R12.499
N480	G1X35.355

Şekil 4.36. İşlenen komut satırının gerçek zamanlı operatör panel arayüzünde takibi

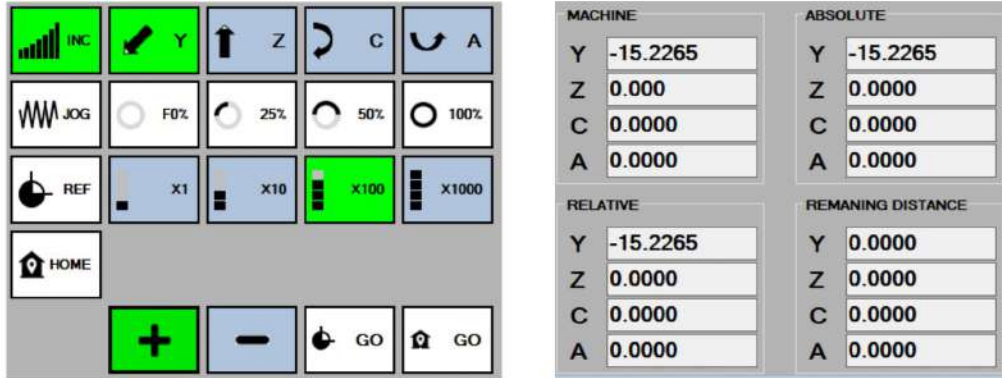
Çok sık kullanılan bir diğer önemli çalışma modu olan JOG, tezgâh eksenlerinin operatör tarafından manuel kontrol edilmesi gerektiği yerlerde kullanılmaktadır. Genellikle parça sıfırlama, eksenleri güvenli bölgeye alma veya manuel talaş kaldırma amaçları ile kullanılmaktadır. 4 eksen (Y-Z-C-A) bir tezgâh için, operatör panel arayüzünden JOG modunda manuel tezgâh kontrolünün nasıl yapıldığı Şekil 4.37-a'da gösterilmiştir. JOG butonuna basılmasıyla, operatörün işini kolaylaştırmak amacıyla

JOG moduyla ilişkili butonlar mavi renkte görünmektedir. Kontrol edilmek istenen eksen ve o ekseninin hız kademesi (F%0, F%25, F%50, F%100) seçildikten sonra hareket yönü butonu (+, -) ile tezgâh hareketi sağlanmaktadır. Aynı zamanda eksenlerin anlık konumları da yine operatör panel arayüzünden Şekil 4.37-b'de görüldüğü gibi takip edilebilmektedir.



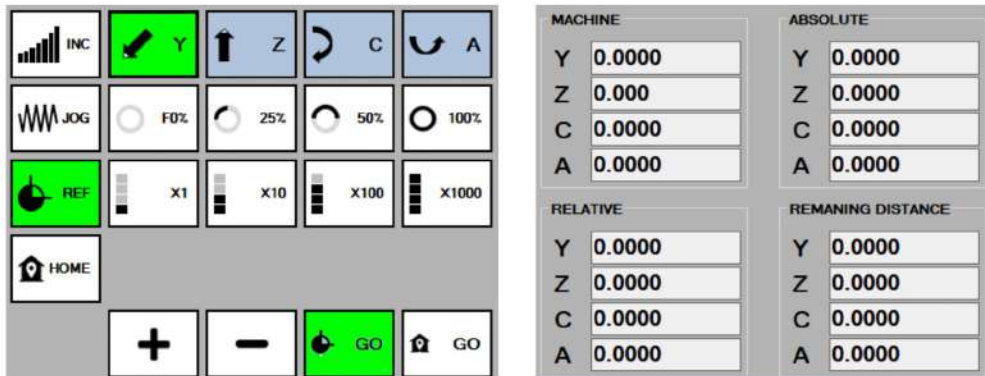
Şekil 4.37. (a) JOG modunda manuel eksen kontrolü (b) eksen konumlarının gerçek zamanlı takibi

JOG modunda hedeflenen kontrol işlemlerinin yapılabilmesi için, operatör panel yazılımı ADS protokolü üzerinden PLC yazılımına veriler göndermektedir. Bu veriler, çalışma modunun JOG olduğu, kontrol edilmek istenen eksen bilgisi, hız değeri ve hareket yönüdür. PLC yazılımı alınan bu veriler doğrultusunda Şekil 4.29'da yer alan kapalı çevrim hız kontrol yapısında ilgili dizin numaralarından verileri motor sürücüsüne göndermektedir. JOG modunda varsayılan hız değeri doğrusal eksenler için 50 mm/s, döner eksenler için de 20 °/s'dir. PLC yazılımına tanımlanmış bu parametreler operatör panel yazılımından gelen kademe bilgisine göre düzenlenerek eksen motorlarına gönderilmektedir. INC modu ise genellikle JOG modu çalışmasından sonra devreye alınmaktadır. Operatör JOG modunda sezgisel konum kontrolü yaptığı için net bir konuma veya parça sıfırına yüksek hassasiyetle gelememektedir. Hedef noktaya JOG modunda yaklaşıldıktan sonra INC modunda hassas ayarlama yapılmaktadır. Operatör panel arayüzünde INC butonuna basılmasıyla birlikte aktif olan (mavi) butonlar Şekil 4.38-a'da gösterilmiştir. Kontrol edilmek istenen eksen seçildikten sonra, X1 (0.0001 mm), X10 (0.001 mm), X100 (0.01 mm) ve X1000 (0.1 mm) butonlarından birisi ile hareket miktarı seçilmektedir. Hareket yönü butonları ile de pozitif/negatif hareket tanımlanmaktadır.



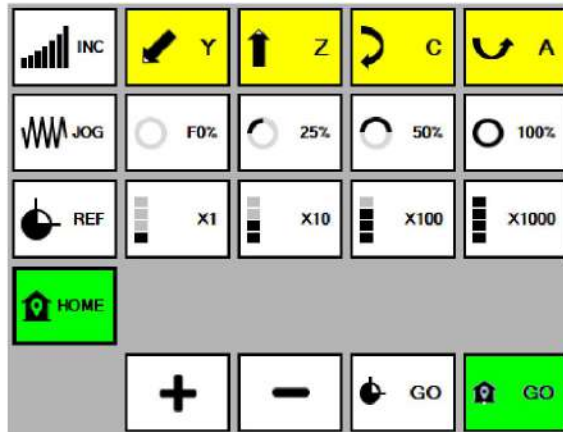
Şekil 4.38. (a) INC modunda hassas eksen kontrolü (b) eksen konumlarının gerçek zamanlı takibi

Şekil 4.38-a'daki işlemin bir kere çalıştırılması sonrası Şekil 4.37-b'de görülen konum, Şekil 4.38-b'de görüldüğü gibi değişiklik göstermektedir. JOG modunda olduğu gibi operatör panel arayüzünde INC modu seçilmesiyle birlikte PLC yazılımına anlık veriler gönderilmektedir. ADS üzerinden gelen bu veriler çalışma modunun INC olduğu, kontrol edilmek istenen eksen bilgisi, hareket (hassasiyet) miktarı ve hareket yönüdür. PLC yazılımı alınan bu veriler doğrultusunda, Şekil 4.28'de yer alan kapalı çevrim pozisyon kontrol yapısında ilgili dizin numaralarından verileri motor sürücüsüne göndermektedir. Tezgâh eksenlerinin bulunduğu konumdan makine sıfır referanslarına gönderilmesi gerekirse operatör panel arayüzünden REF modu seçilmektedir. REF modu seçilmesiyle birlikte kontrol edilebilir butonlar Şekil 4.39-a'da görüldüğü gibi aktif olmaktadır. Referans noktasına gönderilecek eksen seçimi yapılarak 'GO' butonuna basılmaktadır. Şekil 4.38-b konumunda bulunan tezgâhın, Y eksen referans noktasına gönderilmesi sonunda Şekil 4.39-b'de görülen konuma gelmektedir.



Şekil 4.39. (a) Eksenlerin referans noktalarına gönderilmesi işlemi (b) eksen konumlarının gerçek zamanlı takibi

Seçili eksenin referans noktasına gönderilmesi için operatör panel yazılımında sabit jerkli doğrusal hareket yörüngesi oluşturulmaktadır. Bu yörüngeye ait pozisyon, hız ve ivme vektörleri ADS üzerinden PLC yazılımına gönderilmektedir. AUTO modunda olduğu gibi ADS-EtherCat haberleşme hızı farklılığından dolayı ikili buffer sistemi burada da kullanılmaktadır. PLC yazılımı gelen verileri Şekil 4.28’de yer alan kapalı çevrim pozisyon kontrol yapısında ilgili dizin numaralarından motor sürücüsüne göndermektedir. Tezgâhın bulunduğu konumdan eksen referans noktalarına değil de doğrudan makine sıfırına gönderilmesi durumunda da HOME modu kullanılmaktadır. Operatör panel arayüzünde HOME butonuna basılmasıyla tüm eksen butonları Şekil 4.40’ta görüldüğü gibi aktif (sarı) olmaktadır. ‘GO’ butonuna basılmasıyla birlikte operatör panel yazılımında makine sıfır rutini oluşturulmaktadır. Tüm eksenlerin aynı anda makine sıfırına gitmesi tezgâh üzerinde bağlı olan ürüne çarpılması riskinden dolayı tehlikelidir. Bu nedenle makine sıfır rutininde önce Z eksen referansa gönderilmekte sonra tezgâh eksen konfigürasyonuna göre diğer eksenler sırayla referans noktasına gönderilerek makine sıfırına ulaşılmaktadır. REF modunda olduğu gibi HOME modu için de tüm eksenler için sabit jerkli doğrusal hareket planlaması yapılmaktadır. Planlanan yörüngelere ait pozisyon, hız ve ivme vektörleri ikili buffer mekanizmasıyla PLC yazılımına aktarılmaktadır. Gelen veriler de EtherCat protokolü üzerinden 1ms aralıklarla eksen motorlarına gönderilmektedir.



Şekil 4.40. Tezgâhın makine sıfırına gönderilmesi işlemi

Operatör denetiminde olan bir diğer çalışma türü ise HND modudur. HND modunda Şekil 4.41’de bir modeli görülen el kumandası kullanılmaktadır. El kumandası doğrudan IO terminaline bağlanmaktadır. Enkoder sinyalleri IO terminalindeki

enkoder modülünden, diğer kontrol tuşları (eksen seçimi, hız kademe ayarlaması, hareket yönü, vb.) ise dijital giriş modülünden okunmaktadır. IO terminali üzerinden PLC yazılımına aktarılan veriler doğrultusunda eksen motorları hız modunda çalıştırılmaktadır. Konum hassasiyeti JOG modunda olduğu gibi yine operatör tarafından sağlanmaktadır. Çalışma modları dışında bir diğer önemli kontrol birimi ise IO terminaline bağlı donanımların kontrolüdür. Bu donanımların başında da spindle motoru, soğutma sıvısı, sınır anahtarları, röleler ve takım değiştirme magazini gelmektedir. Operatör tarafından manuel kontrol edilmesi gereken en önemlileri ise spindle motoru ve soğutma sıvısıdır. Tezgâh üzerindeki spindle motorunun asenkron motor olması durumunda sürücü (inverter) kontrolü analog sinyalle sağlanmaktadır. Bu durumda IO terminalinin analog çıkış modülünden, spindle sürücüsünün devir ayarının yapılması için 0-10V arası analog bilgi gönderilmektedir. Spindle yön ayarı, sürücü röleleri gibi diğer parametreler için ise dijital çıkış modülü kullanılmaktadır. Operatör panel arayüzünden manuel spindle kontrol işlemleri Şekil 4.42’de görülen butonlarla yapılmaktadır. Spindle yönü seçildikten sonra alt tarafta görülen hız ayar bölümünden manuel devir ayarı yapılmaktadır. Maksimum devir değeri, spindle motorunun bir parametresi olarak operatör panel yazılımına tanımlanmaktadır. Spindle yön ve devir bilgisi ADS üzerinden PLC yazılımına gönderilmekte ve PLC yazılımı da IO terminali üzerinden spindle sürücüsüne göndermektedir.



Şekil 4.41. CNC kontrol ünitesi el kumandası

Spindle motorunun endüstriyel bir haberleşme protokolü destekli olması durumunda ise kontrol sinyalleri analog sinyal yerine protokol üzerinden gönderilmektedir. Sürücü haberleşme protokolünün EtherCat olması durumunda eksen motorlarında

olduğu gibi spindle motoru da Slave cihaz olarak görülmekte ve ilgili dizin numaraları ile kontrol sinyalleri gönderilmektedir.



Spindle sürücüsünün EtherCat dışında farklı bir endüstriyel protokol desteği olması durumunda ise IO terminaline, ilgili protokol arayüz modülü eklenerek sürücü ile haberleşme sağlanmaktadır. Belirtilen farklı opsiyonlar operatör panel yazılımında bir değişiklik gereksinimi ortaya çıkarmamaktadır. Sadece spindle motor sürücüsünün yapısına uygun işlemler PLC yazılımında gerçekleştirilerek, ADS üzerinden tüm opsiyonlar için aynı bilgiler gönderilmektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, geliştirilen CNC kontrol ünitesinin gerçek zamanlı uygulamalarına yer verilmiştir. CNC kontrol ünitesi ile doğrudan endüstriyel bir CNC-Freze tezgâhı üzerinde deneysel çalışmalara başlanması güvenlik amacıyla riskli olduğu için kademeli bir deneysel çalışma yöntemi tercih edilmiştir. Öncelikle EtherCat protokolü üzerinden endüstriyel AC servo motorun kontrol performanslarını analiz etmek için tek motorlu bir motor test düzeneği tasarımı yapılmış ve kontrol uygulamaları yapılmıştır. Sonrasında yine EtherCat protokolünün çoklu eksen senkronizasyon testlerinin yapılması için tek motorlu test düzeneği üç motorlu test düzeneğine dönüştürülerek yörünge takibi ve senkronizasyon testleri yapılmıştır. Bu uygulamalarda hem EtherCat protokolü hem de CNC kontrol ünitesi yazılımı doğrulanmış ve sonrasında endüstriyel CNC-Freze tezgâhı üzerinde çalışma adımına geçilmiştir. Endüstriyel CNC-Freze tezgâhı kontrol uygulamaları ise 3-Eksen ve 4-Eksen olmak üzere iki farklı tezgâhta yapılarak çalışmanın kapsamlı performans analizi yapılmıştır.

5.1. AC Servo Motor Yörünge Takibi ve Senkronizasyon Testleri

EtherCat protokolü üzerinden yapılan motor kontrol işleminin performans analizi için tasarlanan test düzeneği sistemi Şekil 5.1’de yer almaktadır.



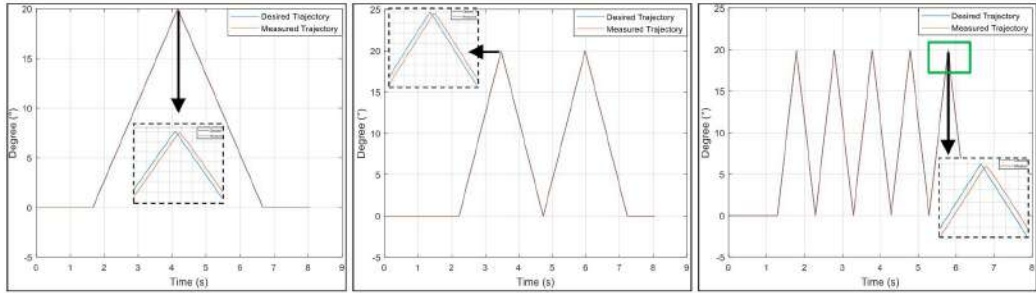
Şekil 5.1. Endüstriyel AC servo motorlu test düzeneği

Şekildeki sistemde, Omron R88M-K1K520F model 1.5 kW güç değerine sahip AC servo motor, Omron R88DKN15F-ECT model EtherCat slave özellikli servo sürücü, güç kaynağı, aşırı akım röleleri ve acil stop butonu bulunmaktadır. Servo sürücü ile CNC kontrol ünitesi bilgisayarı arasında Cat5 kablosu bağlantısı yapılarak Ethercat haberleşme sistemi Şekil 5.2’de görüldüğü gibi kurulmuştur.



Şekil 5.2. Fiziksel bağlantıların yapılması

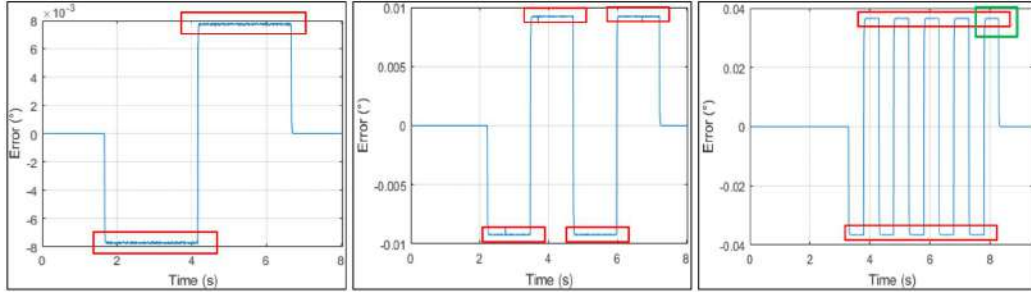
Fiziksel bağlantının kurulması sonrasında CNC kontrol ünitesi yazılımından farklı özelliklerde yörüngeler oluşturularak AC servo motorun yörünge takibi uygulamaları yapılmıştır. Yörünge takibi kontrol işlemine Şekil 5.3’te görüldüğü gibi üçgenel yörüngelerle başlanmıştır. Üçgenel yörüngelerin uç kısımlarında anlık değişimlerin olması ve bu değişimlerdeki kontrol performansının analiz edilmesi için üçgenel yörüngeler tercih edilmiştir.



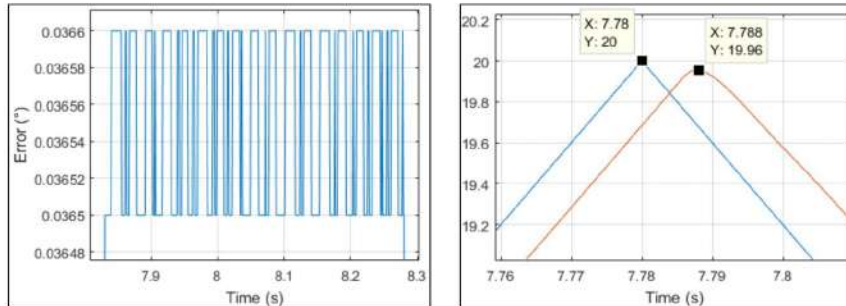
Şekil 5.3. Üçgenel yörünge takibi sonuçları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz

0.2Hz, 0.4Hz ve 1 Hz frekanslarla yapılan üç farklı üçgenel yörünge takibi sonuçları Şekil 5.3-a, 5.3-b ve 5.3-c’de ayrı ayrı verilmiştir. Şekildeki grafiklerde mavi yörüngeler hedef yörüngeleri, kırmızı yörüngeler ise 20 bitlik artımsal (incremental) motor enkoderinden EtherCat protokolü üzerinden alınan gerçek yörüngeleri göstermektedir. Bu uygulamalara ilişkin yörünge takibi hataları Şekil 5.4’te

verilmiştir. Hata değerlerinin artan yörünge frekansı ile doğru orantılı arttığı grafiklerde görülmektedir. Fakat tüm hata grafiklerinde hataların hareket yönüne bağlı olarak, kırmızı kutular içinde görüldüğü gibi pozitif ya da negatif yönde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Hataların sabit kalması hedef ve gerçek yörünge arasındaki hatanın faz kaymasından kaynaklandığını göstermektedir. Bu faz kaymaları Şekil 5.3'teki grafiklerde yakınlştırılmış yörüngelerde de görülmektedir. Faz kaymasından kaynaklı hatalar, hedef yörüngeye doğru ama sadece gecikme ile gidildiğini göstermektedir. Gerçek konum hatalarını görmek için Şekil 5.4-c'deki hata grafiğinde yeşil alan içerisinde kalan bölüm Şekil 5.5'te yakınlştırılarak verilmiştir. Şekil 5.5'teki salınım miktarları gerçek konum hatasını vermektedir. Dolayısıyla faz kayması haricinde meydana gelen ortalama konum hatasının yaklaşık 0.0001° (0.0366° - 0.0365°) olduğu görülmüştür. Ayrıca üçgensel yörünge takibinde, maksimum hata değerleri üçgen dilimlerinin uç kısımlarında meydana geldiği için, Şekil 5.3-c'de yeşil alan içerisinde kalan bölüm Şekil 5.5-b'de yakından incelenmiştir. Bu bölümde ortaya çıkan maksimum hata değeri de 0.04° (20° - 19.96°) olarak bulunmuştur.

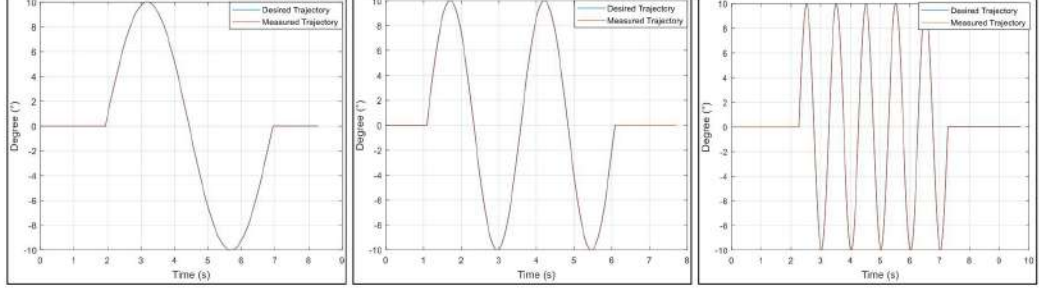


Şekil 5.4. Üçgensel yörünge takibi hataları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz



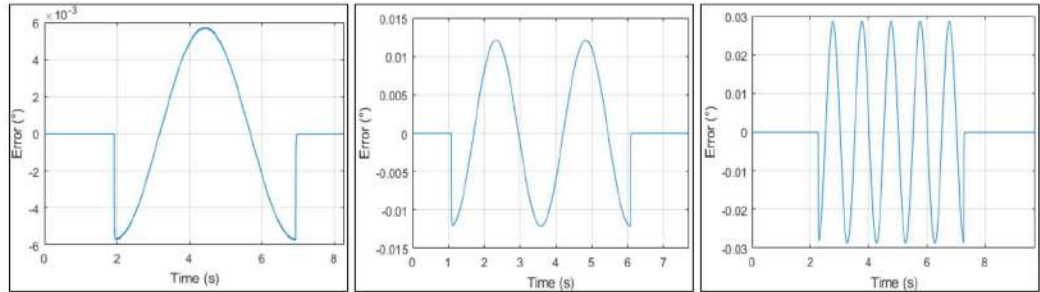
Şekil 5.5. Üçgensel yörünge takibi için (a) ortalama konum hata değerinin tespiti (b) maksimum konum hata değerinin tespiti

Üçgensel yörünge takibinden sonra ise farklı genlik ve frekanslarda sinüzoidal yörünge takibi uygulamaları yapılmıştır.

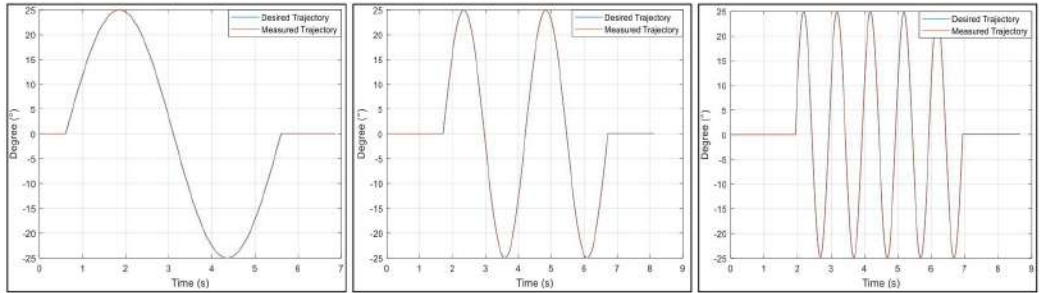


Şekil 5.6. 10° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi sonuçları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz

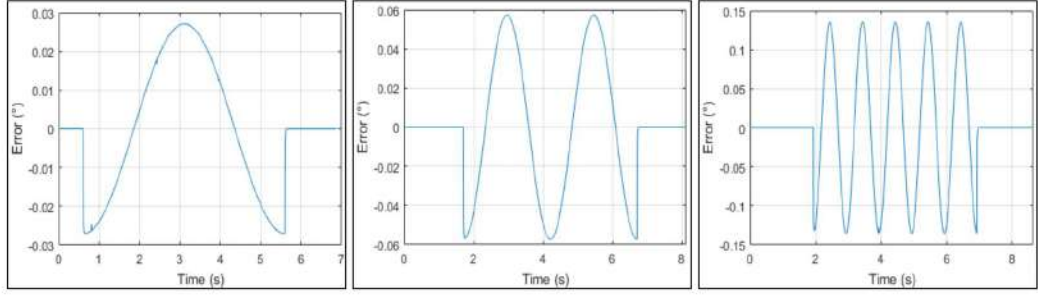
10° genlik değerine sahip 0.2Hz, 0.4Hz ve 1Hz sinüzoidal yörünge takibi sonuçları Şekil 5.6-a, 5.6-b ve 5.6-c'de ayrı ayrı verilmiştir. Bu uygulamalara ilişkin yörünge takibi hataları ise Şekil 5.7'de verilmiştir. Farklı genliklerde de kontrol sonuçlarını görmek için Şekil 5.8 ve 5.10'da görüldüğü gibi 25° ve 50° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi uygulamaları yapılmıştır. Bu uygulamalara ait yörünge takibi hataları da Şekil 5.9 ve 5.11'de ayrı ayrı verilmiştir.



