T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAKIM TEZGÂHLARINDA OPTİMAL YÖRÜNGE PLANLAMA: EVRİMSEL ALGORİTMALAR VE EĞRİ UYDURMA YÖNTEMLERİ İLE PERFORMANS İYİLEŞTİRME

Gamze DEMİR

DOKTORA TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Programı

Danışman

Doç. Dr. Revna ACAR VURAL

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAKIM TEZGÂHLARINDA OPTİMAL YÖRÜNGE PLANLAMA: EVRİMSEL ALGORİTMALAR VE EĞRİ UYDURMA YÖNTEMLERİ İLE PERFORMANS İYİLEŞTİRME

Gamze DEMİR tarafından hazırlanan tez çalışması 10.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Revna ACAR VURAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Revna ACAR VURAL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim ÖNİZ, Üye
İstanbul Bilgi Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Uğur YILDIRAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Murat TÜMER, Üye
Türk Alman Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Revna ACAR VURAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Takım Tezgâhlarında Optimal Yörünge Planlama: Evrimsel Algoritmalar ve Eğri Uydurma Yöntemleri ile Performans İyileştirme” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Gamze DEMİR

İmza

Aileme,

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, CNC tezgâhlar yörünge planlama problemleri üzerine optimizasyon yapılmasını konu almaktadır. Yapılan çalışma boyunca literatürdeki mevcut yöntemler incelenmiş ve CNC tezgâhlarında uygulanabilir optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Tezin hazırlanması sürecinde elde edilen bilgiler ve tecrübeler endüstriyel uygulamalarda verimlilik ve etkinlik sağlamak amacıyla önemli katkılar sunmuştur. Tezin hazırlanması sürecinde karşılaştığım zorluklar ve öğrendiğim değerli bilgiler akademik hayatım boyunca bana yol gösterici olacaktır.

Öncelikle danışman hocam Doç. Dr. Revna Acar VURAL'a, değerli bilgisi, sabrı ve yönlendirmeleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisi yaratıcı fikirleri ve deneyimleri ile çalışmamın her aşamasında bana rehberlik etmiş ve tezimde önemli katkılar sağlamıştır.

Tez çalışmam boyunca bana zaman ayırarak birçok faydalı tartışma gerçekleştirdiğimiz ve değerli fikirlerini paylaşarak çalışmama önemli katkılarda bulunan tez izleme komitesinin değerli üyeleri Doç. Dr. Umut Engin AYTEN ve Dr. Öğr. Üyesi Yeşim ÖNİZ'e teşekkürlerimi sunarım. Doktora çalışmalarım süresince gerçekleştirilen çalışmalarımda sağladıkları desteklerden dolayı çalışma arkadaşlarım Zafer ÇAKAR ve Emre GÜNDOĞAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatımın her aşamasında ve akademik kariyerim boyunca bana destek veren anneme, babama, kardeşime sabırları, anlayışları ve sonsuz destekleri için minnettarım. Ve tez çalışmam boyunca bana sevgi, sabır ve desteğini hiç esirgemeyen biricik ve sevgili eşim Yücel'e, her zaman kalbimde sevgisini hissettiğim canım kızım Ela'ya ve şu an canımda kanımda olan oğlum Ekin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sizlerin sevgisi ve anlayışı bu süreci benim için daha kolay ve anlamlı kıldı. Ailemin varlığı çalışmalarımda bana güç ve motivasyon sağladı. Bu başarıda sizlerin payı büyüktür. Sizlerin desteği ve sevgisi olmasaydı bu yolculuğu tamamlamak mümkün olmazdı. Bu çalışmayı sizlere ithaf ediyorum.