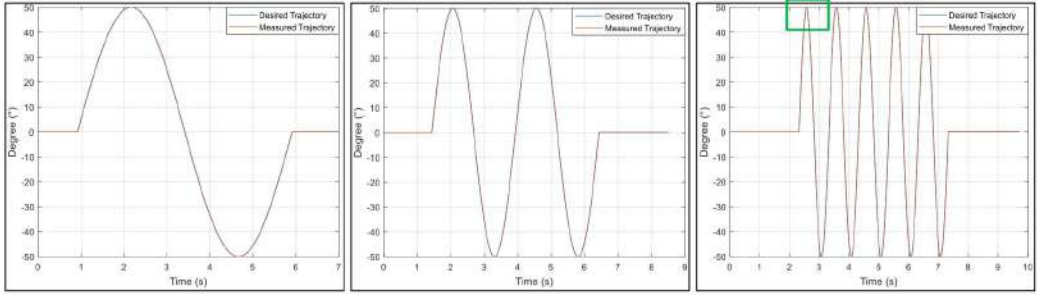
Şekil 5.7. 10° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi hataları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz



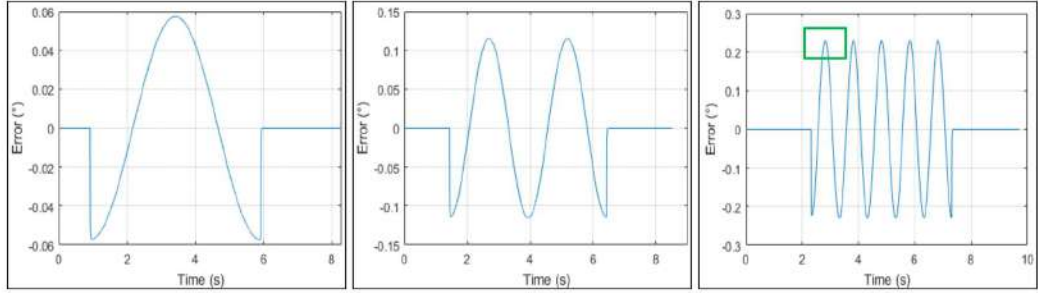
Şekil 5.8. 25° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi sonuçları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz



Şekil 5.9. 25° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi hataları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz



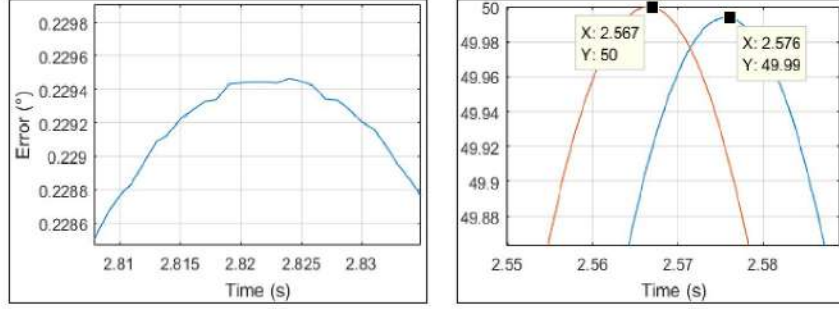
Şekil 5.10. 50° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi sonuçları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz



Şekil 5.11. 50° genlik değerine sahip sinüzoidal yörünge takibi hataları (a) 0.2 Hz (b) 0.4 Hz (c) 1 Hz

Tüm sinüzoidal yörünge takibi uygulamalarında yörünge hatalarının büyük bölümünü yine faz kaymasından kaynaklı meydana geldiği Şekil 5.7, 5.9 ve 5.11'deki hata grafiklerinde görülmektedir. Hata grafikleri, dikkat edileceği üzere faz kaymalı bir sinüs sinyal formundadır ve tüm uygulamalarda ana formun hiç bozulmadığı gözlemlenmiştir. Yine konum hatalarının görülebilmesi için Şekil 5.11-c'de yeşil alanda kalan bölüm yakınlaştırılarak Şekil 5.12-a'da verilmiştir. Yakınlaştırılmış hata grafiğinde görüldüğü üzere, ortalama 0.0002° kadar konumda kaymalar olduğu için sinüs formunda bozulmalar meydana gelmiştir. Üçgensel yörüngede olduğu gibi sinüzoidal yörüngede ortaya çıkabilecek maksimum hata değeri yörünge yön

değişimlerinde olmaktadır. Bu nedenle Şekil 5.10-c'deki yeşil alan içerisinde kalan bölüm Şekil 5.12-b'de yakından incelenmiştir. Bu bölümde ortaya çıkan maksimum hata değeri de 0.0065° ($50^\circ-49.9935^\circ$) olarak bulunmuştur.



Şekil 5.12. Sinüzoidal yörünge takibi için (a) ortalama konum hata değerinin tespiti (b) maksimum konum hata değerinin tespiti

Ayrıca yörünge takip sonuçlarının sayısal değerler üzerinden analiz edilebilmesi için, Denklem (5.1)'de yer alan ortalama karesel hata (MSE) ve ortalama karekök hata (RMSE) ölçütleri kullanılarak Tablo 5.1'deki hata miktarları hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_t)^2}, \quad MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_t)^2 \quad (5.1)$$

Tablo 5.1. Yörünge takibi hata değerleri

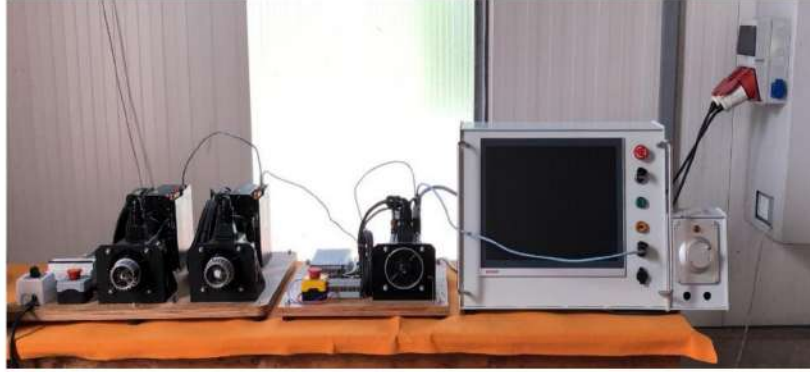
	RMSE	MSE
Şekil 5.4-a	0.0061	0.0048
Şekil 5.4-b	0.0109	0.0086
Şekil 5.4-c	0.0263	0.0191
Şekil 5.7-a	0.0063	0.0044
Şekil 5.7-b	0.0112	0.0066
Şekil 5.7-c	0.0290	0.0188
Şekil 5.9-a	0.0287	0.0194
Şekil 5.9-b	0.0636	0.0450
Şekil 5.9-c	0.1456	0.0998
Şekil 5.11-a	0.0595	0.0394
Şekil 5.11-b	0.0982	0.0538
Şekil 5.11-c	0.2908	0.1881

Tüm uygulamalar için referans yörünge ile gerçek yörünge arasındaki hataların çok küçük değerlerde olduğu Tablo 5.1'de görülmektedir.

Tek motor üzerinde yapılan yörünge takibi işlemlerinden sonra eksen motorları arasındaki senkronizasyonların test edilmesi için test düzeneğine Şekil 5.13'te yer alan iki motor daha eklenmiştir. Şekil 5.13'teki sistemde, iki adet Omron R88D-1SN15F-ECT model EtherCat slave özellikli sürücü, iki adet Omron R88M-1M1K520C-S2 model 1.5 kW güç değerine sahip AC servo motor, güç kaynağı, aşırı akım röleleri ve acil stop butonu bulunmaktadır. Yeni eklenen sistemle birlikte senkronizasyon uygulamaları için toplamda üç motorlu bir test düzeneği elde edilmiştir. EtherNet kabloları ile fiziksel haberleşme ağı Şekil 5.14'te görüldüğü gibi kurulmuştur.



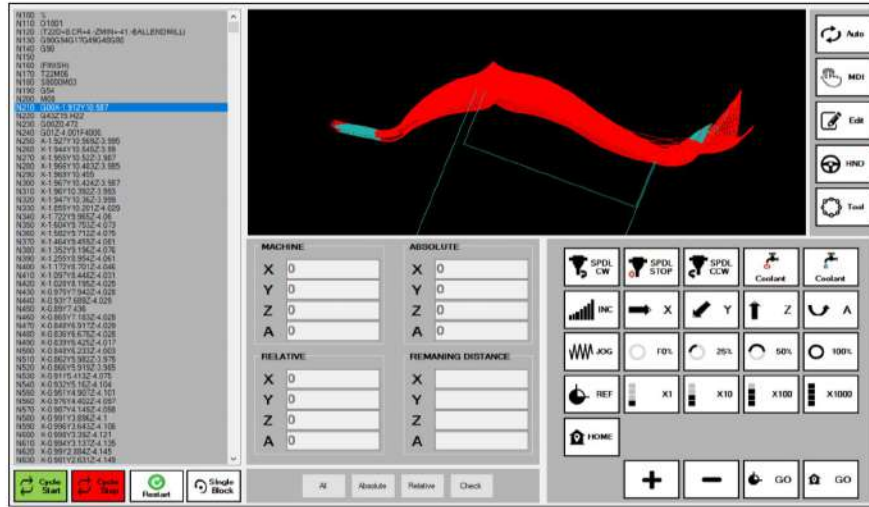
Şekil 5.13. İki motorlu test düzeneği sistemi



Şekil 5.14. Üç motorlu sistemde fiziksel bağlantıların yapılması

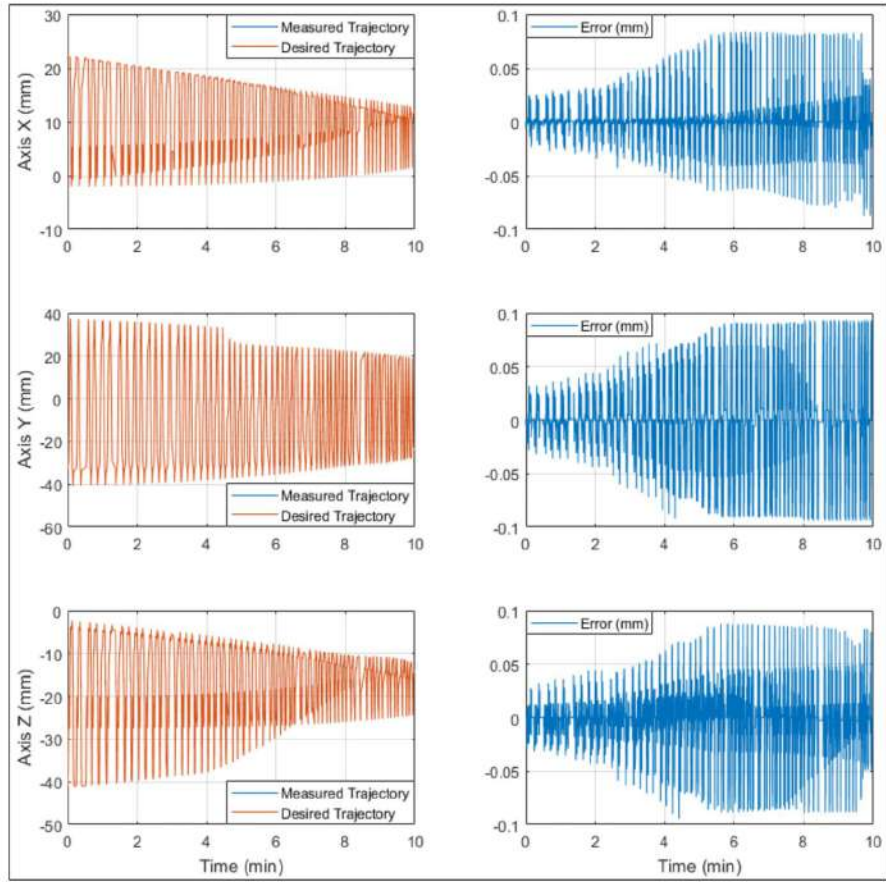
Bu test sisteminde yapılan uygulamalarda, üçgensel veya sinüzoidal gibi belirli fonksiyon yörüngeleri ile çalışmak yerine doğrudan endüstriyel NC dosyaları kullanılmıştır. Bu sayede hem eksenler arası senkronizasyon analiz işlemleri yapılmış hem de CNC kontrol ünitesinin binlerce satırlı NC dosyalarındaki çalışma performansı incelenmiştir. CNC tezgâhları endüstriyel üretimin bir parçası olduğu için üretim işlemi sıfır hatayla yapılması gereklidir. NC dosyasının bir satırının eksik veya yanlış

işlenmesi tüm üretimi olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle bu bölümde yapılan uygulamalar CNC kontrol ünitesinin sıfır hata prensibine uygun çalıştığının da göstergesi olmuştur. Uygulamaya 42,832 satırlı bir NC dosyası kullanılarak başlanmıştır. NC dosyasının program çıktısı Şekil 5.15'te operatör panel arayüzünde görülmektedir. Operatör panelindeki ekranda turkuaz renkler doğrusal hareketleri, yeşil renkler dairesel/helisel hareketleri, kırmızı renkler ise NURBS eğrilerine dönüştürülen yörüngeleri temsil etmektedir.

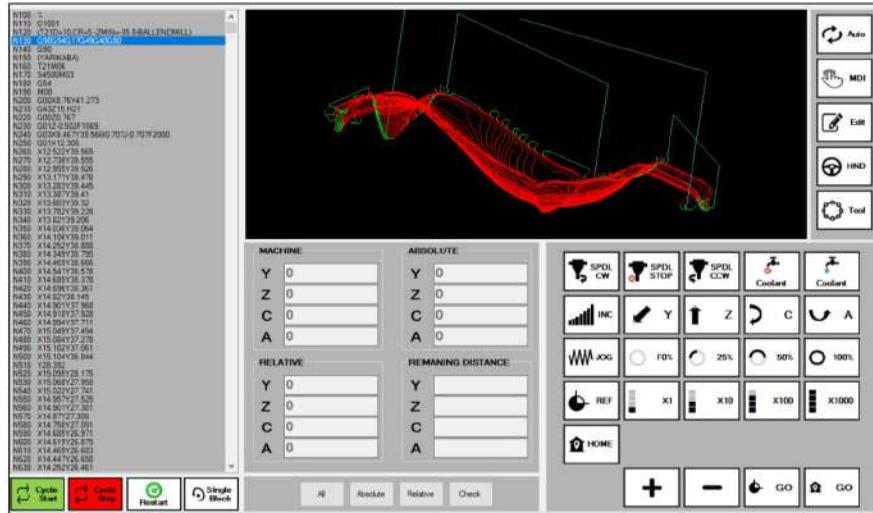


Şekil 5.15. 42,832 satırlı NC dosyasının program çıktısı (uygulama 1)

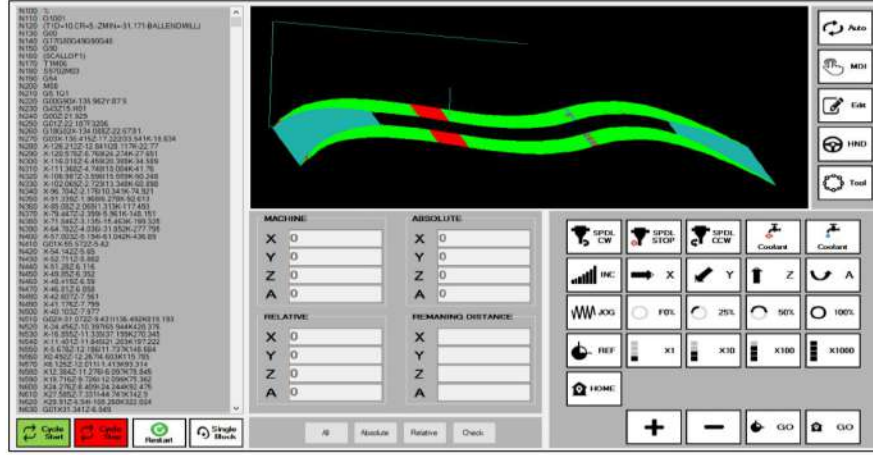
Şekil 5.15'te görülen program çıktısı kartezyen uzaydaki kesici takım yörüngesini göstermektedir. Bu nedenle motorlara eksen yörüngeleri (X-Y-Z) gönderilmeden önce motor sürücülerine 1/12 vidalı mil dişli oranı girilerek, motorlar 3 eksen (X-Y-Z) bir CNC tezgâhının motorları gibi varsayılmıştır. Kullanılan NC dosyası için oluşan eksen yörüngeleri ve bu yörüngelerin gerçek zamanlı takip sonuçları Şekil 5.16'da verilmiştir. Tüm uygulamalarda yörünge takip sonuçları verilerin daha rahat analiz edilebilmesi için 10 dakikalık verilerle sınırlandırılmıştır. 1 ms veri yenileme hızı ile çalışıldığı için Şekil 5.16'daki grafikler her bir eksen için 600,000 veriyle elde edilmiştir. Bu uygulamaya ilişkin hata grafikleri de yine Şekil 5.16'da görülmektedir. Ayrıca 42,832 satırlık NC dosyasının çalışması 15 dakika kadar sürmüştür. Her eksen için ayrı ayrı oluşan yaklaşık 900,000 veri, operatör panel yazılımı ve TwinCat yazılımı arasındaki ikili ping-pong buffer mekanizması ile hiç veri kaybı olmadan motorlara iletilmiştir.



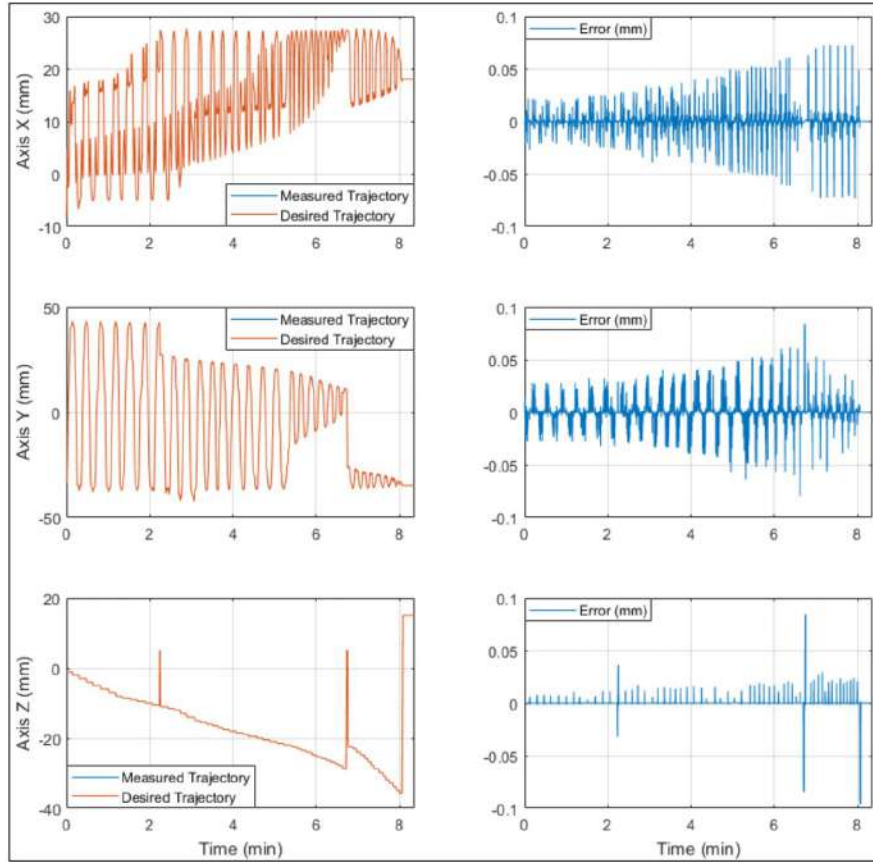
Şekil 5.16. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata grafikleri (uygulama 1)



Şekil 5.17. 17,847 satırlı NC dosyasının program çıktısı (uygulama 2)



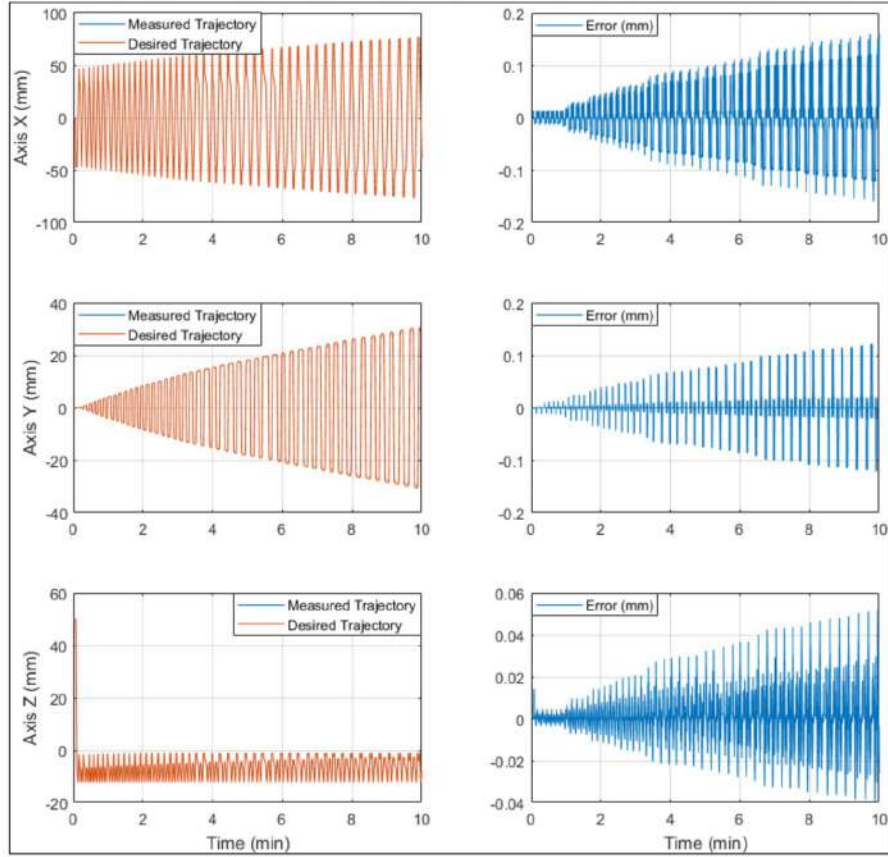
Şekil 5.18. 27,060 satırlı NC dosyasının program çıktısı (uygulama 3)



Şekil 5.19. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata grafikleri (uygulama 2)

Bu uygulamaya ek olarak iki farklı NC dosyası daha kullanılarak performans analizleri genişletilmiştir. 17,847 satırlık NC dosyasına ait program çıktısı Şekil 5.17’de, 27,060 satırlık NC dosyasına ilişkin program çıktısı ise Şekil 5.18’de görülmektedir. Bu

uygulamalarda da 1ms veri yenileme hızı ile çalışılmıştır. Şekil 5.17'deki program çıktısına ilişkin gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları hata grafikleri ile birlikte Şekil 5.19'da verilmiştir. Son olarak Şekil 5.18'de yer alan program çıktısına ilişkin gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ise Şekil 5.20'de verilmiştir. Yaklaşık 13 dakika çalışan bu uygulamada her eksen için 780.000 veri hiç kayıp olmadan eksen motorlarına gönderilmiştir. Tek motorlu test sisteminde elde edilen yörünge takibi sonuçlarında olduğu gibi üç AC servo motor üzerinde yapılan eksenel yörünge takibi hata değerleri de mikron seviyelerde oluşmuştur. Bu sonuçlar, her bir eksene gönderilen verilerin eksen motorları tarafından senkronize olarak işlendiğini göstermektedir.



Şekil 5.20. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata grafikleri (uygulama 3)

5.2. Endüstriyel 3-Eksen CNC-Freze Tezgâhı Kontrolü

Bu bölümde endüstriyel 3-eksen bir CNC-Freze tezgâhında geliştirilen CNC kontrol ünitesi ile ürün işleme uygulamaları yapılmıştır. Yapılan uygulamada endüstriyel ürün

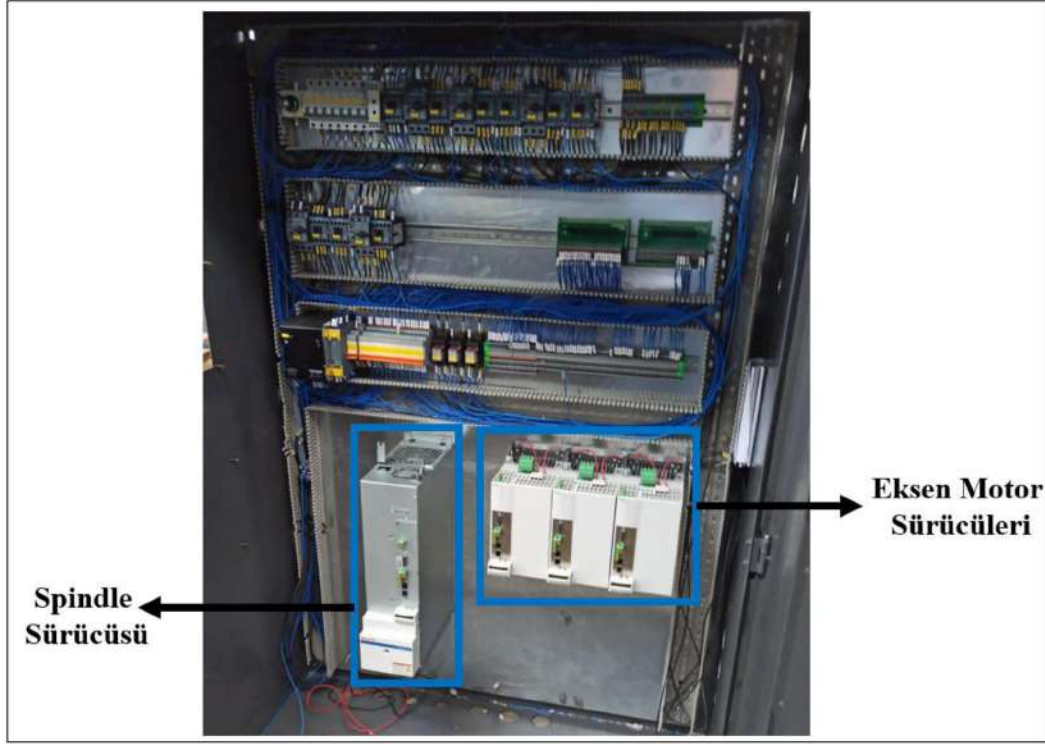
işleme süreci ele alınarak tez çalışmasının sahadaki performansının görülmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.21’de uygulamaların yapıldığı CNC-Freze tezgâhının açık hali, Şekil 5.22’de ise satışa sunulan giydirilmiş versiyonu yer almaktadır. Çalışmalarda daha esnek kullanım imkânı olması nedeniyle Şekil 5.21’de görülen açık versiyonu kullanılmıştır. CNC-Freze tezgâhına ait motor sürücülerinin, IO terminalinin, rölelerin güç kaynaklarının ve diğer donanımların yer aldığı elektrik panosu ise Şekil 5.23’te gösterilmiştir.



Şekil 5.21. 3-Eksen CNC-Freze tezgâhı açık versiyonu

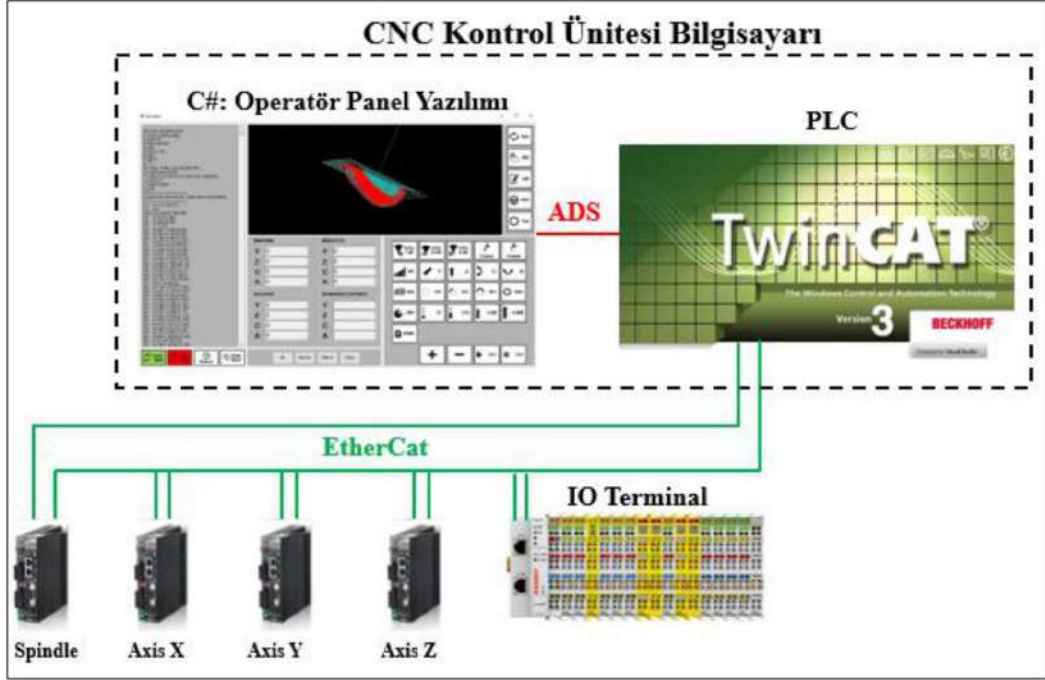


Şekil 5.22. 3-Eksen CNC-Freze tezgâhı giydirilmiş versiyonu



Şekil 5.23. CNC tezgâhı elektrik panosu

CNC tezgâhının X ve Y eksenlerinde Bosch-Rexroth MS2N07-D1BNN -BSUK0 model, 6000 RPM, 18.9 Nm nominal tork ve 3.5 kw güç değerlerine sahip frensiz AC servo motorlar bulunmaktadır. Z ekseninde ise MS2N07-D1BNN-BSUK2 model, 6000 RPM, 23.8 Nm nominal tork ve 4.5 kw güç değerlerine sahip frenli AC servo motor kullanılmıştır. Ayrıca tüm motorlarda 20 bitlik artımsal enkoderler bulunmaktadır. AC servo motor sürücülerine ise EtherCat Slave özellikli Bosch-Rexroth marka HCS01.1E-W0054 model kompakt sürücülerdir. Tezgâhta spindle motoru olarak da 10000 RPM Bosch-Rexroth MAD130B-0250 model asenkron motoru kullanılmaktadır. Spindle sürücüsü de eksen motor sürücülerinde olduğu gibi EtherCat slave özellikli Bosch-Rexroth HCS03.1E-W0070 model kompakt sürücüdür. Şekil 5.26'da tezgâh motorlarına ait tüm sürücüler görülmektedir. Her bir sürücüde önceki bölümde belirtildiği üzere giriş ve çıkış olmak üzere iki ethernet soketi bulunmaktadır. Bu giriş/çıkışlar kullanılarak CNC kontrol ünitesi bilgisayarı ile fiziksel sistem arasında Şekil 5.24'te görülen yapı kurulmuştur. Fiziksel bağlantıların kurulması ve motor sürücülerine ilişkin EtherCat-XML dosyalarının sisteme tanıtılması işlemlerinden sonra CNC-Freze tezgâhının kontrolü sağlanmış ve uygulama aşamasına geçilmiştir.



Şekil 5.24. CNC kontrol ünitesi ile fiziksel sistem arasında kurulan bağlantı yapısı

Endüstriyel ürün işleme uygulamasında Şekil 5.25-a'da görülen 200*220 mm ölçü değerlerine sahip kütük parçanın, Şekil 5.25-b'de yer alan işlenmiş ürüne dönüşüm süreci ele alınmıştır. Ürün işleme süreci endüstriyel işlem adımlarından oluştuğu için, yapılan uygulamada farklı işleme kalemleri ile sıralı çalışma yapılmıştır. Bu işlemler sırasıyla tarama başlığı ile kaba talaş kaldırmanın yapılması, matkap başlığı ile kanal (slot) deliklerinin delinmesi ve sonrasında radyuslu freze başlığı kullanılarak slotların açılması, normal freze başlığı ile merkez konik küresinin kaba işleminin yapılması, küre freze başlığı ile konik küresininin finiş işlemesi ve son olarak normal freze başlığı ile genel finiş işleme olarak altı adımda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.25. (a) İşlenecek kütük parça (b) işlenmiş parça

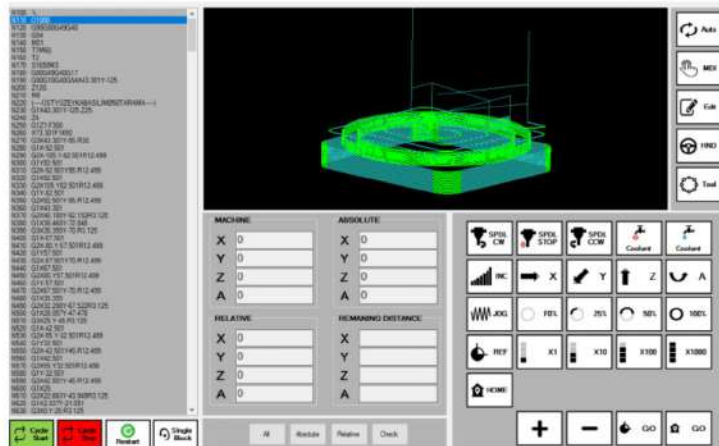
5.2.1. Kaba talaş kaldırma işlemi

CNC-Freze tezgahlarında işlenen ürünler genellikle kaba ve hassas (finitiş) işleme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kaba işlemede hedef ürün çıktısının genel formu verilirken, finitş işlemede yüzey kalitesi ve işleme hassasiyeti artırılarak hedef ürün çıktısı elde edilmektedir. Kaba ve finitş işleminin görevleri farklı olduğu için kullanılan işleme kalemleri de farklılık göstermektedir. Şekil 5.25-a'da yer alan kütük parça daha önceden hiç işlenmediği için, Şekil 5.26'da görülen 50 mm çapında tarama başlığı ile ürünün kaba işleme yapılmıştır.



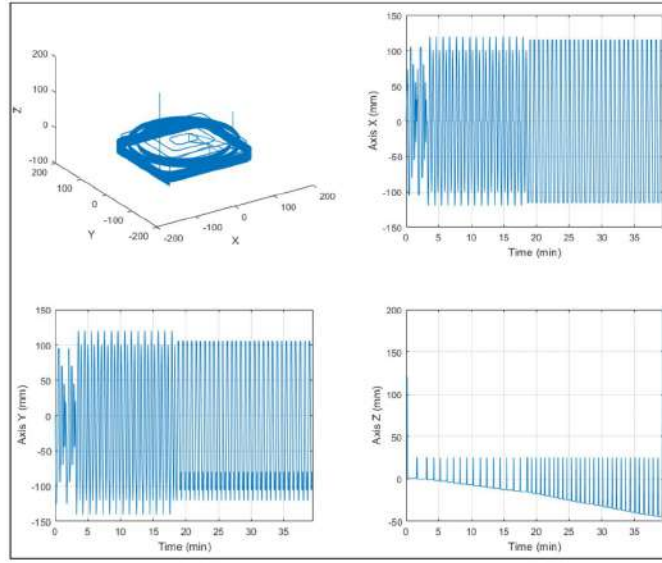
Şekil 5.26. Tarama başlığı (50 Ø)

Ürün işlemesine başlamadan önce operatör panel arayüzünden parça sıfırlama protokolü ile kütük parçanın orta merkez noktası parça sıfırı olarak kontrol ünitesine tanıtılmıştır. Kaba işleme için 745 satırlık NC dosyası kullanılmış ve program çıktısı Şekil 5.27'deki operatör panel arayüzünde verilmiştir.

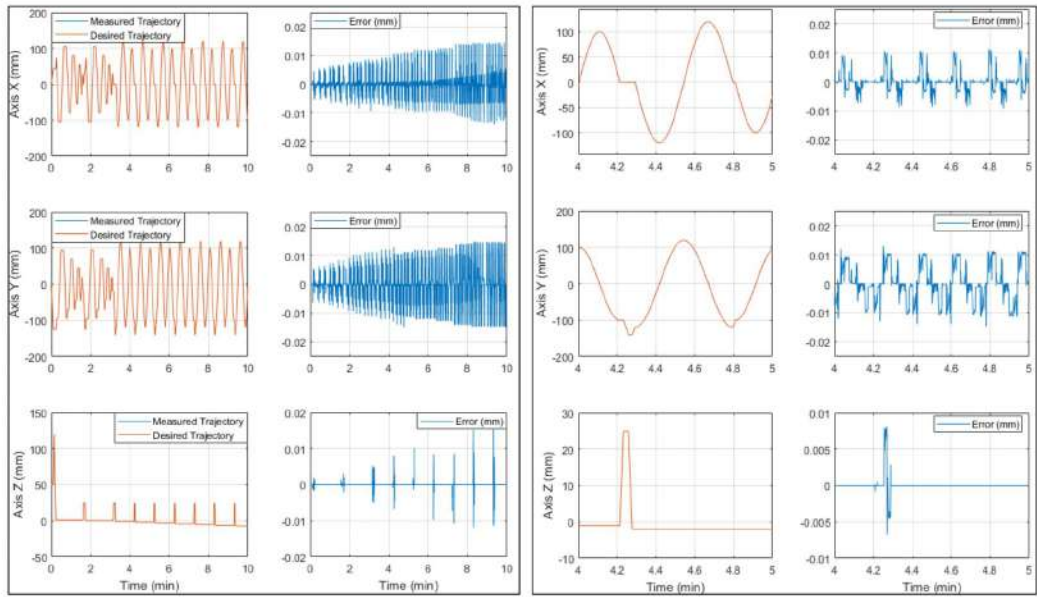


Şekil 5.27. Kaba talaş kaldırma NC dosyasının program çıktısı

Kaba talaş kaldırma işlemi, saat yönünde 1650 RPM spindle devri, 1450 mm/dk (24.16 mm/s) kesici takım ilerleme hızı, 2000 mm/s² kesici takım ilerleme ivmesi, 25.000 mm/s³ kesici takım ilerleme jerki ve 1ms eksen veri yenileme hızı temelinde gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda 2,368,726 veriyle 39.47 dk süren kesici takım yörüngesi elde edilmiştir. Kesici takımın kartezyen uzayda takip edeceği yörünge ve eksen motorlarına (X-Y-Z) gönderilecek eksen yörüngeleri Şekil 5.28’de görülmektedir.



Şekil 5.28. Kaba talaş kaldırma işlemi için oluşan kesici takım yörüngesi ve eksen yörüngeleri



Şekil 5.29. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları (kaba talaş kaldırma)

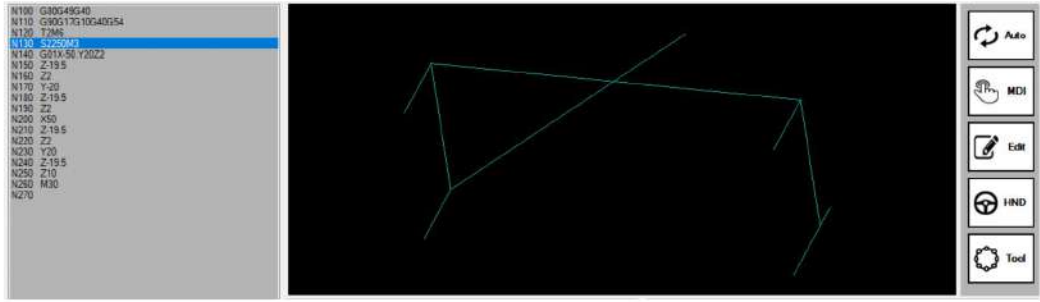
Bu uygulamaya ilişkin gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata değerleri Şekil 5.29-a'da görülmektedir. Yüksek eksen verileri üzerinden yörünge takip grafiklerinin değerlendirmesinin zor olması nedeniyle tüm uygulamaların yörünge takip sonuçları 10 dakikalık verilerle sınırlandırılmıştır. Ayrıca Şekil 5.29-a'daki yörünge takip sonuçlarını bir miktar daha yakından göstermek için 1 dakikalık bölüm (4.dk-5.dk arası) Şekil 5.29-b'de ayrıntılı verilmiştir.

5.2.2. Slot açma işlemi

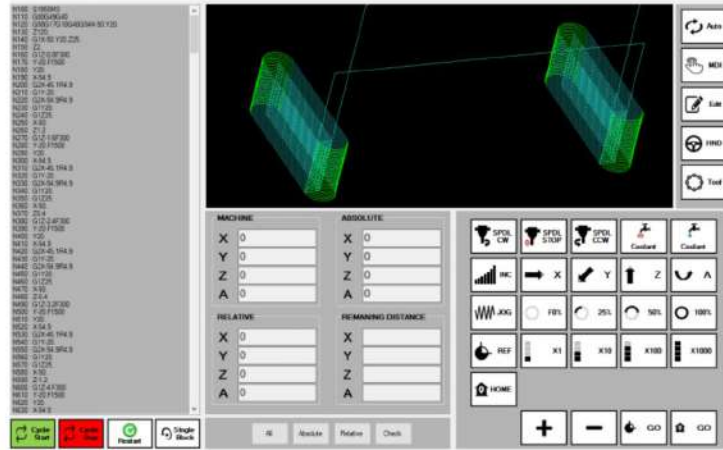
Kaba talaş kaldırma işlemi bittikten sonra iki adımlı slot açma işlemine geçilmiştir. 19.8 mm genişlik 50 mm uzunluk ve 17.8 mm derinlik ölçülerine sahip slotlar 10 mm çapında radyuslu freze başlığı ile açılmıştır. Fakat freze başlığının rahat çalışabilmesi için öncelikle 10.2 mm çapında matkap başlığı ilde slot delikleri delinmiştir. Slot deliklerinde 16 satırlık NC dosyası kullanılmış ve program çıktısı Şekil 5.30'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Program başlamadan önce matkap başlığının boyu ve çapı tarama başlığından farklı olduğu için tekrar parça sıfırlama protokolü uygulanmış ve uygulamaya başlanmıştır. Delik delme işlemi saat yönünde 2250 RPM spindle devri, 225 mm/dk (3.75 mm/s) kesici takım ilerleme hızı ile yapılmıştır.



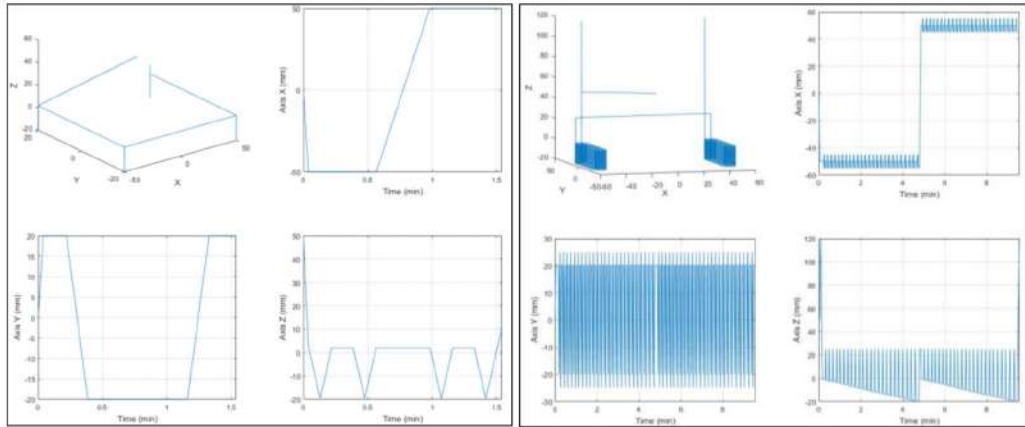
Şekil 5.30. (a) Matkap başlığı (10.2 Ø) (b) radyuslu freze başlığı (10 Ø)



Şekil 5.31. Slot deliklerine ait program çıktısı



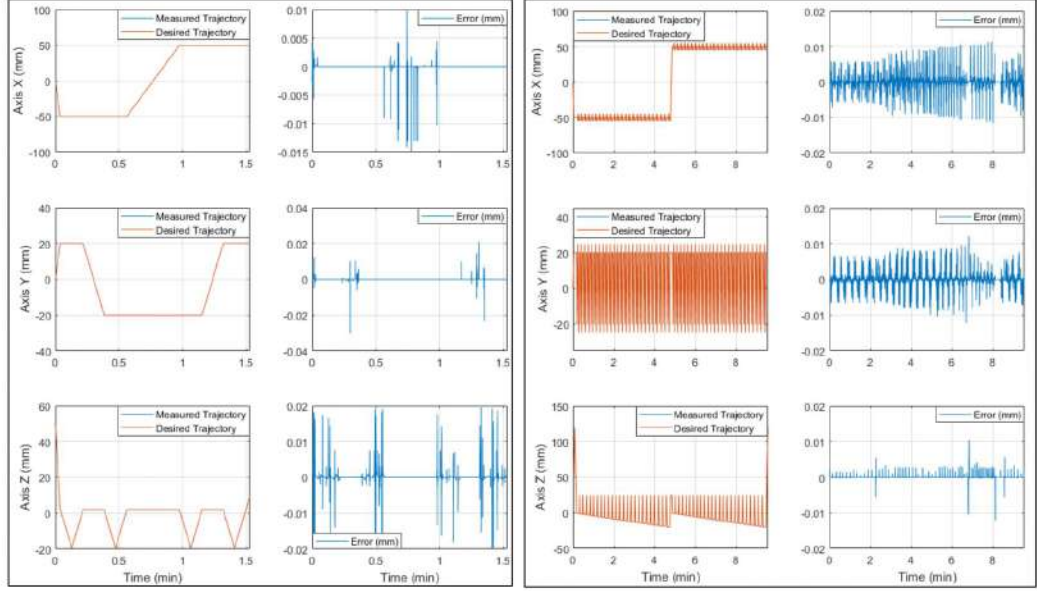
Şekil 5.32. Slot açma NC dosyasının program çıktısı



Şekil 5.33. Kesici takım yörüngesi/eksen yörüngeleri (a) slot delikleri (b) slot açma

Delikler delindikten sonra matkap başlığı çıkarılarak radyuslu freze başlığı takılmış ve tekrar parça sıfırlama işlemi uygulanmıştır. Slot açma uygulamasında 562 satırlık NC dosyası kullanılarak Şekil 5.32’de görülen program çıktısı elde edilmiştir. Slot deliklerinin delinmesi ve slotların açılmasında kesici takım için kartezyen uzayda takip edilen yörüngeler ve eksen motorlarına gönderilen eksen yörüngeleri Şekil 5.33’te ayrı

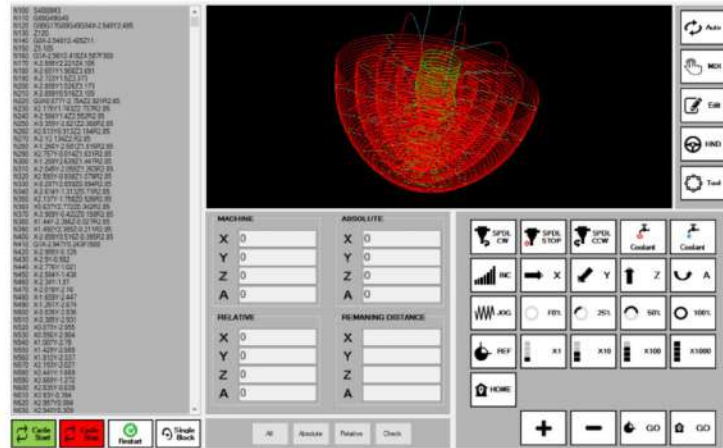
ayrı verilmiştir. Slot delikleri 92,640 yörünge verisi ile 1.53 dk, slot açma işlemi işe 573,877 yörünge verisi ile 9.56 dk sürmüştür. Bu iki çalışma için alınan gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata değerleri ise Şekil 5.34’te ayrı ayrı verilmiştir.



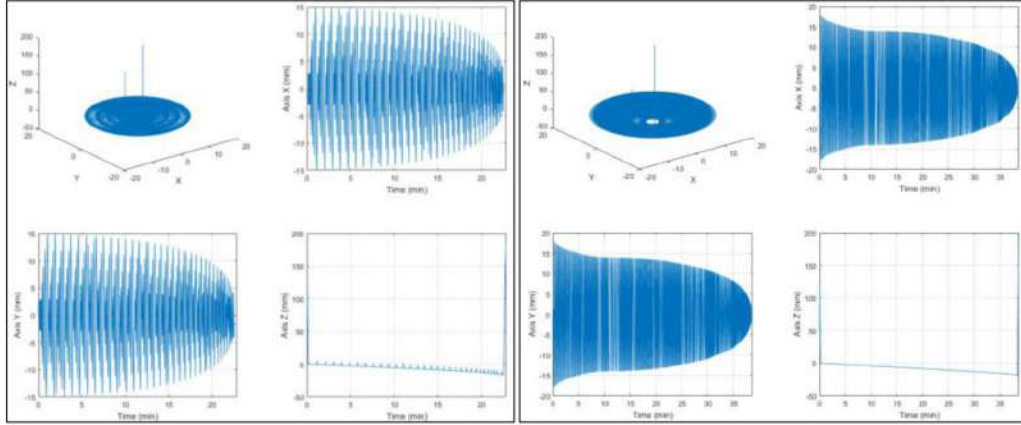
Şekil 5.34. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları (a) slot delikleri (b) slot açma

5.2.3. Konik küre açma işlemi

Slotlardan sonra parçanın merkez noktasına açılacak konik kürenin açılması adımına geçilmiştir. Konik küre açma işlemi de kaba ve finiş işleme olmak üzere iki farklı NC dosyası ile yapılmıştır. Kürenin kaba işlemesi 6 mm çapında freze başlığı, finiş işlemesi ise 8mm çapında freze başlığı ile yapılmıştır.

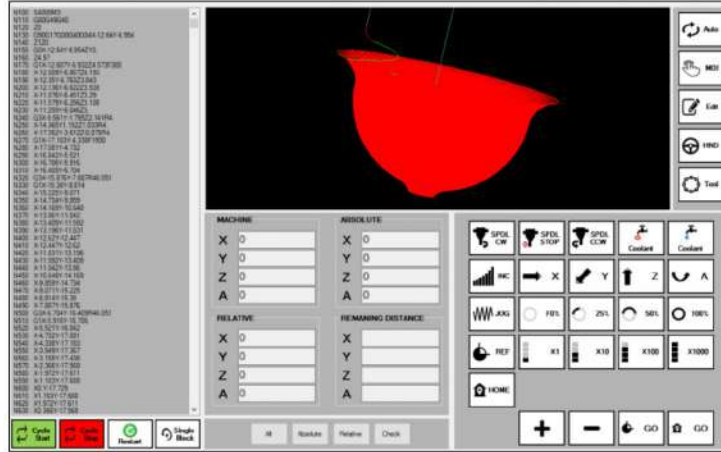


Şekil 5.35. Konik küre kaba işleme NC dosyasının program çıktısı



Şekil 5.36. Kesici takım yörüngesi/eksen yörüngeleri (a) konik küre kaba (b) konik küre finiş

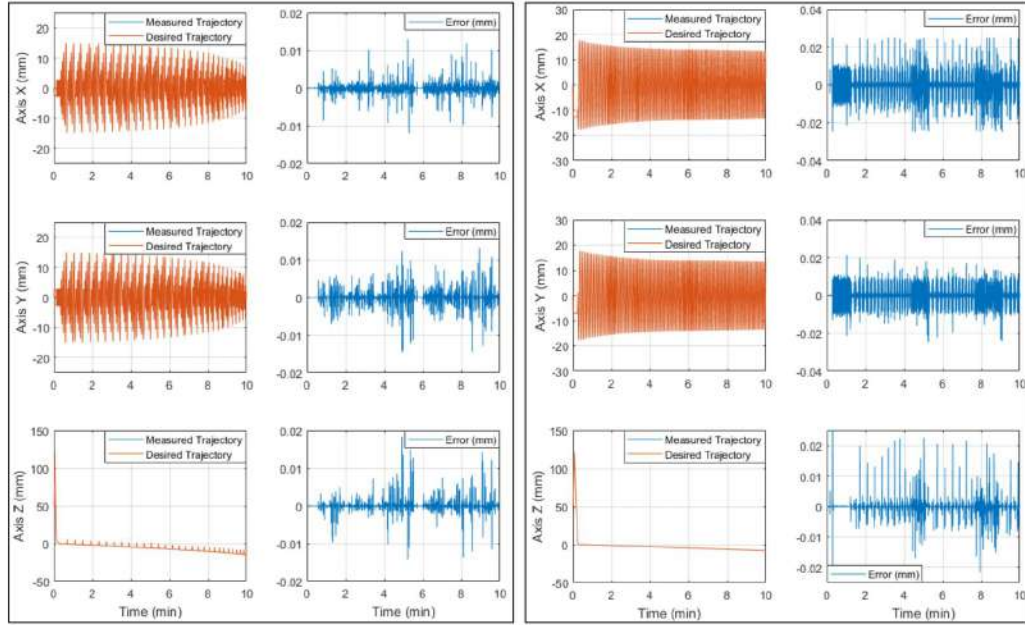
Her iki freze başlığı iş miline takıldıktan sonra parça sıfırlama işlemleri yapılarak yeni sıfırlar kontrol ünitesine tanıtılmıştır. 16,079 satırlık NC dosyası kullanılan kaba işleme uygulamasına ilişkin program çıktısı Şekil 5.35’de görülmektedir. Küre kaba işleme saat yönünde 4000 RPM spindle devri, 300 mm/dk (5 mm/s) kesici takım ilerleme hızı ile yapılmıştır.