Gamze DEMİR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ xii

ŞEKİL LİSTESİ xiii

TABLO LİSTESİ xvii

ÖZET xviii

ABSTRACT xx

1 GİRİŞ 1

1.1 Genel Bilgiler 1

1.2 Literatür Araştırması ve İlgili Çalışmalar 4

1.3 Çalışmanın Amacı ve Motivasyon 10

2 TAKIM TEZGÂHLARINDA YÖRÜNGE PLANLAMA ÇALIŞMALARI 13

2.1 CNC Takım Tezgâh Sistemleri 13

2.2 CNC Takım Tezgâhlarında Takım Yolu 13

2.3 CNC Takım Tezgâhlarında G-Kod Tanımı 14

2.3.1 Genel Takım Yolu Optimizasyonu 16

2.3.2 Hız Optimizasyonu 17

2.3.3 Yol Düzeltme ve Kısaltma Optimizasyonu 17

2.3.4 Hareket Komutları Optimizasyonu 17

2.3.5 Parça Sıralama Optimizasyonu 18

2.3.6 Makine Yüksek Performans Ayarları Optimizasyonu 18

2.4 CNC Takım Tezgâhlarında G-Kod Çalışma Prensipleri 18

2.5 CNC Takım Tezgâhlarında G-Kod Yükleme ve Çalıştırma 19

2.6 CNC Takım Tezgâhlarında Eğri Uydurma Yöntemleri 21

2.7 CNC Takım Tezgâhlarında Takım Yolu Planlama 22

2.8 CNC Tezgâhlarda En Çok Tercih Edilen Takım Yolu Optimizasyon Yöntemleri 23

2.8.1 Genetik Algoritma 24

2.8.2 Karınca Kolonisi Optimizasyonu 24
2.8.3 Parçacık Sürü Optimizasyonu 25
2.8.4 Yapay Bağışıklık Sistemi 25
2.8.5 Yapay Sinir Ağları 25
2.9 CNC Takım Tezgâhlarında Kinematik Yapılandırma Çalışmaları 26
2.9.1 Serbestlik Derecelerine Göre Sistem Tanımlamaları 27
2.9.2 Konum Matrisi 29
2.9.3 Yönelim Matrisi 29
2.9.4 Dönüşüm Matrisi 29
2.9.5 İleri Yön Kinematik Modelleme 30
2.9.6 Denavit-Hartenberg Yöntemi 31
2.9.7 Çalışmalarda Kullanılan Örnek CNC Takım Tezgâhın Kinematik Modellenmesi 33
2.10 CNC Takım Tezgâhlarında Eğri Uydurma Yöntemleri ve İnterpolasyon Çalışmaları 43
2.10.1 CODESYS'de Spline G kodu 45
2.10.2 CODESYS'de Spline Eğri Uydurma Yöntemi 45
2.11 CNC Takım Tezgâhlarında Yörünge Planlama Çalışmaları 47

3 CNC TAKIM YOLU PROBLEMLERİ VE OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI 56

3.1 Yol Planlama Problemleri 56
3.1.1 TSP (Seyahat Eden Satıcı Problemi) 56
3.1.2 CNC Tezgâh Takım Yolu Kısaltma Problemi 57
3.1.3 CNC Tezgâh Takım Yolu Düzgünlük Problemi 58
3.1.4 Engellerden Kaçma Problemi 60
3.1.5 Çok Amaçlı Fonksiyonlar ve Ağırlık Faktörleri 62
3.2 Evrimsel Algoritmalar ile Yol Planlama Optimizasyon Çalışmaları 64
3.2.1 Problem Formülasyonu 65
3.2.2 Yol Planlama Stratejisi 66
3.2.3 PSO Algoritmasının Uygulanması 67
3.2.4 ABC Algoritmasının Uygulanması 68
3.2.5 GA Algoritmasının Uygulanması 70
3.2.6 NSGA-II Algoritmasının Uygulanması 71

3.3 Elitist-NSGA-II Algoritması ile Yol Planlama Optimizasyon Çalışması 74
3.3.1 Çalışma Koşulları ve Modellerin Uygulanması 75
3.3.2 Elitist-NSGA-II ile CNC Tezgâh Yol Planlama için Uygulama Adımları 77
3.3.3 Dikdörtgen Bir İş Parçası Üzerinde Yol Planlama Çalışması 79

4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 82

4.1 Kelebek Şeklinin Eğri Uydurma Yöntemi ile İnterpolasyonu 82
4.2 Evrimsel Algoritmalar ile Yol Planlama Optimizasyonu 86
4.2.1 Evrimsel Algoritmaların Uygulanması 86
4.2.2 Simülasyon Sonuçlarının Yorumlanması 91
4.3 NSGA-II ile Kesim Yapmayan Takım Yolu için Çok Amaçlı Optimizasyon Çalışması 92
4.3.1 MOGA ve NSGA-II Pareto Çalışması 92
4.3.2 Takım Yolu Planlama için NSGA-II Parametre Değerleri 93
4.3.3 Takım Yolu Optimizasyonu Simülasyon Sonuçları 94
4.3.4 Takım Yolu Optimizasyonu Deneysel Sonuçları 98

5 SONUÇ 101

KAYNAKÇA 105

A G-KOD GENEL AÇIKLAMA LİSTESİ 113

B DİKDÖTGEN PARÇA VE DELİK DELME ÖRNEK ÇALIŞMA G-KOD KOMUTLARI 116

C İLERİ KİNEMATİK D-H KONTROL MATRİSLERİ 120

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 124

SİMGE LİSTESİ

C	Eğri uydurma yöntemi B-Spline ifadesi
P_i	Eğri uydurma yöntemi kontrol noktası
t	Eğri uydurma yöntemi düğüm noktası
θ_b	Eklem uzay düzleminde döner eksen açısı
d_1	Eklem uzay düzleminde eksen uzunluğu 1
d_2	Eklem uzay düzleminde eksen uzunluğu 2
d_3	Eklem uzay düzleminde eksen uzunluğu 3
θ_0	Eklem uzay düzleminde eksen başlangıç noktası
θ_f	Eklem uzay düzleminde eksen bitiş noktası
θ_m	Eklem uzay düzleminde eksen orta noktası
R	G-kod dairesel hareket yarıçap uzunluğu
G00	G-kod hızlı hareket komutu
G01	G-kod doğrusal hareket komutu
G02-03	G-kod dairesel hareket komutu
M03-05	G-kod Mil (spindle) kontrol komutu
M08-09	G-kod soğutma sistemi kontrol komutu
G5	G-kod eğri uydurma komutu
γ	Genetik algoritmada mutasyon aralığı
β	Genetik algoritmada seçim baskısı
x_i	Kartezyen uzay düzleminde x noktası
y_i	Kartezyen uzay düzleminde y noktası
z_i	Kartezyen uzay düzleminde z noktası
X	Kartezyen uzay düzleminde X ekseni
Y	Kartezyen uzay düzleminde Y ekseni
Z	Kartezyen uzay düzleminde Z ekseni
P	Kartezyen uzay düzleminde P noktası
A	Kartezyen uzay düzleminde A koordinat sistemi
B	Kartezyen uzay düzleminde B koordinat sistemi
R	Kartezyen uzay düzleminde yönelim matrisi
T	Kartezyen uzay düzleminde dönüşüm matrisi
n	Kartezyen uzay düzleminde normal vektörü
s	Kartezyen uzay düzleminde kayma vektörü