Şekil 5.37. Konik küre finiş işleme NC dosyasının program çıktısı

1,372,174 yörünge verisi ile 22.86 dk süren bu uygulamaya ait kesici takım yörüngesi ve eksen yörüngeleri Şekil 5.36-a’da verilmiştir. Şekil 5.37’de yer alan program çıktısı ise 40,523 satırlık NC dosyası kullanılan küre finiş işleme uygulamasına aittir. Küre finiş işleme de kaba işlemede olduğu gibi saat yönünde 4000 RPM spindle devri, 300 mm/dk (5 mm/s) kesici takım ilerleme hızı ile yapılmıştır. 2,318,858 yörünge verisi ile 38.64 dk süren bu uygulamaya ait kesici takım yörüngesi ve eksen yörüngeleri Şekil

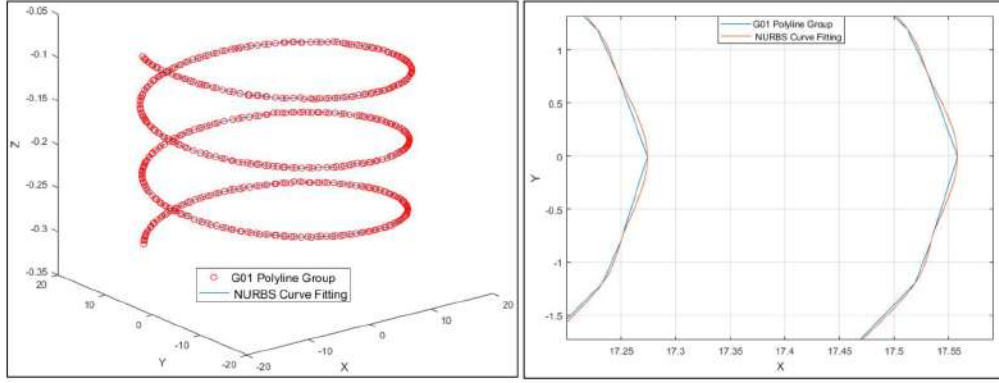
5.36-b’de verilmiştir. Bu iki uygulamaya ait gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları ve hata değerleri ise Şekil 5.38’de yer almaktadır. Küre açma uygulamasında kullanılan NC dosyaları eğrisel fonksiyon ağırlıklı olduğu için program çıktısı da NURBS eğrisel yörüngelerin temsil edildiği kırmızı renk ağırlıklıdır. Yörünge planlama bölümünde anlatıldığı üzere, CAM programı eğrisel yörüngeleri G01 nokta bulutları (G01 polyline group) ile NC dosyasına aktarıyorsa bu nokta bulutlarının G05.1 komutu kapsamında kontrol ünitesi tarafından eğrisel yörüngelere dönüştürülmesi gerekmektedir. Küre finiş işleme NC dosyası da bu özellikte olduğu için yapılan uygulamada nokta bulutu analiz algoritması ile tespit edilen çok sayıda nokta bulutu olmuştur. Her bir nokta bulutu kendi içinde NURBS eğrilerine dönüştürülerek kesici takım yörünge planlaması yapılmıştır.



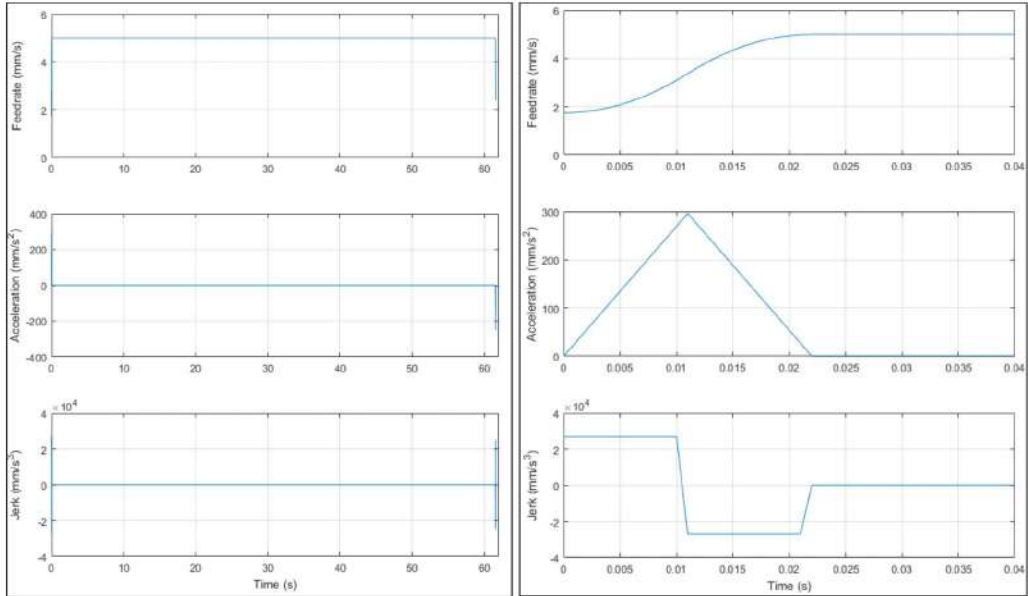
Şekil 5.38. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları (a) konik küre kaba işleme (b) konik küre finiş işleme

Küre finiş işleme uygulamasına ait bir nokta bulutunun NURBS eğrilerine dönüştürülmesi Şekil 5.39’da örnek olarak incelenmiştir. Nokta bulutu analizi sonucunda 502 veriden oluşan G01 nokta bulutu tespit edilmiş ve nokta bulutu 5.39’da görüldüğü gibi bir NURBS eğrisine dönüştürülmüştür. NURBS eğrisinin nokta bulutlarından geçtiğini ve yüzey hassasiyetinin NURBS eğrisi ile nasıl arttığını göstermek için yörünge bir bölümü yakından incelenmiştir. NURBS eğrisinin keskin geçişli G01 nokta bulutlarını nasıl yumuşattığı yaklaşımlı görüntüde yine

Şekil 5.39’da görülmektedir. Ayrıca bu NURBS eğrisine ait planlanan hız, ivme ve jerk grafikleri de Şekil 5.40-a’da verilmiştir. Hız eğrisinde görüldüğü gibi bu NURBS eğrisi 5 mm/s ilerleme hızı ile sabit hızda işlenmiştir. İlerleme hızının ve eğrilik değerlerinin (k) düşük olması bu NURBS eğrisinin sabit hızda işlenmesine imkân tanımıştır. Şekil 5.40-a’daki grafiklerin sabit hız süresi çok uzun olduğu için başlangıç ve bitiş bölgelerinin grafik detayları net olarak görülememektedir. Bu nedenle Şekil 5.40-b’de eğrinin sadece başlangıç bölgesi (0-0.04s) verilmiştir. Yakınlaştırılmış grafiklerde maksimum ivme (2000 mm/s^2) ve maksimum jerk (25.000 mm/s^3) değerlerinin aşılmadığı gözlemlenmiştir.

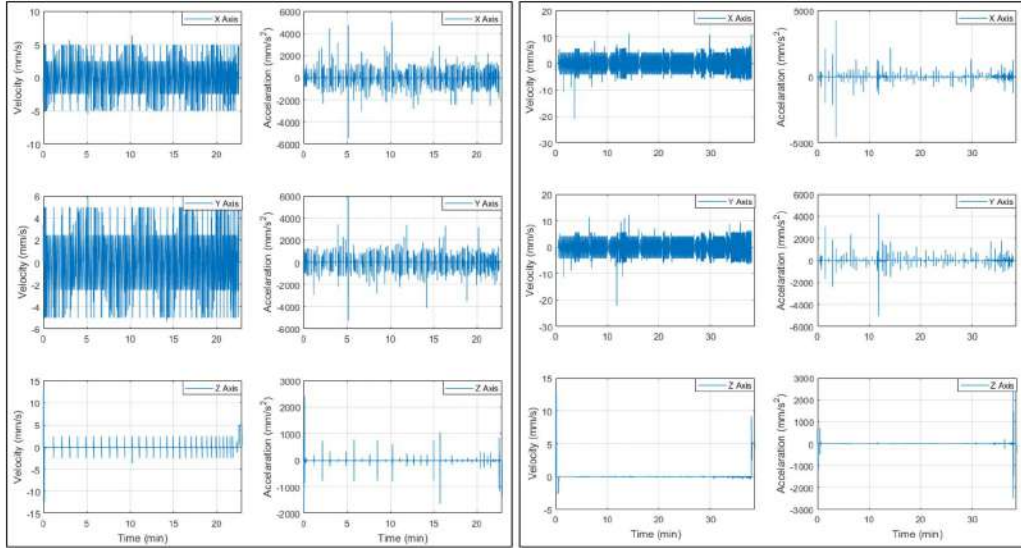


Şekil 5.39. Nokta bulutunun NURBS eğrisine dönüştürülmesi



Şekil 5.40. NURBS eğrisine ilişkin hız, ivme ve jerk grafikleri

Bunlara ek olarak bir NC dosyası temelinde oluşturulan kesici takım yörüngesinin NC dosyasına uygun oluşturulduğunu göstermek için de yüksek satırlı küre kaba ve küre finiş işleme uygulamalarının eksen yörüngelerinin hız ve ivme grafikleri analiz edilmiştir. NC dosyaları işlem türüne göre yüzlerce veya binlerce satır olabilmektedir. Yörünge planlamasında bir satırın yanlış veya eksik olması eksen yörüngelerinin hız ve ivme grafiklerinden anlaşılmaktadır. Çünkü her bir komut satırındaki eksen verileri bir sonraki komut satırının başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Bir satırda yanlışlık olduğu varsayılırsa o anki yörünge bitiş noktası, NC dosyasındaki komut satırı verileriyle uyuşmayacaktır. Bir sonraki komut satırı da NC dosyasındaki veriyi başlangıç noktası olarak kullanacağı için iki komut satırı arasında anlık sıçramalar meydana gelecektir. Bu sıçramalar ise eksen yörüngelerinin hız ve ivme grafiklerinde ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.41’de küre kaba ve küre finiş işleme için oluşan eksen yörüngelerinin hız ve ivme grafikleri ayrı ayrı verilmiştir. 1 ms örnekleme zamanı ile çalışıldığı için çok küçük hatalar yüksek hız ve ivme oluşturmaktadır. Ama grafiklerde görüldüğü üzere, her komut satırı için yörünge planlaması eksiksiz yapıldığı için eksen hız ve ivmeleri olağanüstü sıçramalar yapmamıştır.

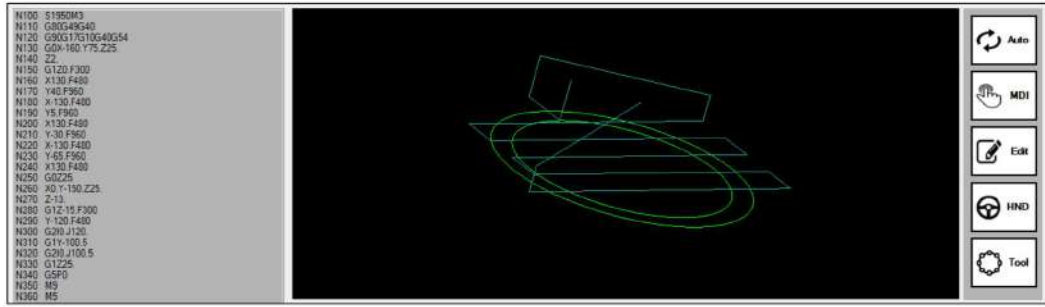


Şekil 5.41. Eksen hız ve ivme grafikleri (a) küre kaba işleme (b) küre finiş işleme

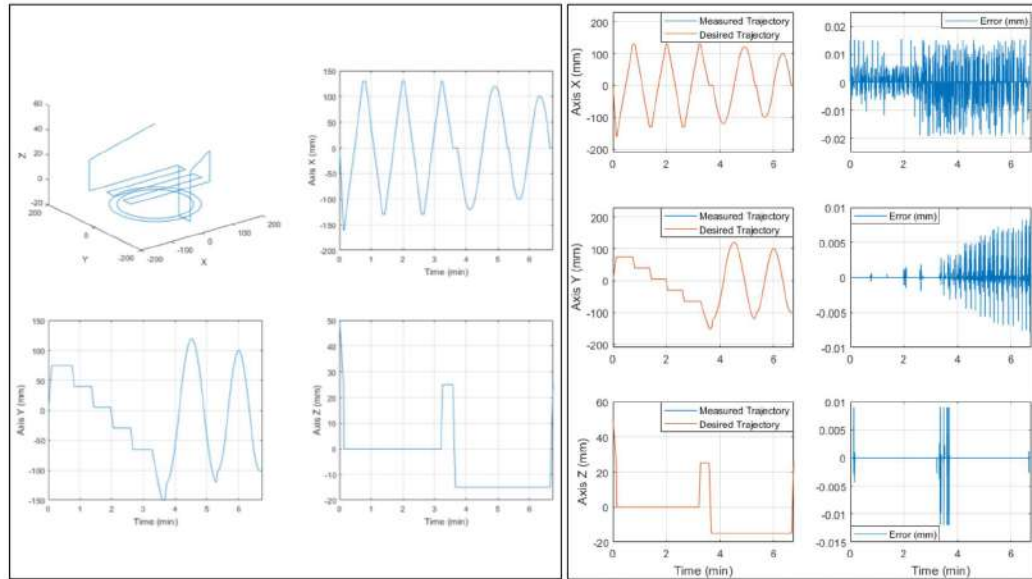
5.2.4. Genel finiş işleme

Parça üzerindeki tüm işlemler bittikten sonra genel finiş işleme yapılarak hedef ürün çıktısına ulaşılmıştır. Genel finiş uygulaması, slotlar ve küre haricinde kalan yüzeyleri

ilgilendirmektedir. Tarama başlığı ile verilen genel form, 18 mm çapında freze başlığı ile işlenerek ürün yüzey kalitesi artırılmıştır. Uygulamada 28 satırlık NC dosyası kullanılmış ve program çıktısı Şekil 5.42’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Genel finiş işleminde oluşan kartezyen uzaydaki kesici takım yörüngesi ve eksen yörüngeleri Şekil 5.43-a’da verilmiştir. 480 mm/dk (8 mm/s) ilerleme hızı ile çalışan bu işlem 404,399 yörünge verisi ile 6.74 dk sürmüştür. Gerçek zamanlı yörünge takip sonuçları ve hata değerleri Şekil 5.43-b’de görülmektedir.



Şekil 5.42. Genel finiş işleme NC dosyasının program çıktısı



Şekil 5.43. (a) Kesici takım yörüngesi/eksen yörüngeleri (b) gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları

Genel finiş işlemini uygulamasının öncesi ve sonrası arasındaki yüzey kalite farkı Şekil 5.44’te yer alan resimlerde görülmektedir.



Şekil 5.44. Genel finiş işlemi (a) öncesi (b) sonrası

Gerçek zamanlı eksen yörünge takip sonuçlarının sayısal değerler üzerinden analiz edilebilmesi için, MSE ve RMSE ölçütleri kullanılarak Tablo 5.5'te yer alan hata miktarları hesaplanmıştır. Denklem (5.1)'de yer alan MSE ve RMSE eşitliklerinde, kaba talaş kaldırma, küre kaba ve küre finiş işleme uygulamaları için $n=600,000$, slot delikleri için $n=92,640$, slotların açılması için $n=573,877$ ve son olarak genel finiş uygulaması için $n=404,399$ olarak işleme alınmıştır. Tablo 5.2'deki hata değerlerinden gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçlarının başarılı bir şekilde yapıldığı görülmektedir.

Tablo 5.2. Eksenel yörünge takibine ilişkin RMSE ve MSE hata değerleri (3-Eksen CNC-Freze Tezgâhi tüm uygulamaları)

	Kaba Talaş Kaldırma		Slot Deliklerinin Delinmesi		Slotların Açılması	
	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
X Eksen	0.0032	1.008e-5	2.031e-04	4.127e-08	0.0022	4.852e-6
Y Eksen	0.0042	1.786e-5	1.236e-4	2.653e-8	0.0023	5.490e-6
Z Eksen	6.17 e-04	8.25e-07	0.0010	1.062e-6	8.311e-4	6.907e-7
	Konik Küre Kaba İşleme		Küre Küre Finiş İşleme		Genel Finiş İşleme	
	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
X Eksen	0.0020	4.1832e-6	0.0036	1.2956e-5	7.2291e-4	4.388e-6
Y Eksen	0.0029	8.3658e-6	0.0020	3.9324e-6	1.4152e-4	5.671e-6
Z Eksen	8.240e-4	6.7904e-7	0.0010	1.0518e-6	4.7173e-5	2.2253e-9

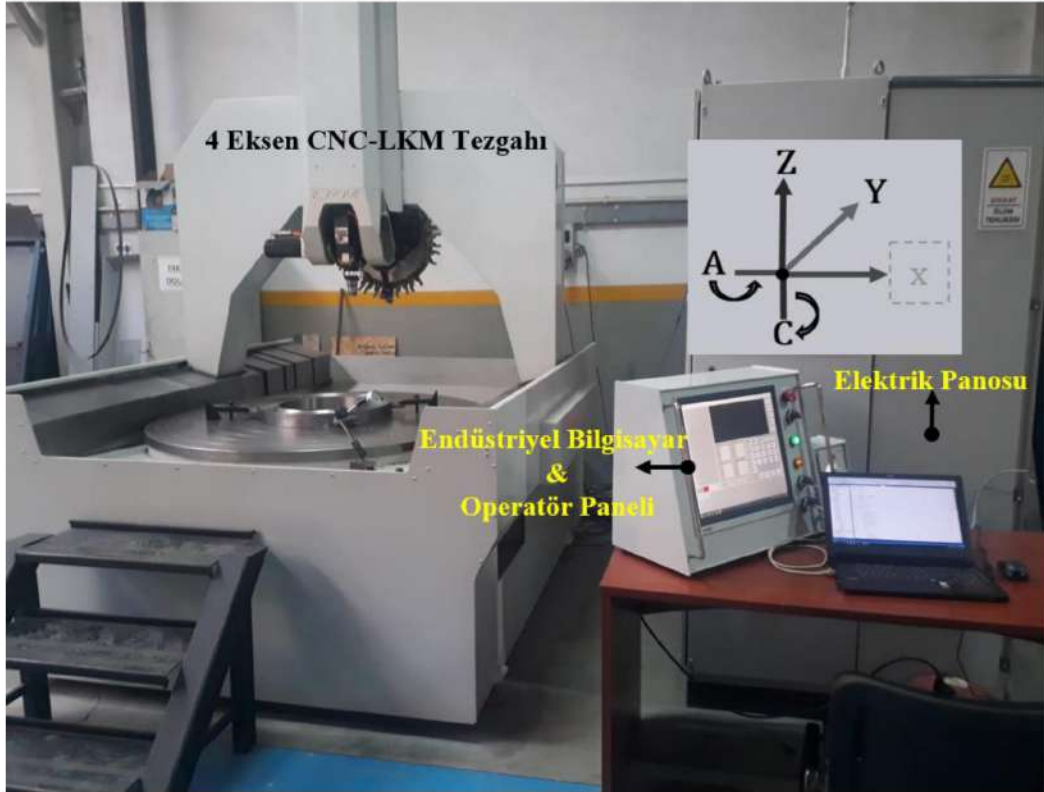
5.2.5. Uygulama değerlendirmeleri

3-Eksen CNC-Freze tezgâhında endüstriyel üretim adımlarından oluşan uygulamaların yapılması CNC kontrol ünitesinin endüstriyel yeterliliğinin ölçülmesi açısından çok fayda sağlamıştır. Tüm uygulamalardaki gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçlarından hedef yörüngelerin eksen motorları tarafından başarılı bir şekilde takip edildiği görülmüştür. Yörünge takibi sonuçlarının bu kadar yüksek doğrulukla takip edilmesi yörünge planlama ve interpolasyon işlemlerinin başarısını da ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntemlerin temelinde yüksek hassasiyetli ve titreşimsiz tezgâh hareketleri bulunmaktadır. Binlerce satır NC dosyalarının doğru analiz edilip doğru yörünge planlama ve interpolasyon işlemlerine tabi tutulması yörünge takibi sonuçlarına etki etmiştir. Çünkü tezgâhın ürün işleme sırasında titreşimli çalışması eksen motorlarının sürekli dur kalk yaparak veya kararsız çalıştığını göstermektedir. Bu durum da hem yörünge takibi sonuçlarında yüksek hatalarla hem de ürün yüzey kalitesinin düşük olmasıyla karşımıza çıkmaktadır. Fakat elde edilen uygulama sonuçlarından, yörünge takip hatalarının mikron seviyelerde, ürün çıktılarının yüzey kalitesinin de yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ürün çıktısının ölçüm işlemleri de Taksan (Dener Makina) kontrol birimi tarafından yapılmış ve Ek-B’de yer alan rapor alınmıştır. İşlenen ürün özelinde verilen tolerans değerlerinin altında doğrulukla ürünün işlendiği rapor sonuçlarında görülmektedir. Ayrıca ürün işleme süreçlerinde alınan bazı fotoğraflar da Ek-C’de verilmiştir.

5.3. Endüstriyel 4-Eksen CNC-Freze Tezgâhı Kontrolü

Bu bölümde, geliştirilen CNC kontrol ünitesinin farklı eksen konfigürasyonlarına sahip bir CNC-Freze tezgâhı üzerinde çalışma performansını görmek için uygulamalar yapılmıştır. Uygulamalarda kullanılan CNC tezgâhı lastik kalıbı işleme özelinde geliştirilmiş olduğu için CNC-LKM olarak tanımlanmaktadır. CNC-LKM tezgâhının iki eksen doğrusal (Y-Z), iki eksen de döner (C-A) olmak üzere Şekil 5.45’te görüldüğü üzere toplamda dört eksenini bulunmaktadır [93]. Tezgâhın Y-Z-A eksen hareketleri kesici takım üzerinden sağlanırken, C eksen hareketi ise döner tabla üzerinden verilmektedir. CNC-LKM tezgâhına ait motor sürücülerinin, IO terminalinin, rölelerin güç kaynaklarının ve diğer donanımların yer aldığı elektrik panosu ise Şekil 5.46’da gösterilmiştir. Şekil 5.45’te görülen CNC-LKM tezgâhı

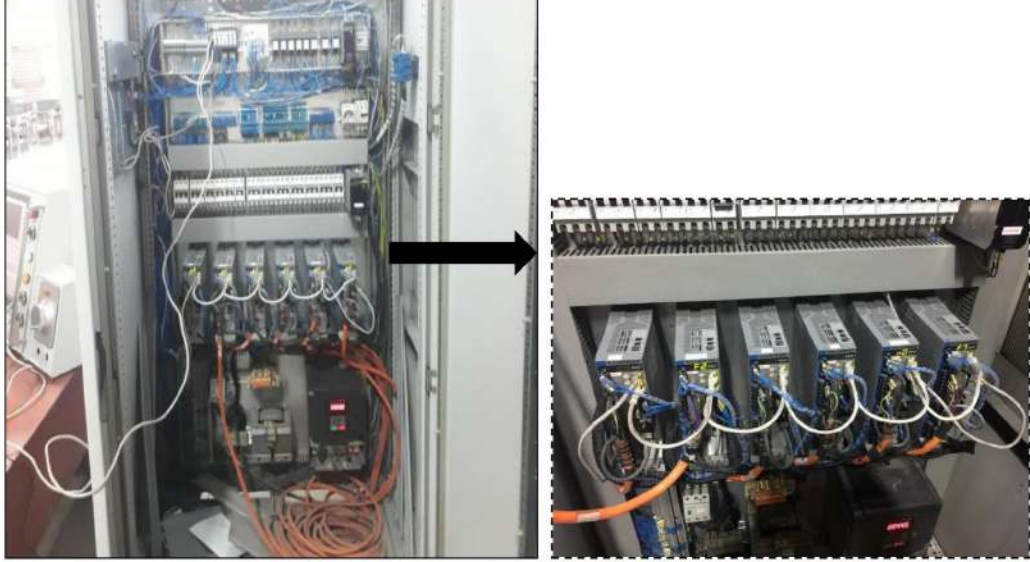
köprülü yapısı gereği Y eksenine karşılıklı çalışan iki vidalı mil ile hareket verilmektedir. Bu nedenle Y eksenini senkron çalışan iki farklı motorla sürülmektedir. Dolayısıyla Y ekseninde iki, Z, C ve A eksenlerinde de bir olmak üzere toplamda eksenler için beş AC servo motor bulunmaktadır. Ayrıca takım değiştirme magazini (ATC) için bir AC servo motor, spindle için de bir adet asenkron motor bulunmaktadır. Belirtilen motorlara ait sürücüler Şekil 5.46'da yer alan elektrik panosunda görülmektedir.



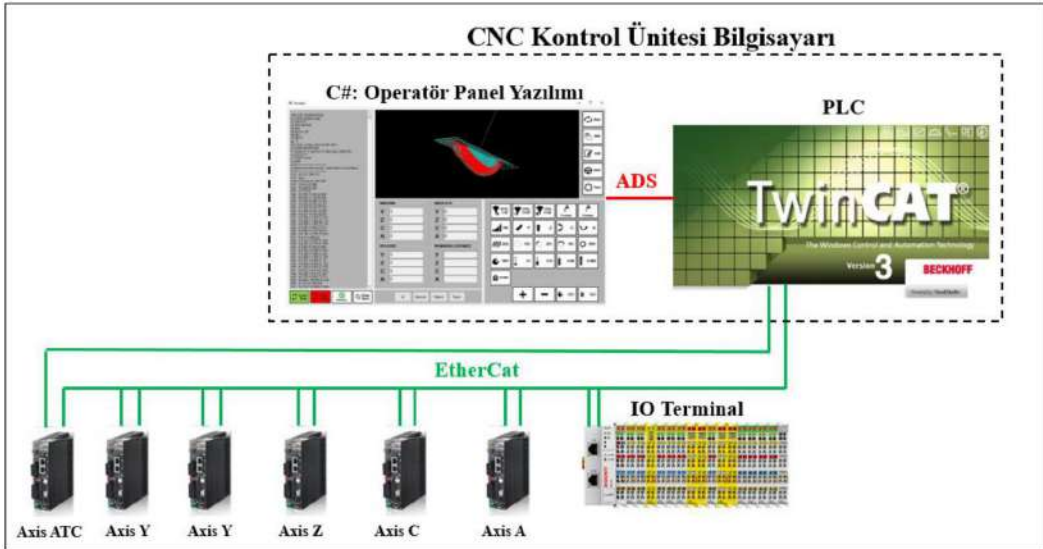
Şekil 5.45. 4-Eksen CNC-LKM tezgâhi

CNC tezgâhının Y ve C eksenlerinde Kollmorgen AKM52G-ANDNGE00 model 3000 RPM, 4.5 Nm nominal tork ve 1.99 kw güç değerlerine sahip üç adet frensiz AC servo motor, Z ekseninde Kollmorgen AKM52G-AND2GE00 model 3000 RPM, 4.5 Nm nominal tork ve 1.99 kw güç değerlerine sahip frenli AC servo motor, A ekseninde Kollmorgen AKM43E-ANDNGE00 model 3000 RPM, 4.5 Nm nominal tork ve 1.12 kw güç değerlerine sahip frensiz AC servo motor kullanılmıştır. Ayrıca tüm motorlarda 20 bitlik artımsal enkoderler bulunmaktadır. AC servo motor sürücüleri ise EtherCat Slave özellikli Kollmorgen AKD model kompakt sürücülerdir. Tezgâhta

spindle motoru olarak da 30000 RPM devir değerine sahip asenkron motor kullanılmaktadır. Spindle motor sürücüsü olarak da TECO A510 marka 3-faz 400 V inverter bulunmaktadır. Bu donanımlar doğrultusunda CNC kontrol ünitesi bilgisayarı ile fiziksel sistem arasında Şekil 5.47’de görülen haberleşme yapısı kurulmuştur.



Şekil 5.46. CNC-LKM tezgâhı elektrik panosu



Şekil 5.47. CNC kontrol ünitesi ile fiziksel sistem arasında kurulan bağlantı yapısı

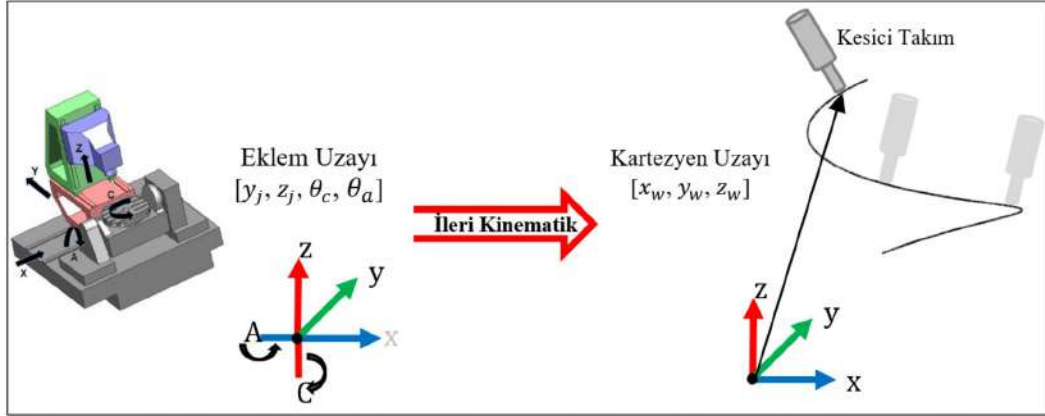
5.3.1. Kinematik dönüşüm işlemleri

Bir önceki bölümden hatırlanacağı üzere 3-Eksen CNC-Freze tezgâhında yapılan uygulamalarda 3-Eksen (X-Y-Z) NC kodlar kullanılmaktaydı. Kesici takım yörünge

planlaması da kartezyen uzayda (X-Y-Z) yapıldığı için kinematik dönüşüm işlemine gerek duyulmadan sadece motor sürücülerine aktarım organına (vidalı mil, dişli kutusu vb.) bağlı bir parametre girilerek hedef yörüngeler eksen motorlarına doğrudan aktarılıyordu. Fakat CNC-LKM tezgâhı 4-Eksen (Y-Z-C-A) NC kod dosyası ile çalıştığı için yörünge planlaması öncesinde ve sonrasında kinematik dönüşüm işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilen CNC kontrol ünitesi yazılım yapısının esnek olması dolayısıyla gerekli kinematik işlemler yazılıma tanımlanarak bu çalışmada önerilen yöntemlerin CNC-LKM tezgâhında da aynı performansta kullanılması sağlanmıştır.

5.3.1.1. İleri kinematik dönüşümü

CNC-LKM uygulamalarında kullanılan 4-Eksen NC dosyasında Y-Z-C-A eksenlerine ilişkin eklem uzayı verilerini bulundurmaktadır. Fakat yörünge planlamasında kullanılan veriler iş parçası (workpiece) koordinat sistemindeki kartezyen uzay verileridir. Bu nedenle operatör panel yazılımında 4-Eksen NC dosyası okunduktan sonra Şekil 5.48’de görüldüğü gibi ileri kinematik dönüşümü yapılmaktadır.



Şekil 5.48. İleri kinematik dönüşümü

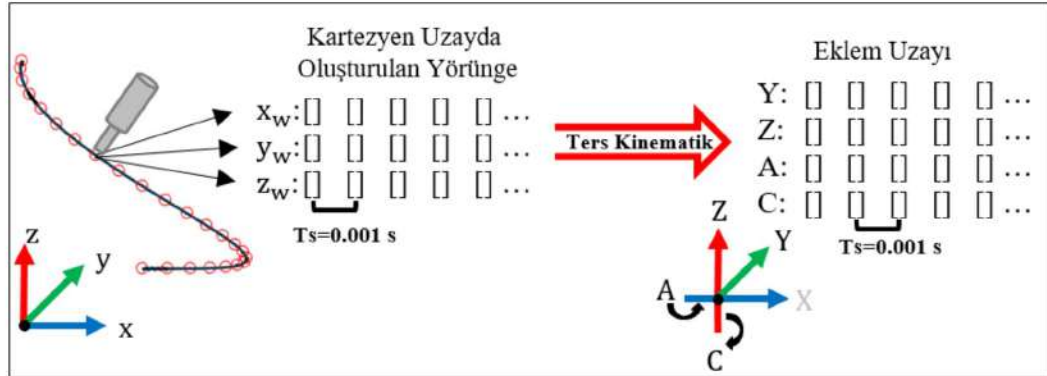
LKM tezgâhının ileri kinematik dönüşümünde Denklem (5.2)’de yer alan eşitlikler kullanılmaktadır. Denklemde, (x_w, y_w, z_w) iş parçasına göre oluşan kartezyen uzay verilerini, (y_j, z_j) NC dosyasındaki doğrusal eklem uzayı verilerini, (θ_a, θ_c) NC dosyasındaki döner eklem uzayı verilerini, l_{tool} ise kesici takımın, dönme noktasına göre uzunluğunu ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(y_j + l_{\text{tool}}(\cos(\theta_a + 270^\circ)) \left(\frac{\pi}{180} \right) \right) \cos\left(-\theta_c \frac{\pi}{180}\right) \\ y_j + l_{\text{tool}}(\cos(\theta_a + 270^\circ)) \left(\frac{\pi}{180} \right) \sin\left(-\theta_c \frac{\pi}{180}\right) \\ z_j + l_{\text{tool}}(\sin(+270^\circ)) \frac{\pi}{180} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

LKM tezgâhının C eksenini kesici takımından bağımsız hareket ettiği için temel alınan koordinat sistemi kesici takım yerine iş parçası olmuştur. Bu nedenle 3-Eksen CNC-Freze tezgâhı uygulamalarından farklı olarak, LKM tezgâhı uygulamalarında kesici takım yörüngesi ifadesi kullanılmamaktadır.

5.3.1.2. Ters kinematik dönüşümü

İş parçası temelinde kartezyen uzayda yapılan yörünge planlama ve interpolasyon işlemleri bittikten sonra bu verilerin tekrar eklem uzayı verilerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda Şekil 5.49'da görüldüğü gibi kartezyen uzaydan eklem uzayına geçmek için ters kinematik dönüşüm işlemi yapılmaktadır.



Şekil 5.49. Ters kinematik dönüşümü

Bu dönüşüm işleminde Y ve Z eksenlerine ait veriler Denklem (5.3)'te yer alan eşitliklerle ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

$$y_j^i = \sqrt{(x_w^i)^2 + (y_w^i)^2} \quad (5.3)$$

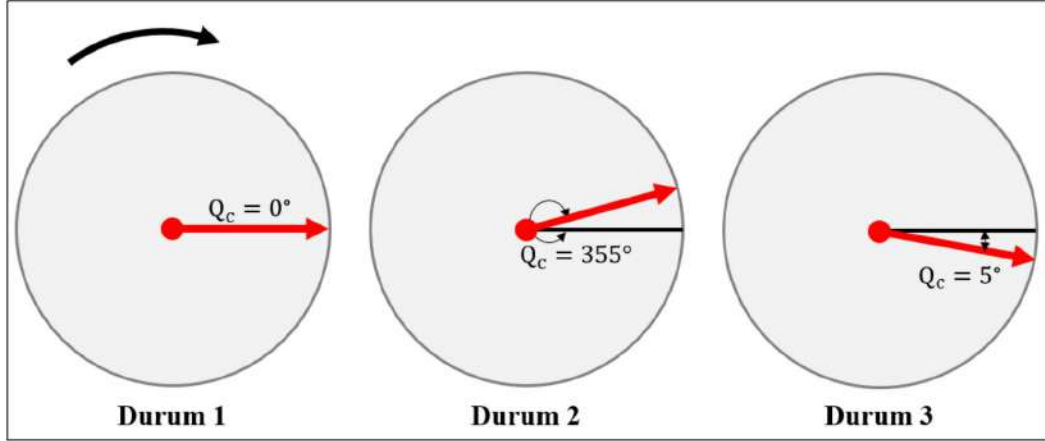
$$z_j^i = z_w^i$$

Fakat döner C ve A eksen verileri, doğrusal Y ve Z eksenlerine göre daha ayrıntılı hesaplama işlemi gerektirmektedir. Kartezyen uzay verileri kullanılarak C eksen verisi normalde Denklem (5.4) eşitliği ile elde edilmektedir. Fakat C eksenini hareket ettiren döner tablanın mekanik olarak sonsuz dönme kabiliyetinin olması Denklem (5.4)'ü yetersiz kılmaktadır. Bu durumun anlaşılabilmesi için Şekil 5.53'te görüldüğü gibi örnek bir senaryo oluşturulmuştur. Döner tablanın başlangıç konumundan ($\theta_c = 0$) başlayarak saat yönünde hareketle $\theta_c = 355^\circ$ konumuna geldiği ve bu konumdan da $\theta_c = 5^\circ$ noktasına gideceğini varsayalım. Bu durumda, döner tabla motoruna 355° değerinden sonra 5° değeri gönderilirse, tabla saat yönü tersinde 350° hareket ederek 5° konumuna ulaşacaktır. Döner tablanın bu şekilde yanlış yönetime bağlı hatasını engellemek için Denklem (5.5) eşitliği kullanılarak döner tabla motoruna gönderilecek veri revize edilmektedir. Şekil 5.50'deki senaryo için, döner tabla motoruna 5° yerine 365° değeri gönderilerek tablanın hedef noktaya doğru yönelimle ulaşması sağlanmaktadır.

$$C_{\text{new}} = \begin{cases} \text{atan2}(x_w, y_w) & , (x_w > 0, y_w \geq 0) \\ 90 & , (x_w = 0, y_w > 0) \\ 180 + \text{atan2}(y_w, x_w) & , (x_w < 0, y_w > 0) \\ 180 & , (x_w < 0, y_w = 0) \\ 180 + \text{atan2}(y_w, x_w) & , (x_w < 0, y_w < 0) \\ 270 & , (x_w = 0, y_w < 0) \\ 360 + \text{atan2}(y_w, x_w) & , (x_w > 0, y_w < 0) \\ 0 & , \text{diğer} \end{cases} \quad (5.4)$$

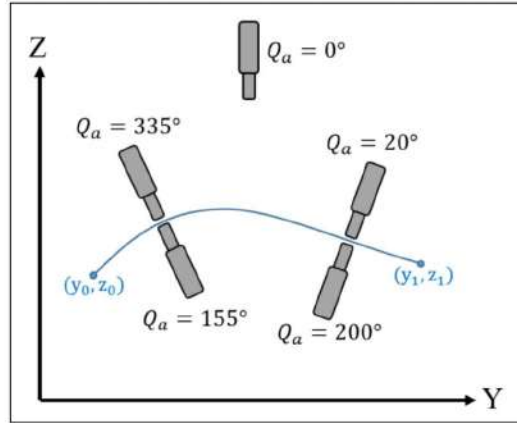
$$\theta_c^i = \begin{cases} \theta_c^{i-1} + 360 + (C_{\text{new}} - C_{\text{old}}) & , (C_{\text{new}} \geq 0, C_{\text{new}} < 90, C_{\text{old}} < 360, C_{\text{old}} \geq 270) \\ \theta_c^{i-1} + (C_{\text{new}} - C_{\text{old}}) - 360 & , (C_{\text{new}} < 360, C_{\text{new}} \geq 270, C_{\text{old}} \geq 0, C_{\text{old}} < 90) \\ \theta_c^{i-1} + (C_{\text{new}} - C_{\text{old}}) & , \text{diğer} \end{cases} \quad (5.5)$$

Denklem (5.4)'te yer alan C_{old} parametresi, Denklem (5.3) ile hesaplanan C_{new} parametresinin bir önceki değerini almaktadır. Kesici takımın X eksenine etrafındaki yönelimini ayarlayan A açısının ters kinematik işlemlerle hesaplanması da C ekseninde olduğu gibi kademeli işlem adımlarını gerektirmektedir. Hatta A açısı bir yönelim açısı olduğu için kendi içinde özel durumları mevcuttur. LKM tezgahında A açısının 0° olduğu durum, kesici takımın döner tablaya göre dik konumda olduğu açıdır.



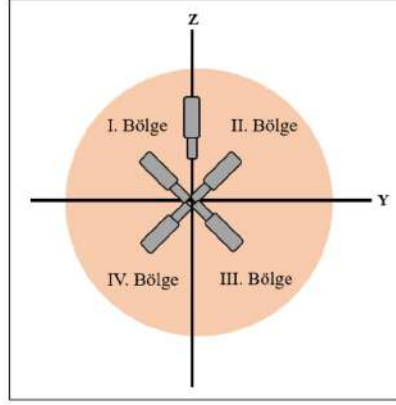
Şekil 5.50. Döner tabla için örnek çalışma senaryosu

Y-Z ekseninde işlenecek yörüngeye göre A açısı konumu değiştirilerek ürünün yörüngeye dik olarak işlenmesi sağlanmaktadır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken durum, Y-Z eksenindeki yörüngeyi kesici takım içeriden ve dışarıdan iki ayrı diklik açısı işlenebilmektedir. Şekil 5.51'de, örnek bir yörünge üzerinde kesici takımın bu yörüngeyi iki farklı diklik açısı ile nasıl işleyebildiğini açıklayan bir görsel verilmiştir.



Şekil 5.51. Kesici takım yönelim açıları

Her bir yörünge noktasında, o noktaya dik iki farklı A açısı olduğu için ters kinematik işleminde her iki A açısı da hesaplanmaktadır. Öncelikle kesici takımın Y-Z eksenindeki yönelim açıları Şekil 5.52'de görüldüğü gibi tanjant bölgelerine ayrılmış ve Denklem (5.5) eşitlikleri ile açısal hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 5.52. A açısının tanjant bölgelerine ayrılması

$$y = y_j^i - y_j^{i-1}$$

$$z = z_j^i - z_j^{i-1}$$

$$s_1 = \text{sign}(y)$$

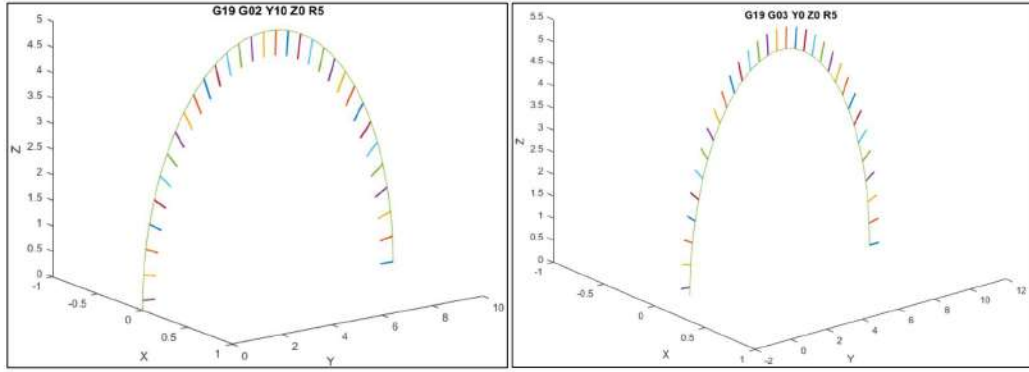
$$s_2 = \text{sign}(z)$$

$$A_{\text{in}} = \begin{cases} -\text{atan2}(z, y) & , (s_1 > 0, s_2 > 0) \\ \text{atan2}(z, y) - 180 & , (s_1 < 0, s_2 > 0) \\ 180 - \text{atan2}(z, y) & , (s_1 < 0, s_2 < 0) \\ 90 - \text{atan2}(y, z) & , (s_1 > 0, s_2 < 0) \\ 270 & , (s_1 = 0, s_2 > 0) \\ 90 & , (s_1 = 0, s_2 < 0) \\ 0 & , (s_2 = 0, s_2 \neq 0) \\ 0 & , \text{diğer} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$A_{\text{out}} = \begin{cases} 180 - \text{atan2}(z, y) & , (s_1 > 0, s_2 > 0) \\ \text{atan2}(z, y) & , (s_1 < 0, s_2 > 0) \\ -\text{atan2}(z, y) & , (s_1 < 0, s_2 < 0) \\ -(90 + \text{atan2}(y, z)) & , (s_1 > 0, s_2 < 0) \\ 90 & , (s_1 = 0, s_2 > 0) \\ 270 & , (s_1 = 0, s_2 < 0) \\ 0 & , (s_2 = 0, s_2 \neq 0) \\ 0 & , \text{diğer} \end{cases}$$

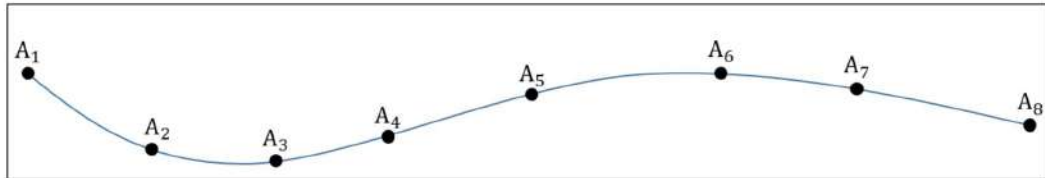
Denklem (5.6)'da görüldüğü üzere A_{in} ve A_{out} olmak üzere iki farklı A açısı değeri elde edilmektedir. İlgili yörünge için hangi A açısının seçileceği ise önemli bir konudur. Çünkü yörüngeye dışarıdan bakılarak hangi açı değerinin seçileceği

anlaşılamamaktadır. Bu durumun zorluğu G19 (Y-Z) düzlemindeki iki dairesel hareketle Şekil 5.53'te görüldüğü gibi vurgulanmıştır. Şekil 5.53-a ve 5.53-b'de yer alan iki dairesel hareketin kartezyen uzay yörüngeleri birebir aynıdır. Fakat dairesel hareketlerin başlangıç ve bitiş noktaları farklı olduğu için aynı yörünge Şekil 5.53-a'da G02 komutu ile, Şekil 5.53-b'de G03 komutu ile tanımlanmıştır. G02 komutu ile işlenen dairesel yörüngede A_{out} açısı kesici takımı dairenin iç bölgesinden götürürken, G03 komutuyla işlenen yörüngede A_{out} açısı kesici takımı dairenin dış bölgesinden hareket ettirmiştir. Bu nedenle kartezyen uzay yörüngesi A_{in} , A_{out} açı seçiminde yetersiz kalmaktadır. Bu doğrultuda, işlenecek yörüngede doğru A açısının seçimi için NC dosyasındaki A açı verileri kullanılmaktadır.



Şekil 5.53. (a) Saat yönünde (G02) dairesel hareket ve yönelim açıları (b) saat yönü tersinde (G03) dairesel hareket ve yönelim açıları

Örneğin sekiz G01 nokta bulutundan Şekil 5.54'te görüldüğü gibi bir NURBS eğrisi oluşturulduğunu varsayalım. Yörünge planlama ve interpolasyon işlemlerinden sonra her iki G01 nokta arasında çok sayıda veriler oluşmaktadır. Bu verilere uygun hesaplanan A_{in} , A_{out} açı değerlerinden hangi açıların seçileceğine NC dosyasında verilen A değerleri (A_1, \dots, A_8) karar vermektedir. Ara veriler yörüngeyi hangi iki noktası arasında denk geliyorsa karar aşamasında da o iki veri aktif rol oynamaktadır.



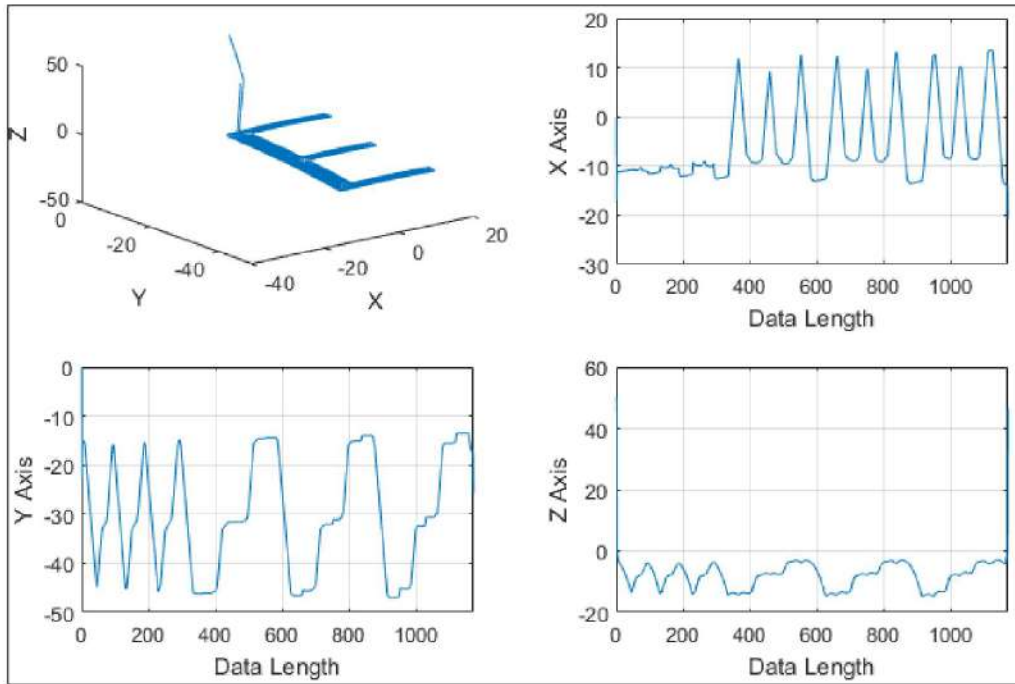
Şekil 5.54. Örnek bir nokta bulutundan elde edilmiş NURBS eğrisi üzerinde doğru A açılarının bulunması

Kesici takımın yönelimini gösteren A açılarının (θ_a) belirlenmesinden sonra Denklem (5.3)'te bulunan Y ve Z eksen verileri Denklem (5.7) eşitlikleri ile güncellenmektedir.

$$y_j^i = \sqrt{(x_w^i)^2 + (y_w^i)^2} - l_{\text{tool}}(\sin(\theta_a^i)) \quad (5.7)$$

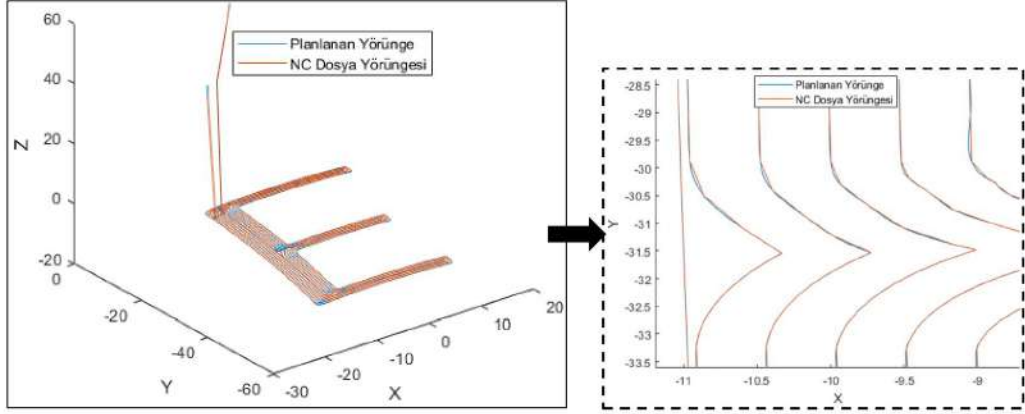
$$z_j^i = z_w^i + l_{\text{tool}}(\cos(\theta_a^i))$$

LKM özelinde yapılan yörünge planlama işlemleri 1170 satırlık bir NC dosyası üzerinden analiz edilmiştir. Şekil 5.58-a'da, 1170 satırlı 4 Eksen LKM tezgahı için üretilmiş NC dosya verileri bulunmaktadır. 4 eksen (Y-Z-C-A) verileri, CNC kontrol ünitesi tarafından ileri kinematik dönüşüm işlemleri sonrasında Şekil 5.56'da görüldüğü gibi kartezyen uzay verilerine dönüştürülmüştür.



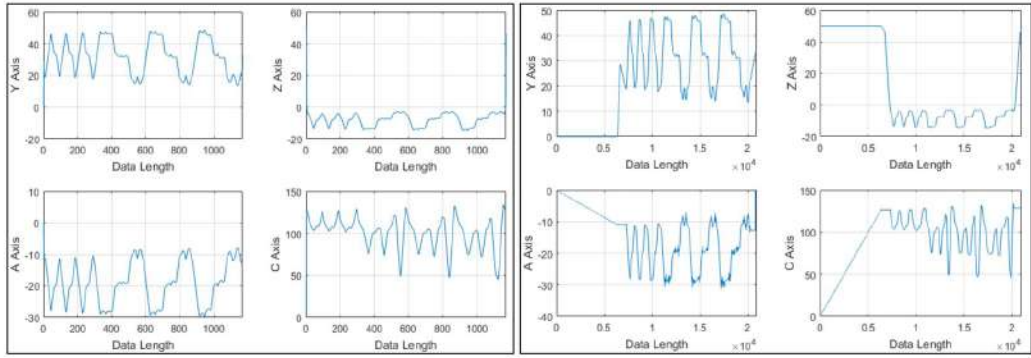
Şekil 5.55. 4-Eksen NC dosya yörüngesinin ileri kinematik işlemlerle kartezyen uzay yörüngesine dönüştürülmesi

Yörünge planlama ve interpolasyon işlemleri sonrasında Şekil 5.57'de yer alan kartezyen uzay verileri elde edilmiş ve NC dosya yörüngesi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.57'de, Şekil 5.56'daki NC dosya yörüngesindeki sert geçişlerin nasıl yumuşatıldığı görülmektedir.



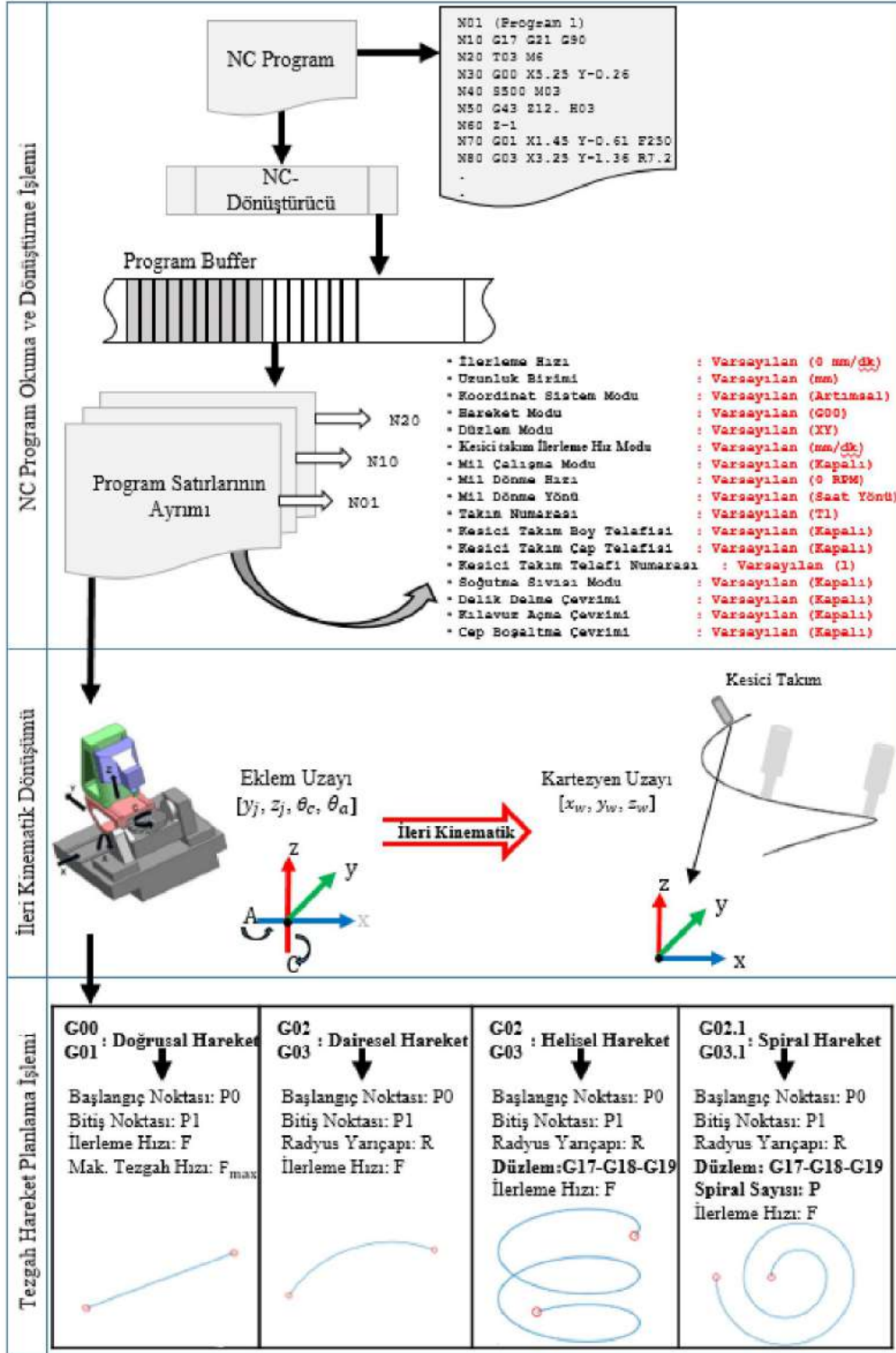
Şekil 5.56. Planlanan yörüngenin NC dosya yörüngesi ile karşılaştırılması

Kartezyen uzay yörüngesi oluşturulduktan sonra ters kinematik dönüşüm işlemleri ile tekrar Y-Z-C-A eklem uzayına geçilmekte ve eksen motorlarına gönderilecek nihai yörüngeler Şekil 5.58-b’de görüldüğü gibi elde edilmektedir. 1071 veriden oluşan 4-Eksen NC dosya verileri, yapılan işlemler sonrasında 20931 veriden oluşan 4-Eksen NC dosya verilerine dönüştürülmüştür. Şekil 5.58-a’daki NC dosya verileri ile belirtilen tezgâh eksen konumlarına, bir hareket planlaması ile nasıl ulaşıldığı Şekil 5.58-b’de görülmektedir.

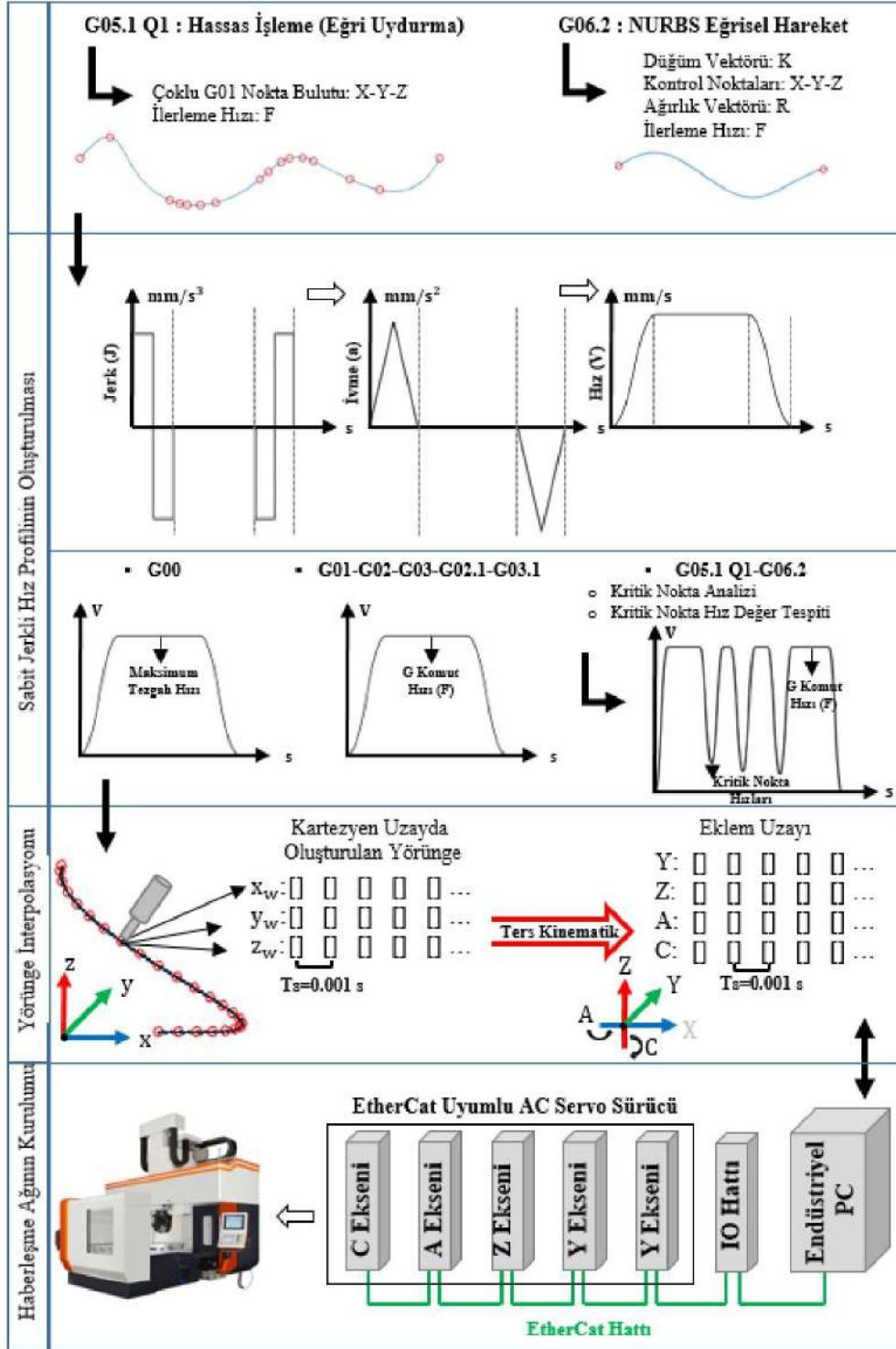


Şekil 5.57. (a) 4-Eksen NC dosya verileri (b) ters kinematik dönüşüm işlemi sonrası elde edilen 4-Eksen yörüngesi

Yapılan kinematik işlemlerle birlikte CNC kontrol ünitesinin LKM tezgahındaki işlem adımının daha net anlaşılabilmesi için Şekil 5.55’te 4-Eksen CNC-LKM tezgahı özelinde hazırlanan çalışma yapısı verilmiştir.



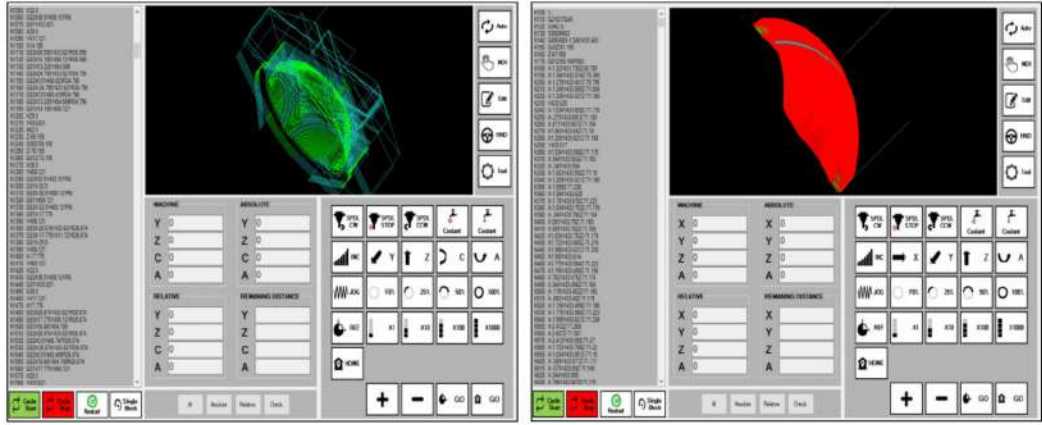
Şekil 5.58. 4-Eksen CNC-LKM tezgahı özelinde CNC kontrol ünitesi çalışma yapısı



Şekil 5.58. (Devam) 4-Eksen CNC-LKM tezgâhı özelinde CNC kontrol ünitesi çalışma yapısı

5.3.2. Kütük parçaya küresel form verme uygulaması

Bu çalışmada da önerilen matematiksel yöntemlerin deneysel performansını kapsamlı bir uygulamada görmek için kütük parçanın küresel forma dönüştürülmesi işlemi yapılmıştır. Bu uygulama kaba (1,436 satır NC kod) ve finiş (34,624 satır NC kod) işleme olmak üzere iki farklı G-kod dosyası ile yapılmıştır. Şekil 5.59'da kontrol ünitesi arayüzü üzerinde kaba işleme ve finiş işleme program çıktısı görülmektedir. Şekil 5.60-a'da yer alan kütük parçanın, kaba ve finiş programlarının CNC tezgâhında çalıştırılmasından sonra küresel forma dönüşüm süreci Şekil 5.60-b ve 5.60-c'de görülmektedir.



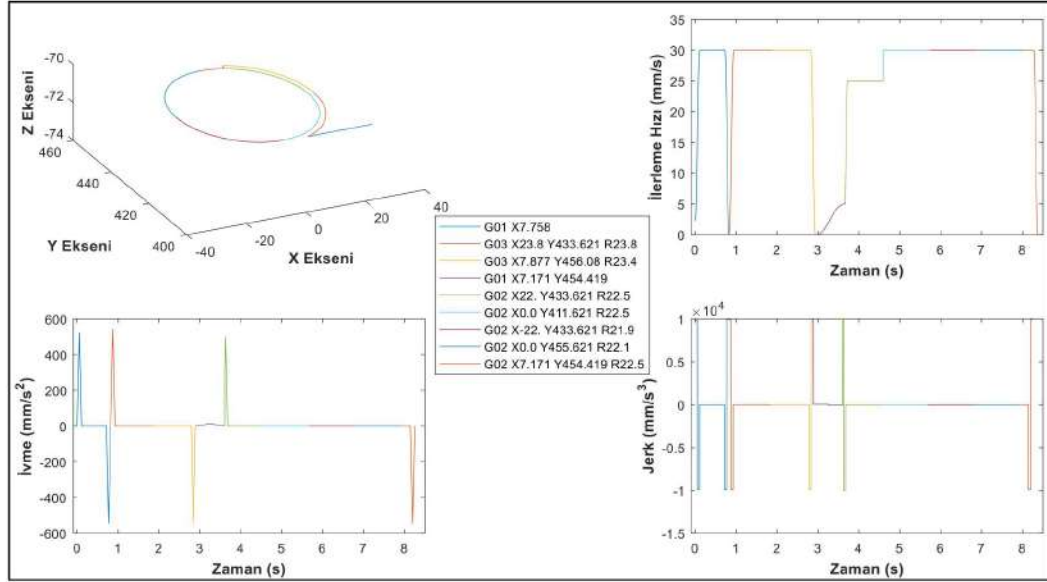
Şekil 5.59. (a) Kaba işleme program çıktısı (b) finiş işleme program çıktısı



Şekil 5.60. (a) Kütük parça (b) kaba işleme ürün çıktısı (c) finiş işleme ürün çıktısı

1,436 satırlık kaba işleme programının yaklaşık 500 satırı G02/G03 komutlarına ilişkin dairesel hareket olduğu için, Şekil 5.60-a'da yer alan program çıktısı dairesel hareketlerin temsil edildiği yeşil renk ağırlıklıdır. Şekil 5.60-b'deki finiş işlemede ise 34,624 satırın büyük çoğunluğunda eğrisel fonksiyonlar ön planda olduğu için program çıktısı kırmızı renkli görülmektedir. Kartezyen uzaydaki kesici takım

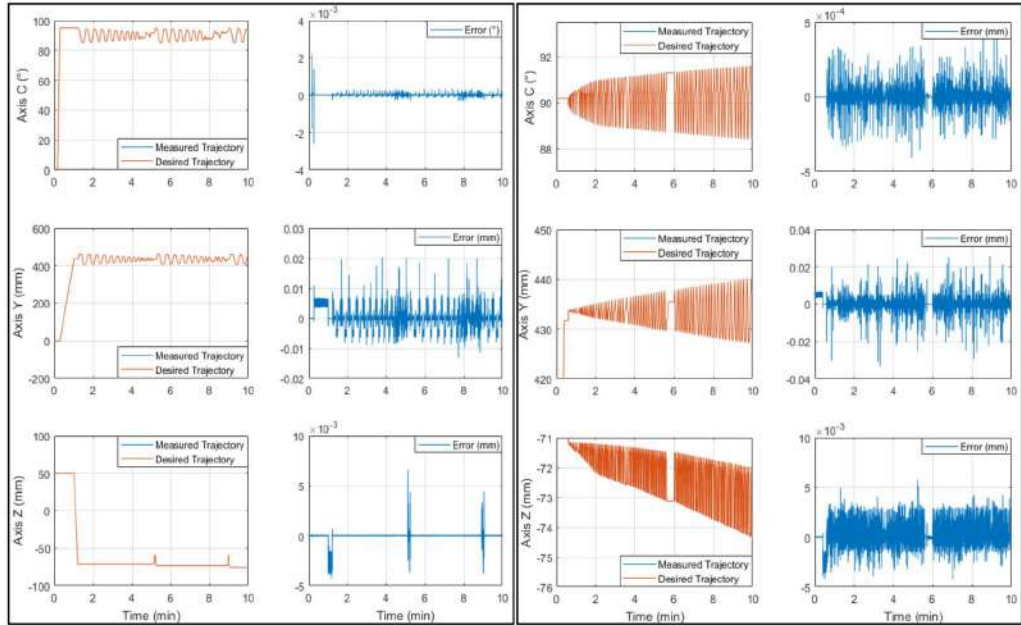
yörünge interpolasyon işlemlerinde tezgâh motorlarına uygun seçilen maksimum jerk ve ivme değerlerinin aşılmadığını ve tezgâh operasyonlarının titreşime neden olmayacak kararlı ivme ve jerk grafiklerine uygun gerçekleştiğini göstermek için kaba işleme uygulamasına ait G-kod dosyasının bir bölümünün interpolasyon işlem detayları verilmiştir. Şekil 5.61 'de, bu bölüme ait kesici takıma ait yörünge, hız, ivme ve jerk grafikleri görülmektedir. Hız grafiğinin hız geçiş kontrolüne uygun optimize edildiği, kartezyen uzaydaki kesici takım yer değiştirme eğrisinin ikinci ve üçüncü dereceden türevlerine karşılık gelen ve tezgâh titreşimlerine doğrudan etki eden ivme ve jerk grafiklerinin ne kadar düzenli olduğu ve ayrıca bu grafiklerde maksimum ivme (1000 mm/s^2) ve maksimum jerk (10.000 mm/s^3) değerlerinin aşılmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.61. Kaba işleme uygulamasına ait bir bölümünün interpolasyon işlem detayları

Doğru yörünge planlama ve interpolasyon işlemlerine ek olarak eksen yörünge takip başarısı da ürün çıktısını etkileyen bir diğer önemli etkidir. Çünkü hedeflenen ürün çıktısı için eksen motorları eksen yörüngelerini minimum hata ile takip etmelidir. Yapılan uygulamada yüzeye dik işlem gerektirecek bir yörünge bulunmadığı için, LKM tezgâhının A eksenini kullanılmamakta, geriye kalan Y, Z doğrusal eksenler ve döner C eksenini bu uygulama için yeterli olmaktadır. Bu nedenle sabit jerkli hız profilleri temelinde planlanan yörüngeler kinematik işlemler sonucunda Y, Z ve C eksen yörüngelerine dönüştürülmüştür. Kaba işleme için oluşan eksen yörüngeleri ve

bu yörüngelerin gerçek zamanlı takip sonuçları Şekil 5.62-a'da, finiş işlemedeki gerçek zamanlı yörünge takip sonuçları ise Şekil 5.62-b'de verilmiştir. Grafiklerde yaklaşık 50 dakika süren kaba işleme ve 90 dakika süren finiş işleme uyumalarının 10 dakikalık bölümlerine ilişkin yörünge takibi sonuçları verilmiştir. Uygulama sonuçlarından tüm eksenler için mikron seviyelerinde endüstriyel bir uygulama için kabul edilebilir hata değerleri olduğu grafiklerde görülmektedir. Yörünge takip sonuçlarının bu derece başarılı olması, interpolasyon işlemlerinin motorlara kapasitelerinin üstünde bir çalışma gereksinimi oluşturmayan sabit jerkli hız profillerine uygun yapılmasından kaynaklanmaktadır.



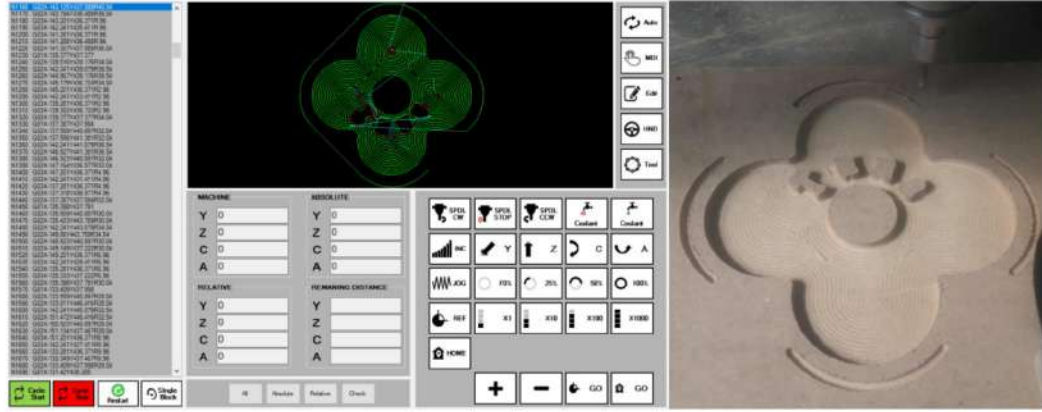
Şekil 5.62. Gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları (a) küre kaba işleme (b) küre finiş işleme

Grafiklerde görüldüğü üzere Y eksenindeki hata miktarı C ve Z eksenlerine göre bir miktar daha fazla çıkmaktadır. Bu durumun nedeni Y ekseninin karşılıklı iki motor tarafından kontrol edilmesidir. Normalde endüstriyel CNC tezgâhlarında bir eksenin karşılıklı iki motorla sürülmesi tercih edilen bir yöntem değildir. Fakat çalışmanın test işlemlerinin yürütüldüğü CNC-LKM tezgâhi özel amaçlı tasarlandığı için, ihtiyaç doğrultusunda Y ekseninde karşılıklı iki motor kullanılmıştır. Bu durumda, Y eksenini için iki farklı vidalı mil, iki farklı servo motor ve iki farklı servo sürücü kullanılması gerekmiştir. Her ne kadar aynı marka ve özellikte ürünler kullanılmış olsa dahi bu ürünlerin %100 aynı performansı göstermesi pek mümkün değildir. Bu nedenle tezgâh

yapısı gereği, kontrol işlemleri senkron olmasına rağmen, Y ekseninde diğer eksenlere göre bir miktar daha yörünge takip hatası meydana gelmiştir.

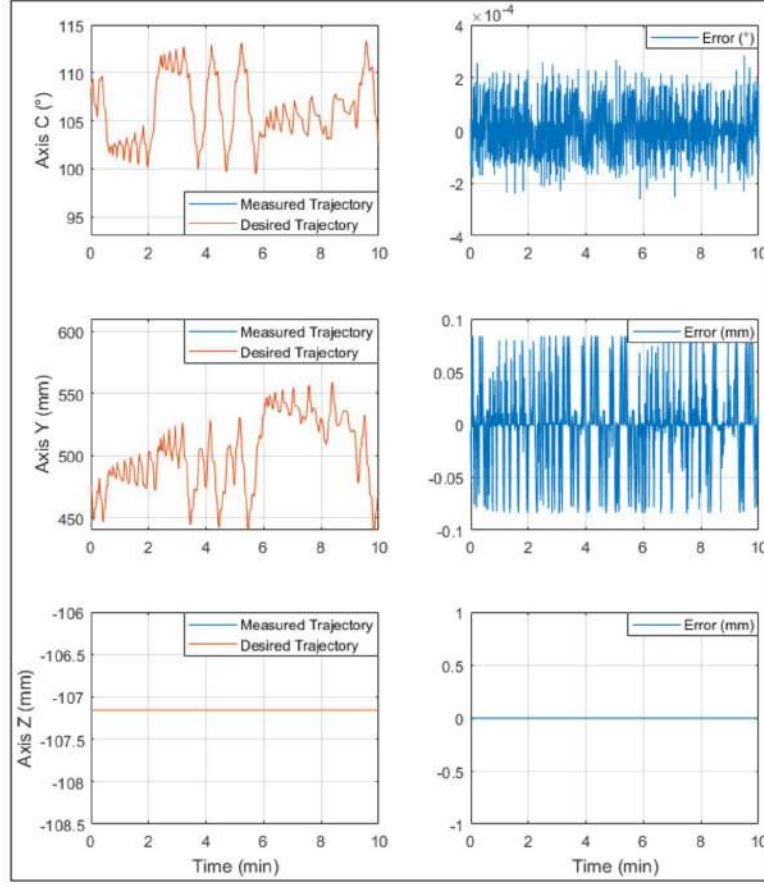
5.3.3. Dairesel cep boşaltma uygulaması

Yapılan çalışmaların performanslarını farklı bir uygulamada değerlendirmek için 800 satırlı G02/G03 komutundan oluşan toplamda 1,240 satırlık daireysel cep boşaltma işlemi yapılmıştır. Şekil 5.63-a'da kontrol ünitesi arayüzü üzerinde cep boşaltma program çıktısı, Şekil 5.63-b'de ise uygulama sonucunda elde edilen ürün çıktısı görülmektedir.



Şekil 5.63. (a) Dairesel cep boşaltma işlemi program çıktısı (b) ürün çıktısı

Bu yapıda bir ürün işlemenin sebebi, kontrol ünitesinin ardışık çalışan G02/G03 komutlarına karşı nasıl bir performans göstereceğini gözlemlemek olmuştur. Çünkü parçalı daireysel komutların herhangi birinde bir yanlış işleme veya eksen kayması olması durumunda ürün çıktısının da hatalı olması kaçınılmazdır. Fakat yapılan uygulama sonucunda, ürün çıktısının hedeflenen formda hatasız çıktığı Şekil 16 (b)'de görülmektedir. Ürün üzerinde yapılan kumpas ölçüm işlemlerinde ise, orta merkezdeki daire çapının ve karşılıklı cepler arasındaki mesafelerin CAM program çıktısı ile aynı ölçülerde olduğu tespit edilmiştir. 20 dakika süren cep boşaltma uygulamasının 10 dakikalık bölümüne ait yörünge takip sonuçları Şekil 5.64'te verilmiştir. C ve Y eksenlerine ilişkin grafik sonuçlarından yine mikron seviyelerinde hata değerleri ile başarılı bir yörünge takibi yapıldığı görülmektedir. Şekil 5.64'te yer alan Z eksen verisi 10 dakikalık süreçte sabit kaldığı için hata değeri de sıfır olarak kalmıştır.



Şekil 5.64. Dairesel cep boşaltma uygulamasına ilişkin gerçek zamanlı yörünge takibi sonuçları

Eksen yörünge takip sonuçlarının sayısal değerler üzerinden analiz edilebilmesi için, Denklem (5.1)'de yer alan ortalama karesel hata (MSE) ve ortalama karekök hata (RMSE) ölçütleri kullanılarak Tablo 5.6'da görülen hata miktarları hesaplanmıştır. Tüm uygulamalarda referans pozisyon ile gerçek pozisyon arasındaki hataların çok küçük değerlerde olduğu Tablo 5.3'te görülmektedir.

Tablo 5.3. Eksenel yörünge takibine ilişkin RMSE ve MSE hata değerleri

	Küre Kaba İşleme Uygulaması		Küre Finiş İşleme Uygulaması		Dairesel Cep Boşaltma Uygulaması	
	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
C Eksen	5.52e-05	3.05e-09	5.24e-05	2.74e-09	6.95e-05	4.82e-09
Y Eksen	0.0032	1.05e-05	0.0023	5.32e-06	0.0391	0.0015
Z Eksen	8.61 e-04	7.46e-07	0.0014	1.87e-06	0	0

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Takım tezgâhlarının çalıştırılmasının, durdurulmasının, takım değiştirilmesinin, eksen hareketlerinin ve buna benzer tezgâhın çalışması ile ilgili tüm işlemlerin bir kontrol ünitesi tarafından yönetildiği CNC tezgâhları geçmişten günümüze endüstriyel üretimin önemli bir parçası olmuşturlar. Bu nedenle endüstriyel CNC tezgâhlarının performansını ve ürün işleme kabiliyetlerini artırmaya yönelik çok sayıda akademik çalışmalar yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalar eğri uydurma (curve fitting), köşe yumuşatma, kesici takım ilerleme hız planlaması, interpolasyon algoritmaları ve farklı kinematik konfigürasyonlara sahip CNC-Freze tezgâhlarına yönelik yörünge planlama algoritmaları olmak üzere temelde beş bölümde incelenmiştir. Bu çalışmaların ortak hedefi titreşimsiz, yüksek hız ve yüksek hassasiyetli tezgâh hareketlerinin sağlanması olmuştur. Bu temel hedeflere ise doğru yörünge planlaması, doğru kinematik ve dinamik analizlerin yapılması (motor kapasitelerine uygun ivme ve jerk değerlerinin tespit edilmesi), uygun hız ve ivme profillerinin belirlenmesi (optimize edilmiş hız ve ivme profili), bu profillere uygun yörünge interpolasyonunun yapılması ve bu yörüngelerin senkronize olarak eksen motorlarına gönderilmesi işlemlerinin sonucunda ulaşılmaktadır. Bu doğrultuda yapılan tez çalışmasında, geleneksel ve güncel makine, yörünge planlama, yeni nesil servo motor kontrol teorileri kullanılarak geliştirilen özgün yöntemler, özgün yazılım çalışmaları ile birleştirilmiş, titreşimsiz, yüksek hız ve yüksek hassasiyet prensibine uygun çalışan bir CNC-Freze kontrol ünitesi geliştirilmiştir.

CNC tezgâhları G-kodlarından oluşan NC dosyalar temelinde kontrol edildiği için çalışmanın altyapısı da G-kodları üzerine kurulmuştur. Temelde G-kodları, hareket komutları, düzlem seçim komutları, hazır çevrim komutları, ilerleme seçim komutları ve kesici takım boy-çap telafi komutları olarak sınıflandırabilmektedir. Bu sınıflar arasında tezgâhın doğrudan çalışma performansına etki eden en önemli G-kodları ise hareket komutlarıdır. Bu hareket komutlarının analiz ve interpolasyon becerisi, tezgâhın doğru üretim yapmasına, titreşimsiz çalışmasına, ürün işleme hızına, enerji tüketimine, tekrarlanabilir çalışmasına ve kesici takımın ve iş milinin çalışma ömrüne

doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle çalışmanın önemli bir bölümünü oluşturan hareket komutlarına yönelik etkili yöntemler geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada, CNC G-Kod standartlarına göre, doğrusal, dairesel helisel ve NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) eğrisel hareketlerine uygun matematiksel fonksiyonlarının çıkartılarak yörünge planlama işlemleri yapılmış, NC dosyasındaki doğrusal (G01) komutlarına kenar yönetimi algoritmaları uygulanmış ve kenar yönetimi kıstaslarına giren G01 komutlarından oluşan nokta bulutlarının daha hassas yörüngelere dönüştürülmesinde kullanılmak üzere NURBS eğri uydurma fonksiyonları çıkartılmış, tezgâhın titreşimsiz ve hassas çalışmasını sağlayan sabit jerkli hız ve ivme profilleri oluşturulmuş, eğrisel yörüngelerin veri kaybı olmadan hassas ve aynı zamanda yüksek hızda işlenmesi için özel kritik nokta analizleri yapılarak kritik noktalarda olması gereken hız değerleri tespit edilmiş ve oluşturulan hız ve ivme profillerine uygun tüm hareket komutları için ayrı ayrı interpolasyon işlemleri yapılmış, komut satırları arasındaki hareket geçişleri için hız optimizasyon algoritmaları geliştirilmiş ve kinematik işlemlerinin gerektiği durumlarda, ters kinematik dönüşümlerle eksen motorlarına gönderilecek yörüngeler elde edilmiştir. Bu doğrultuda, geliştirilen CNC kontrol ünitesinin bu alanda yapılan akademik çalışmalarla karşılaştırıldığında, bir CNC tezgâhının tüm üretim sürecini endüstriyel yaklaşımlarla ele alan en kapsamlı çalışma olduğu düşünülmektedir. Ayrıca tez çalışmasında literatüre katkı sağlayacak yöntem ve algoritmaların bulunması da yapılan çalışmanın yenilikçi bir yaklaşımla yapıldığının göstergesi olmuştur.

CNC tezgâhları her zaman bir operatör tarafından kontrol edildiği için, neredeyse tüm tezgâhlarda kontrol ünitesine bağlı çalışan bir operatör paneli bulunmaktadır. Bu operatör panelinde ise dokunmatik veya normal bir ekran, kontrol butonları, tuş takımı, acil stop butonu, el kumandası vb. operatörün kullanımına sunulan birimler bulunmaktadır. Yapılan tez çalışmasında endüstriyel CNC kontrol ünitesinin geliştirilmesi hedeflendiği için, Beckhoff UltraCompact (PC C6030) endüstriyel bir bilgisayar, 19" dokunmatik bir ekran, kontrol tuşları ve el kumandası ile endüstriyel bir operatör panel donanımı tasarımı yapılmıştır. Donanım tasarımından sonra ise bir operatör tarafından tezgâhın tüm kontrol işlemlerinin yürütülebilmesi için operatör panel arayüzü geliştirilmiştir. Visual Studio ortamında C# dili ile geliştirilen kullanıcı arayüzünde, çalışma içerisinde geliştirilen matematiksel yöntemler ve algoritmalar

yazılım diline çevrilmiş hem de makine sıfırı, parça sıfırı, eksen tanımlama, parametre girme gibi tezgâh ayarlarının ve program yazma-değiştirme, spindle aç-kapat gibi tezgâh operatörünün manuel kullanımına yönelik yazılım altyapısı oluşturulmuştur. Ayrıca yapılan çalışmada, fiziksel sistemlerle EtherCat protokolü üzerinden haberleşmek için TwinCat yazılımı yapılmıştır. Tezgâhın tüm kontrolünü C# ortamında geliştirilen operatör panel yazılımı sağlarken, tezgâha gitmesi gereken veya tezgâhtan alınan veriler TwinCat ortamında toplanmaktadır. Operatör panel yazılımı ile TwinCat yazılımı arasında ADS haberleşme protokolü, TwinCat ile fiziksel sistem arasında da EtherCat protokolünü kullanan, senkronize çalışan iki yazılım sistemi oluşturulmuştur. Fakat EtherCat protokolünün 1ms sabit veri yenileme süresi ile, TCP-IP tabanlı ADS protokolünün ise veri boyutlarına göre değişen veri gönderim zamanı ile çalışmasından dolayı fiziksel sisteme gönderilen verinin tek bir tanesinde bile gecikme olmaması için ikili ping-pong buffer mekanizması geliştirilmiş ve ADS-EtherCat arasında oluşan zaman farkının etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Tüm yazılım süreci sonlandıktan sonra endüstriyel uygulamalar yapılarak geliştirilen kontrol ünitesinin performans analizleri yapılmıştır. Geliştirilen kontrol ünitesi ile doğrudan endüstriyel bir CNC-Freze tezgâhı üzerinde deneysel çalışmalara başlanması güvenlik amacıyla riskli olduğu için kademeli deneysel çalışma yöntemi uygulanmıştır. Öncelikle EtherCat protokolü üzerinden endüstriyel AC servo motorun kontrol performanslarını analiz etmek için tek motorlu bir motor test düzeneği tasarımı yapılmış ve kontrol uygulamaları yapılmıştır. Sonrasında yine EtherCat protokolünün çoklu eksen senkronizasyon testlerinin yapılması için tek motorlu test düzeneği üç motorlu test düzeneğine dönüştürülerek yörünge takibi ve senkronizasyon testleri yapılmıştır. Bu uygulamalarda hem EtherCat protokolü hem de CNC kontrol ünitesi yazılımı doğrulanmış ve sonrasında endüstriyel CNC-Freze tezgâhı üzerinde çalışma adımına geçilmiştir. Endüstriyel 3-Eksen CNC tezgâhında gerçek bir ürün işleme süreci ele alınarak kontrol ünitesinin endüstriyel yeterliliğinin ölçülmesi sağlanmıştır. Altı farklı işleme kalemi ile işlenen ürün için toplamda 57,903 satır NC kod kullanılmış ve 118.8 dakikalık tezgâh çalışma süresi ortaya çıkmıştır. 1ms gerçek zamanlı eksen veri yenileme hızı ile çalışıldığı için 118.8 dakikalık çalışma sürecinde her bir eksen motoruna 7,128,000 veri gönderilmiştir. Ayrıca ürün çıktısının ölçüm işlemleri Taksan (Dener Makina) kontrol birimi tarafından yapılmış ve işlenen ürün özelinde verilen

tolerans değerlerinin altında doğrulukla ürünün işlendiği rapor sonuçlarında görülmüştür. Son olarak kontrol ünitesinin farklı eksen konfigürasyonlarına sahip bir CNC-Freze tezgâhı üzerinde çalışma performansını görmek için lastik kalıbı işleme özelinde tasarlanmış CNC-LKM tezgâhında uygulamalar yapılmıştır. Fakat CNC-LKM tezgâhı 4-Eksen (Y-Z-C-A) NC kod dosyası ile çalıştığı için yörünge planlaması öncesinde ve sonrasında kinematik dönüşüm işlemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Geliştirilen CNC kontrol ünitesi yazılım yapısının esnek olması dolayısıyla gerekli kinematik işlemler yazılıma tanımlanarak bu çalışmada önerilen yöntemlerin CNC-LKM tezgâhında da aynı performansta kullanılması sağlanmıştır. CNC-LKM tezgâhında kütük parçanın küresel form olarak işlenmesinde kaba işleme için 1,436, finiş işleme için ise 34,624 satırlık NC dosyası, dairesel cep boşaltma uygulamasında ise 1,240 satırlık NC dosyası kullanılmıştır. Ayrıca kaba işlemede yaklaşık 3.000.000, finiş işlemede 5.400.000 ve cep boşaltma işleminde ise 1.200.000 eksen verisi (her eksen için ayrı) üretilmiş ve sırasıyla 50, 90 ve 20 dakika süren uygulama zamanları ortaya çıkmıştır.

Yüksek eksen verileri üzerinden yörünge takip grafiklerinin değerlendirmesinin zor olması nedeniyle tüm uygulamaların yörünge takip sonuçları 10 dakikalık verilerle sınırlandırılmıştır. Uygulamalarda eksen yörünge takip sonuçları RMSE ve MSE ölçütleri ile değerlendirilmiş ve mikron seviyelerinde hatalar ile yörüngelerin takip edildiği görülmüştür. Ayrıca ürün çıktılarında yapılan ölçümler de ürün işlemlerinin hatasız gerçekleştiğini göstermiştir.

Bunlara ek olarak, uygulamalar sırasında Omron, Bosch-Rexroth ve Kollmorgen olmak üzere üç farklı marka motor ve sürücülerle çalışılmış ve hepsinde de başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu durum, yörünge planlama ve interpolasyon işlemlerinin doğruluğunu ve EtherCat protokolünün etkinliğini ortaya koyan bir diğer önemli unsur olmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Gavas M., *CNC Tekniği ve Teknolojisi*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2019.
- [2] Calleja A., Bo P., Barto M., Norberto L., Highly Accurate 5-Axis Flank CNC Machining with Conical Tools, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, **97**, 1605-1615.
- [3] Wan M., Xing W., Liu Y., Xiao Q., A New Error-Controllable Method for Smoothing the G01 Commands, *Chinese J. Aeronaut.*, 2019, **32**(7), 1756–1771.
- [4] Erkorkmaz K., Altintas Y., High Speed CNC System Design . Part I: Jerk Limited Trajectory Generation and Quintic Spline Interpolation, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, DOI:10.1016/S0890-6955(01)00002-5.
- [5] Yau H., Wang J., Fast Bezier Interpolator with Real-Time Lookahead Function for High-Accuracy Machining, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2007, **47**(10), 1518–1529.
- [6] Fan W., Lee C., Chen J., A Realtime Curvature-Smooth Interpolation Scheme And Motion Planning For CNC Machining Of Short Line Segments, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2016, **96**, 27–46.
- [7] Bharathi A., Dong J., Feedrate Optimization for Smooth Minimum-Time Trajectory Generation with Higher Order Constraints, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016, **82**(5), 1029–1040.
- [8] Zhang M., Yan W., Yuan C., Wang D., Gao X., Curve Fitting and Optimal Interpolation on CNC Machines Based on Quadratic B-Splines, *Sci. China Inf. Sci.*, 2011, **54**(1), 1407-1418.
- [9] Tulsyan S., Altintas Y., Local Toolpath Smoothing for Five-Axis Machine Tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2015, **96**, 15–26.
- [10] Lin F., Shen L., Yuan C., Mi Z., Certified Space Curve Fitting And Trajectory Planning for CNC Machining with Cubic B-Splines, *Comput. Aided Des.*, 2019, **106**, 13–29.
- [11] Wang J., Yau H., Real-Time NURBS Interpolator : Application to Short Linear Segments, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, **41**, 1169–1185, 2009.
- [12] Beudaert X., Lavernhe S., Tournier C., Feedrate Interpolation with Axis Jerk Constraints on 5-Axis NURBS and G1 Tool Path, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2012, **57**, 73-82.

- [13] Yan Y, Zhang L., Zhang K., Corner Smoothing Transition Algorithm for Five-Axis Linear Tool Path, *Procedia CIRP*, 2016, **56**, 604–609.
- [14] Tajima S., Sencer B., Kinematic Corner Smoothing for High Speed Machine Tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2016, **108**, 27–43.
- [15] Tajima S., Sencer B., Global Tool-Path Smoothing For CNC Machine Tools With Uninterrupted Acceleration, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2017, **121**, 81–95.
- [16] Han J., Jiang Y., Tian X., Chen F., Lu C., Xia L., A Local Smoothing Interpolation Method for Short Line Segments to Realize Continuous Motion of Tool Axis Acceleration, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, **95**, 1729–1742.
- [17] Zhang Y., Zhao M., Ye P., Jiang J., Zhang H., Optimal Curvature-Smooth Transition and Efficient Feedrate Optimization Method with Axis Kinematic Limitations for Linear Toolpath, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, **99**, 169–179.
- [18] Tajima S., Sencer B., Accurate Real-Time Interpolation of 5-Axis Tool-Paths with Local Corner Smoothing, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2019, **142**, 1-15.
- [19] Huang X., Zhao F., Tao T., Mei X., A Newly Developed Corner Smoothing Methodology Based on Clothoid Splines for High Speed Machine Tools, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2021, **70**(4), 102106.
- [20] Li B., Zhang H., Ye P., Error Constraint Optimization for Corner Smoothing Algorithms in High-Speed CNC Machine Tools, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, **99**, 635–646.
- [21] Huang J., Du X., Zhu L., Real-Time Local Smoothing for Five-Axis Linear Toolpath Considering Smoothing Error Constraints, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2017, **124**, 67–79.
- [22] Liu J., Fu H., Qin J., Jin H., Sliding Look-Ahead Window-Based Real-Time Feedrate Planning for Non-Uniform Rational B-Splines Curves, *Adv. Mech. Eng.*, 2018, **10**(12), 1–19.
- [23] Shahzadeh A., Khosravi A., Robinette T., Nahavandi S., Smooth Path Planning using Biclothoid Fillets for High Speed CNC Machines, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2018, **132**, 36–49.
- [24] Zhang L., Du J., Acceleration Smoothing Algorithm Based on Jounce Limited for Corner Motion in High-Speed Machining, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, **95**(6), 1487–1504.
- [25] Wang W., Hu C., Zhou K., He S., (B.6)Corner Trajectory Smoothing with Asymmetrical Transition Profile for CNC Machine Tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2019, **144**, 103423.

- [26] Yang J., Yuen A., An Analytical Local Corner Smoothing Algorithm for Five-Axis CNC Machining, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2017, **123**, 22-35.
- [27] Ren K., Xu K., Chen W., Pan J., Yao B., Sharp Corner Transitional Trajectory Planning Based on Arc Splines in Glass Edge Grinding, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, **93**(9), 4089–4098.
- [28] Wu K., Krewet C., Kuhlenkötter B., Dynamic Performance of Industrial Robot in Corner Path with CNC Controller, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2018, **54**, 156–161.
- [29] Fleisig R. V., Spence A. D., A Constant Feed and Reduced Angular Acceleration Interpolation Algorithm for Multi-Axis Machining, *Comput. Aided Des.*, 2001, **33**, 1-15.
- [30] Sun Y., Zhou J., Guo D., Variable Feedrate Interpolation of NURBS Toolpath with Geometric and Kinematical Constraints for Five-Axis, *J. Syst. Sci. Complex.*, 2013, **26**, 757–776.
- [31] Du X., Huang J., Zhu L., A Complete S-Shape Feed Rate Scheduling Approach for NURBS Interpolator, *J. Comput. Des. Eng.*, 2015, **2**(4), 206–217.
- [32] Jahanpour J., Motallebi M., A Novel Trajectory Planning Scheme for Parallel Machining Robots Enhanced with NURBS Curves, *J. Intell. Robot. Syst.*, 2016, **82**(2), 257–275.
- [33] Ren K., Xu K., Chen W., Nurbs Toolpath Planning for Glass Sharp Corner Edge Grinding, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, **97**, 2997–3007.
- [34] Su Z., Zhou H., Hu P., Fan W., Three-Axis CNC Machining Feedrate Scheduling Based on the Feedrate Restricted Interval Identification with Sliding Arc Tube, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, **99**, 1047–1058.
- [35] Quang N. H., Long B. T., A Method of Real-Time NURBS Interpolation with Confined Chord Error for CNC Systems, *Vietnam J Sci Technol.*, 2017, **55**(5), 650–657.
- [36] Zhiming X., Jincheng C., Zhengjin F., Performance Evaluation of a Real-Time Interpolation Algorithm for NURBS Curves, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2002, **20**, 270–276.
- [37] Cheng C. W., Tsai M. C., Real-Time Variable Feed Rate NURBS Curve Interpolator for CNC Machining, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2004, **23**, 865–873.
- [38] Lin M., Tsai M., Yau H., Development of a Dynamics-Based NURBS Interpolator with Real-Time Look-Ahead Algorithm, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2007, **47**(15), 246–2262.
- [39] Lei W., Sung M., Lin L., Huang J. J., Fast Real-Time NURBS Path Interpolation for CNC Machine Tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2007, **47**, 1530–1541.

- [40] Lai J., Lin K., Tseng S., Ueng W., On The Development of a Parametric Interpolator with Confined Chord Error , Feedrate , Acceleration and Jerk, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2008, **37**(1), 104–121.
- [41] Sencer B., Altintas Y., Croft E., Feed Optimization for Five-Axis CNC Machine Tools with Drive Constraints, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2008, **48**(7-8), 733–745.
- [42] Heng M., Erkorkmaz K., Design of a NURBS Interpolator with Minimal Feed Fluctuation And Continuous Feed Modulation Capability, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2010, **50**(3), 281–293.
- [43] Hui J., Wei F., Gao K., Study on the Algorithm for Real-Time Interpolation of NURBS Curve and Simulation, *Telkommika*, 2013, **11**(5), 2516–2525.
- [44] Yeh S., Hsu P., Adaptive-Feedrate Interpolation for Parametric Curves with a Constrained Chord Error, *Comput. Aided Des.*, 2002, **34**, 229–237.
- [45] Liu X., Ahmad F., Yamazaki K., Mori M., Adaptive Interpolation Scheme for NURBS Curves with the Integration of Machining Dynamics, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2005, **45**, 433–444.
- [46] Xu R., Xie L., Li C., Du D., Adaptive Parametric Interpolation Scheme with Limited Acceleration and Jerk Values for NC Machining, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2008, **36**(3-4), 343–354.
- [47] Tsai M., Nien H., Yau H., Development of an Integrated Look-Ahead Dynamics-Based NURBS Interpolator for High Precision Machinery, *Comput. Aided Des.*, 2008, **40**(5), 554–566.
- [48] Giannelli C., Mugnaini D., Sestini A., C2 Continuous Time-Dependent Feedrate Scheduling with Configurable Kinematic Constraints, *Comput. Aided Geom. Des.*, 2018, **63**, 78–95.
- [49] Lee A., Lin M., Pan Y., Lin W., The Feedrate Scheduling of NURBS Interpolator for CNC Machine Tools, *Comput. Aided Des.*, 2011, **43**(6), 612–628.
- [50] Bohez E. L. J., Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2002, **42**(4), 505–520.
- [51] Marie J., Duc E., Lartigue C., Bourdet P., A New Format For 5-Axis Tool Path Computation, using Bspline Curves, *Comput. Aided Des.*, 2004, **36**(12), 1219–1229.
- [52] Son S., Kim T., Sarma S. E., Slocum A., A Hybrid 5-Axis CNC Milling Machine, *Precis. Eng.*, 2009, **33**(4), 430–446.
- [53] Mayer R., Yang J., Altintas Y., A Position Independent Geometric Errors Identification and Correction Method for Five – Axis Serial Machines based on Screw Theory, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2015, **95**, 52–66.

- [54] Lasemi A., Xue D., Gu P., Accurate identification and compensation of geometric errors of 5-axis CNC machine tools using double ball bar, *Meas. Sci. Technol.*, 2016, **27**, 055004.
- [55] Ding S., Huang X., Yu C., Wang W., Actual Inverse Kinematics for Position-Independent and Position-Dependent Geometric Error Compensation of Five-Axis Machine Tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2016, **111**, 55–62.
- [56] Petko M., Gac K., Góra G., Karpziel G., Ocho J., Kobus K., CNC System of the 5-Axis Hybrid Robot for Milling, *Mechatronics*, 2016, **37**, 89–99.
- [57] Li X., Zhao H., Zhao X., Ding H., Dual Sliding Mode Contouring Control with High Accuracy Contour Error Estimation for Five-axis CNC Machine Tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2016, **108**, 74–82.
- [58] Petko M., Karpziel G., Gac K., Góra G., Kobus K., Trajectory Tracking Controller of the Hybrid Robot for Milling, *Mechatronics*, 2016, **37**, 100–111.
- [59] Yongzhang W., Yuan L., Zhenyu H., Zhongxi S., Integration Of A 5-Axis Spline Interpolation Controller in an Open CNC System, *Chinese J. Aeronaut.*, 2009, **22**, 218–224.
- [60] Shean R., Lin Y. H., Development of Universal Environment for Constructing 5-Axis Virtual Machine Tool Based on Modified D – H Notation and Opengl,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2010, **26**(3), 253–262.
- [61] Altintas Y., Sencer B., High Speed Contouring Control Strategy for Five-Axis Machine Tools, *CIRP Ann.*, 2010, **59**(1), 417–420.
- [62] Kvrjic V., Dimic Z., Ilic D., A Control Algorithm for a Vertical Five-Axis Turning Centre, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, **61**(5-8), 569-584.
- [63] Yuan L. I. U., Hui L. I., Yongzhang W., Realization of a 5-Axis NURBS Interpolation with Controlled Angular Velocity, *Chinese J. Aeronaut.*, 2012, **25**(1), 124–130.
- [64] Feng W., Hu L., Liaomo Z., Design and Implementation of Five-Axis Transformation Function in CNC System, *Chinese J. Aeronaut.*, 2014, **27**(2), 425–437.
- [65] Yang J., Altintas Y., Generalized Kinematics of Five-Axis Serial Machines with Non-Singular Tool Path Generation, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2013, **75**(12), 119–132.
- [66] Yang J., Altintas Y., A Generalized On-Line Estimation and Control of Five-Axis Contouring Errors of CNC Machine Tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2014, **88**(9), 9–23.
- [67] Sencer B., Altintas Y., Modeling and Control of Contouring Errors for Five-Axis Machine Tools-Part II: Precision Contour Controller Design, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2009, **131**(3), 1–10.

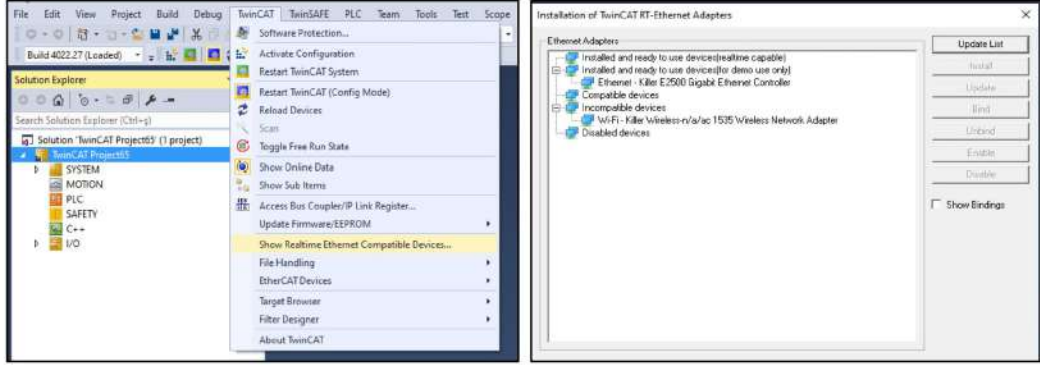
- [68] Huang J., Lu Y., Zhu L., Real-Time Feedrate Scheduling for Five-Axis Machining by Simultaneously Planning Linear and Angular Trajectories, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2018, **135**, 78–96.
- [69] Balta C., Tersine Mühendislik Uygulamalarında Nokta Bulutu Verilerinden Örme Yüzey Ve Parametrik Yüzey Denklemlerinin Elde Edilmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 461896.
- [70] Magalhaes P., Magalhaes C. A., New Formulas of Numerical Quadrature Using Spline Interpolation, *Arch. Comput. Methods Eng.*, 2020, **28**, 553-576.
- [71] Dung V. T., Tjahjowidodo T., A Direct Method to Solve Optimal Knots of B-Spline Curves : An Application for Non-Uniform B-Spline Curves Fitting, *Plos One*, 2017, **12**(3), 1–24.
- [72] Yang Z., Shen L., Yuan C., Gao X., Curve Fitting and Optimal Interpolation for CNC Machining Under Confined Error Using Quadratic B-Splines, *Comput. Aided Des.*, 2015, **66**, 62–72.
- [73] Yang J., Ding H., Zhao H., Yan S., A Generalized Online Estimation Algorithm of Multi-Axis Contouring Errors for CNC Machine Tools with Rotary Axes, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016, **84**(5–8), 1239–1251.
- [74] Du X., Huang J., Zhu L.M., A Locally Optimal Transition Method with Analytical Calculation of Transition Length for Computer Numerical Control Machining of Short Line Segments, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 2018, **232**(13), 2409–2419.
- [75] Liu Y., Wan M., Xing W.J., Zhang W.H., Identification of Position Independent Geometric Errors of Rotary Axes for Five-Axis Machine Tools with Structural Restrictions, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2018, **53**, 45–57.
- [76] Hu Q., Chen Y., Jin X., Yang J., A Real-Time C3 Continuous Local Corner Smoothing and Interpolation Algorithm for CNC Machine Tools, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2019, **141**(4), 041004.
- [77] Wu K., Krewet C., Kuhlenkötter B., Dynamic Performance of Industrial Robot in Corner Path with CNC Controller, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2018, **54**, 156–161,
- [78] Sun Y., Zhao Y., Xu J., Guo D., The Feedrate Scheduling of Parametric Interpolator with Geometry, Process and Drive Constraints for Multi-Axis CNC Machine Tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2014, **85**, 49–57.
- [79] Chen M., Zhao W.S., Xi X.C., Augmented Taylor's Expansion Method for B-Spline Curve Interpolation for CNC Machine Tools, *Int. J. Mach. Tool Manuf.*, 2015, **94**, 109–119.
- [80] Ernesto C.A., Farouki R.T., High-Speed Cornering by CNC Machines Under Prescribed Bounds On Axis Accelerations and Toolpath Contour Error, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, **58**(1–4), 327–338.

- [81] Tsai M.S., Huang Y.C., A Novel Integrated Dynamic Acceleration/Deceleration Interpolation Algorithm for A CNC Controller, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016, **87**(1–4), 279–292.
- [82] Zhao H., Zhu L., Ding H., A Parametric Interpolator with Minimal Feed Fluctuation for CNC Machine Tools Using Arc-Length Compensation and Feedback Correction, *Int. J. Mach. Tool Manuf.*, 2013, **75**, 1–8.
- [83] Shi J., Bi Q., Zhu L., Wang Y., Corner Rounding of Linear Five-Axis Tool Path by Dual PH Curves Blending. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, **88**, 223–236.
- [84] Fan W., Lee C.H., Chen J.H., Real-Time Repairable Interpolation Scheme for CNC Tool Path Processing, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2016, **17**(12), 1673–1684.
- [85] Wang Y., Liu H., Yu S., Curvature-Based Real-Time NURBS Surface Interpolator with Look-Ahead ACC/DEC Control, *Math. Comput. Sci.*, 2012, **6**(3), 315–326.
- [86] Yuan C., Zhang K., Fan W., Time-Optimal Interpolation for CNC Machining Along Curved Tool Pathes with Confined Chord Error, *J. Syst. Sci. Complex*, 2013, **26**(5), 836–870.
- [87] Timar S.D., Farouki R.T., Smith T.S., Boyadjieff C.L., Algorithms for Time-Optimal Control of CNC Machines Along Curved Tool Paths, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2005, **21**(1), 37–53.
- [88] Jin Y.Q., Bi Q.Z., Wang Y.H., Dual-Bezier Path Smoothing and Interpolation for Five-Axis Linear Tool Path in Workpiece Coordinate System, *Adv. Mech. Eng.*, 2015, **7**(7), 1–14.
- [89] Liu Y., Wan M., Xing W.J., Zhang W.H., Identification of Position Independent Geometric Errors of Rotary Axes for Five-Axis Machine Tools with Structural Restrictions, *Robot. Com. Int. Manuf.*, 2018, **53**, 45–57.
- [90] Wan M., Liu Y., Xing W.J., Zhang W.H., Singularity Avoidance for Five-Axis Machine Tools Through Introducing Geometrical Constraints, *Int. J. Mach. Tool Manuf.*, 2018, **127**, 1–13.
- [91] Zhang K., Guo J.X., Gao X.S., Cubic Spline Trajectory Generation with Axis Jerk and Tracking Error Constraints, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 2013, **14**(7), 1141–1146.
- [92] Jin Y.A., He Y., Fu J.Z., Lin Z.W., Gan W.F., A Fine-Interpolation-Based Parametric Interpolation Method with A Novel Real-Time Look-Ahead Algorithm, *Comput. Aided Des.*, 2014, **55**, 37–48.
- [93] Kuncan M., Kaplan K., Ertunc H. M., Küçükates S., Design , production and novel NC tool path generation of CNC tire mold processing machine, *J. Faculty Eng. Archit. Gazi*, 2018, **3**, 1183–1200.

EKLER

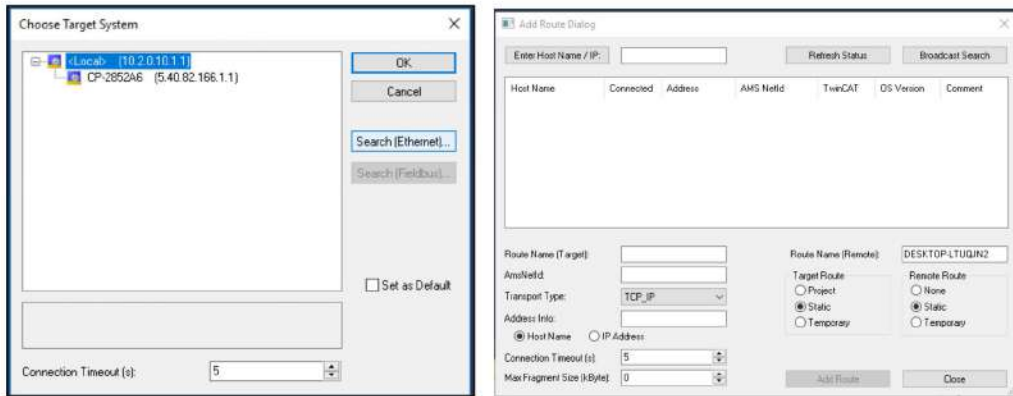
Ek-A

Program içerisinde TwinCat sekmesi altında bulunan ‘Show Realtime Ethernet Compatible Devices’ bölümünde bilgisayardaki ethernet kartının durumu Şekil A.1’de gösterildiği gibi sorgulanmaktadır. Uyumlu cihazlar (Compatible devices) altında bir ethernet kart modeli bulunması durumunda, ethernet kartının gerçek zamanlı kullanılması için kurulum işleminin yapılması yeterli olmaktadır.



Şekil A.1. Ethernet kartı uyumluluk sorgulama işlemi

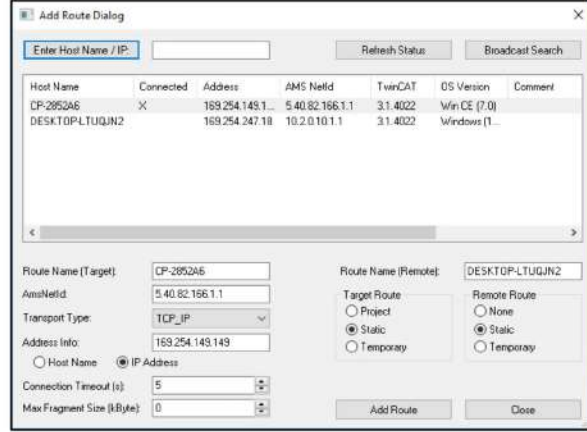
Eğer TwinCat yazılımının geliştirileceği bilgisayarda (tasarım bilgisayarı) uyumlu ethernet kartı yoksa bu bilgisayarın kullanılamayacağı anlamı çıkmamaktadır. Tasarım bilgisayarı, geliştirilen TwinCat yazılımını başka bir bilgisayarı hedef göstererek gerçek zamanlı çalıştırabilmektedir. Bu tür uygulamalarda bir tasarım bilgisayarı bir de hedef bilgisayar (Endüstriyel PC) kullanılması gereklidir. TwinCat yazılımın doğrudan hedef bilgisayarda geliştirilmemesinin sebebi ise, yazılım geliştirme sürecinin daha yüksek işlemci, RAM ve depolama alanı bulunan bilgisayarda yönetilmesidir. Çünkü gerçek zamanlı çalışacak endüstriyel bilgisayarın donanım özellikleri normal bir bilgisayardan aşağıda olmasına rağmen yapıları gereği gerçek zamanlı uygulamalarda normal bir bilgisayardan daha yüksek performans gösterirler.



Şekil A.2. Hedef cihaz arama işlemi

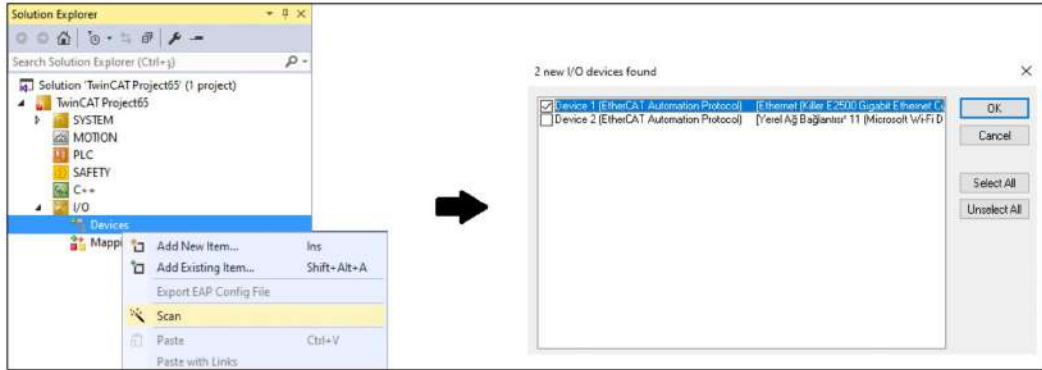
Herhangi bir hedef bilgisayara bağlanabilmek için öncelikle Şekil A.2-a’da görülen ‘Choose Target’ bölümüne gidilmesi gerekir. Sonrasında ise ‘Search Ethernet’ butonu ile Şekil A.2-b’de yer alan diğer menüye geçilir. Hedef bilgisayarın bulunmasına

başlamak için 'Broadcast Search' butonuna basılmaktadır. TwinCat bilgisayara bağlı olan hedef bilgisayarı otomatik olarak bulmak için aramaya başlar. Bulunan cihaz seçilip 'Add Route' butonuna basıldıktan sonra gelen 'Login' bilgi ekranında şifre kısmı boş bırakılarak cihaza bağlanılır. Cihazın yanında bulunan Şekil A.3'te görülen 'X' işareti cihaza bağlantının başarılı olduğunu göstermektedir.



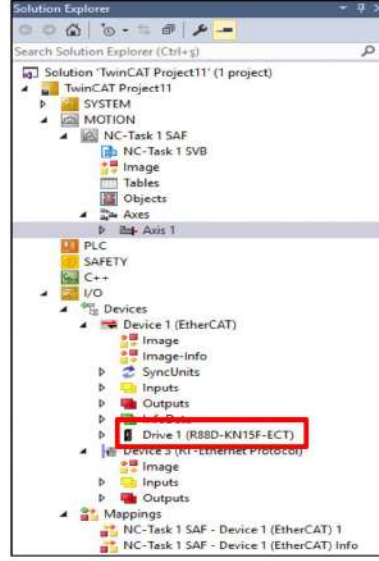
Şekil A.3. Cihaz bağlantısının sağlanması

Cihaz seçiminden sonra donanım değişikliğini taramak gerekir. Gerçek zamanlı kontrol birimine bağlı terminal ve cihazları bulabilmek için Şekil A.4'te görülen 'Scan Device' seçeneğini seçilir ve EtherCat hattında bulunan tüm Slave cihazlar aranmaya başlar.



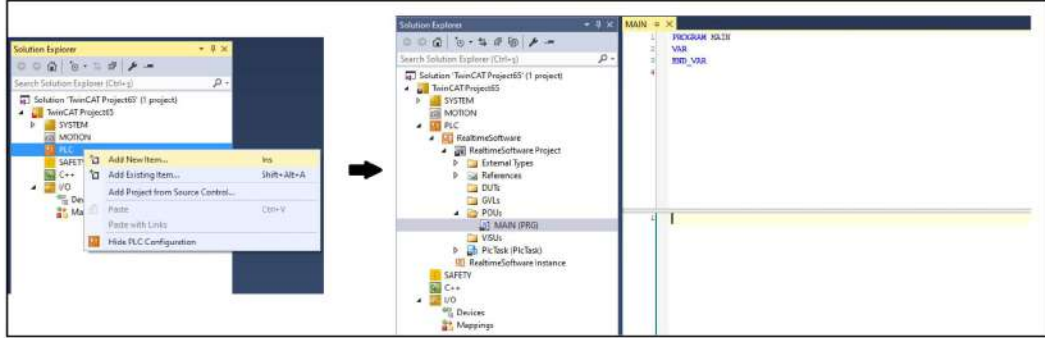
Şekil A.4. EtherCat hattına bağlı cihazların aranması

EtherCat hattında, EtherCat Slave özellikli cihazların bulunması durumunda tüm cihaz bilgileri TwinCat ortamına aktarılmaktadır. Şekil A.5'te hat taraması sonucunda TwinCat ortamına aktarılan cihaz bilgileri örnek olarak gösterilmiştir. Gerçek zamanlı uygulama için uyumlu bir ethernet kartının (Device 1) bulunduğu EtherCat hattına bağlı R88D-KN15F-ECT model EtherCat slave özellikli bir servo sürücünün bilgileri ilgili cihaz menüsü altında görülmektedir.



Şekil A.5. EtherCat hattında bulunan cihazların listelenmesi

Hattaki tüm Slave cihazlarla haberleşme kurulduktan sonra TwinCat ortamında yazılım çalışmalarına başlanmaktadır. Bir yazılım projesi oluşturmak için PLC programı oluşturmak gereklidir. Şekil A.6’da bir PLC projesinin nasıl oluşturulduğu gösterilmiştir. PLC yazılım çalışmaları ‘Program Organization Units (POUs)’ altında yürütülmektedir. Şekil A.6’da yer alan ‘MAIN’ sayfası yazılımın ana kontrol birimini oluşturmaktadır.



Şekil A.6. TwinCat PLC yazılımı

Ek-B



CNC DİK İŞLEM TEST PARÇASI RAPORU

MAKINA ADI; TMC 1200

KONTROL EDEN ; Burhan Soner ER

Maksimum olması gereken değer	Parça üzerinde tespit edilen değer	Sonuç	Açıklama
Dairesellik (Ø150mm) : 0.030	0.020	Ok	
Kare ölçüm farkı 160mm: 0.025	0.020	Ok	
Kare ölçüm farkı 180mm: 0.025	0.020	Ok	
Düzlemsellik (X Y): 0.015	0.010	Ok	



AÇIKLAMA;

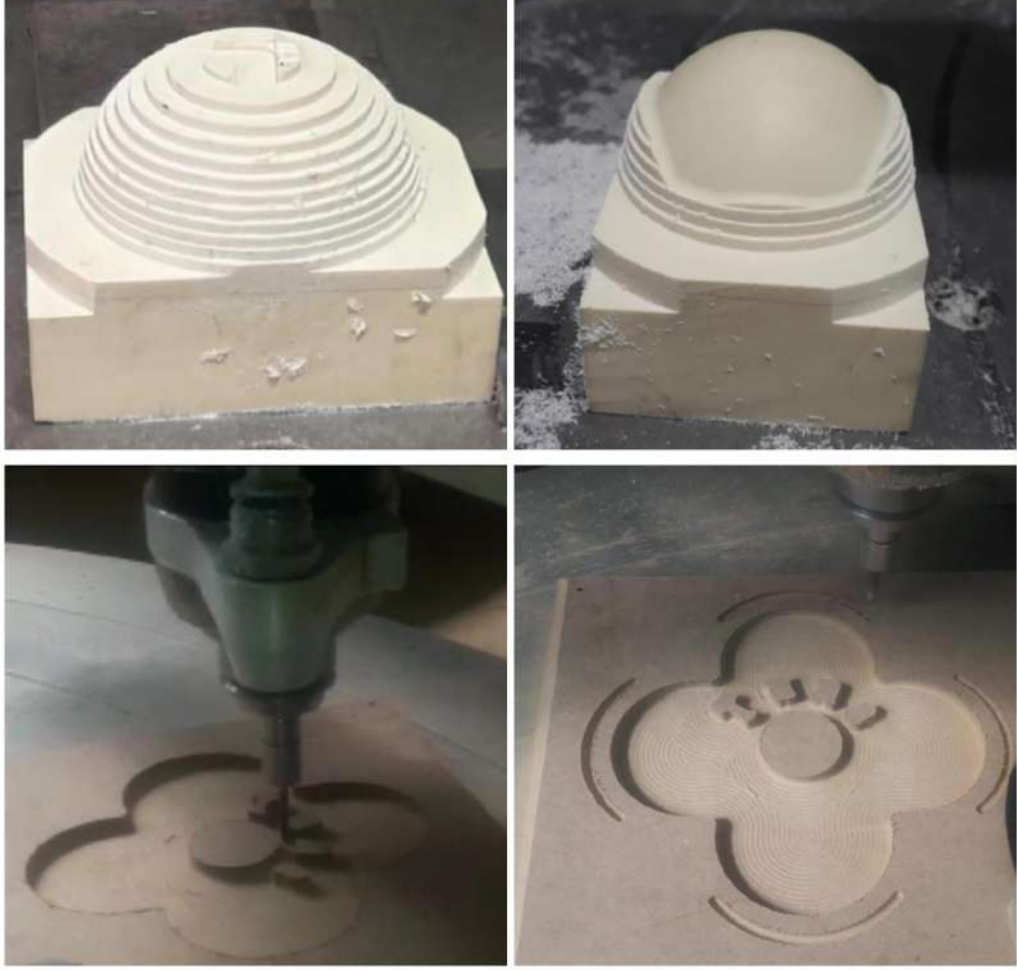
ST44 Çelik malzemeden işlenen test parçasında Ø150.00 mm daire ve 180.00mm-160.00mm ölçülerinde kare işlenmiştir. Parçasının ölçümlerinde ve geometrik kontrollerinde herhangi bir problemle karşılaşılmemiştir. Ölçülen değerler toleranslar içerisinde. Test parçası TAKSAN Kalite Kontrol birimi tarafından kabul edilmiştir.

Ek-C



Şekil C.1. Uygulama resimleri (3 Eksen CNC-Freze tezgâhı)





Şekil C.2. Uygulama resimleri (CNC-LKM tezgâhı)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Kelekci E.**, Kizir S., Matlab GUI ile Tip 2 Bulanık Mantık Editör Tasarımı, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK)*, Denizli, Türkiye, 10-12 Ekim 2015.
- [2] **Kelekci E.**, Kizir S., Real Time Control of a Flexible Joint Manipulator Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller, *Proceedings of the 5th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR'18)*, Niagara Falls, Canada, June 7-9, 2017.
- [3] **Kelekci E.**, Kizir S., Bingul Z., İki Serbestlik Dereceli Dört Rotor Sisteminin Tasarımı, Modellenmesi ve Kontrolü, *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES)*, Baku, Azerbaijan, September 29-30, 2017.
- [4] Kizir S., **Kelekci E.**, Yaren T., *Matlab Simulink Destekli Gerçek Zamanlı Kontrol*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2019.
- [5] Kırca S., **Kelekci E.**, Ayaz M., Design and Implementation of Automation System for a Storage Facility, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 2019, **25**(2), 157-164.
- [6] **Kelekci E.**, Kizir S., Trajectory and vibration control of a flexible joint manipulator using interval type-2 fuzzy logic, *ISA Transactions*, 2019, **94**, 218-233.
- [7] **Kelekci E.**, Kizir S., Tool Path Planning Control of the 3-Axis CNC Machining with High Accuracy Step Motor Pulse/Direction Command, *10th International Conference on Image Processing, Wavelet and Applications (IWW2019)*, Kocaeli, Turkey, October 18-20, 2019.
- [8] **Kelekci E.**, Yaren T., Kizir S., Model Based PID Controller Design of a DC Motor Using Black Box System Identification, *10th International Conference on Image Processing, Wavelet and Applications (IWW2019)*, Kocaeli, Turkey, October 18-20, 2019.
- [9] **Kelekci E.**, Kizir S., Ethercat Based Trajectory Tracking Control of an AC Servo Motor, *International Marmara Sciences Congress (IMASCON)*, Kocaeli, Turkey, November 1-2, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

İlkokul eğitiminin 4 yılını Alanya/Antalya'da ilkokul son ve ortaokul eğitimini Bolvadin/Afyonkarahisar'da tamamlamıştır. 2005 yılında Meram Anadolu Teknik Lisesi'nde eğitime başlamış ve 2009 yılında mezun olmuştur. 2009 yılında girdiği üniversite sınavında Marmara Üniversitesi Mekatronik Eğitimi bölümünü kazanmış ve 2013 yılında Mekatronik Öğretmeni olarak mezun olmuştur. 2013 yılı Eylül ayında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine, 2014 yılı Şubat ayında da Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Tamamlama eğitimine başlamıştır. 2016 yılı Şubat ayında yüksek lisans eğitimini tamamlamış ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başlamıştır. 2017 yılı Haziran ayında ise mühendislik tamamlama eğitimini bitirerek Yıldız Teknik Üniversitesi'nden Mekatronik Mühendisi olarak mezun olmuştur.

2014 yılı Şubat ayında, Celal Bayar Üniversitesi Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümünde ÖYP Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2014-2020 yılları arasında yüksek lisans ve doktora eğitimlerini aldığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'na ÖYP kapsamında görevlendirilmiştir. 2020 Temmuz ayında asıl kadrosunun bulunduğu Celal Bayar Üniversitesi Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümüne dönmüş ve Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.