a	Kartezyen uzay düzleminde yaklaşım vektörü
i	Kartezyen uzay düzleminde i. nokta/eklem
a_i	Kartezyen uzay düzleminde i. eklemin bağ uzunluğu
α_i	Kartezyen uzay düzleminde i. eklemin bağ açısı
d_i	Kartezyen uzay düzleminde i. eklemin bağ kaçıklık mesafesi
$\theta_{i,}$	Kartezyen uzay düzleminde i. eklem açısı
r	Kartezyen uzay düzleminde bir matrisin indeksi
p_x	Kartezyen uzay düzleminde robot uç işlevcisi için x bitiş noktası
p_y	Kartezyen uzay düzleminde robot uç işlevcisi için y bitiş noktası
p_z	Kartezyen uzay düzleminde robot uç işlevcisi için z bitiş noktası
n	Kartezyen uzay düzleminde serbestlik derecesi
P	NSGA-II'de başlangıç popülasyonu
Q	NSGA-II'de çocuk popülasyonu
R	NSGA-II'de yeni popülasyon
g	NSGA-II'de adım sayısı
N	NSGA-II'de popülasyon sayısı
G	NSGA-II'de tekrarlama sayısı
p_c	NSGA-II'de çaprazlama oranı
p_m	NSGA-II'de mutasyon yüzdesi
n_c	NSGA-II'de çaprazlama indeksi
n_m	NSGA-II'de mutasyon indeksi
w	Parçacık sürü optimizasyonunda atalet ağırlığı
wdamp	Parçacık sürü optimizasyonunda sönüm oranı
C1	Parçacık sürü optimizasyonunda öğrenme kat sayısı 1
C2	Parçacık sürü optimizasyonunda öğrenme kat sayısı 2
B	Robot çalışma uzayında ana çerçeve
S	Robot çalışma uzayında istasyon çerçevesi
W	Robot çalışma uzayında bilek çerçevesi
T	Robot çalışma uzayında araç çerçevesi
H	Robot çalışma uzayında hedef çerçevesi
c_{ij}	TSP'de *i* şehrinden *j* şehrine olan mesafe
k_{ij}	TSP'de karar değişkeni
S	Yapay arı kolonisinde kâşif arı sayısı
O	Yapay arı kolonisinde gözlemci arı sayısı
D	Yol probleminde yol uzunluğu

S	Yol probleminde yol düzgünlüğü
O	Yol probleminde yol güvenliği
T	Yol probleminde komut dizisi
J	Yol probleminde toplam amaç fonksiyonu
k	Yol probleminde amaç fonksiyon sayısı
ω	Yol probleminde amaç fonksiyon ağırlık faktörü

KISALTMA LİSTESİ

ABC	Artificial Bee Colony (Yapay Arı Kolonisi)
ACO	Ant Colony Optimization (Karınca Kolonisi Optimizasyonu)
AIS	Artificial Immune Systems (Yapay Bağışıklık Sistemi)
ANN	Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağları)
CAD	Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	Computer-Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli İmalat)
CD	Crowding Distance (Kalabalıklaşma Mesafesi)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrol)
DEA	Differential Evolution Algorithm (Diferansiyel Gelişim Algoritması)
D-H	Denavit-Hartenber Yöntemi
EA	Evolutionary Algorithm (Evrimsel Algoritma)
GA	Genetik Algoritma
IoT	Nesnelerin İnterneti
MOEA	Multi-Objective Evolutionary Algorithm (Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma)
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm (Çok Amaçlı Genetik Algoritma)
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma)
NURBS	Non-uniform Rational Basis Spline (Düzgün Olmayan Rasyonel Temelli Eğri)
PPP	The Public Private Partnership in Robotics (Tüm Eksenleri Prizmatik Robot-Kartezyen Robot)
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SA	Simulated Annealing (Benzetilmiş Tavlama)
TSP	Travelling Salesman Problem (Gezgin Satıcı Problemi)
YP	Yörünge Planlama

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 CNC tezgâhlarda sık kullanılan takım yolu desenleri [64] 14

Şekil 2.2 Örnek G-Kod simülasyon gösterimi.....16

Şekil 2.3 Uç işlevcide hız optimizasyonu için önemli parametrelerin gösterimi [67] 17

Şekil 2.4 Örnek G-Kod simülasyon gösterimi.....18

Şekil 2.5 Üretilen G-kodun CNC tezgâhlarda kullanımı.....20

Şekil 2.6 CNC işleme faktörlerini iyileştirmek için kullanılan optimizasyon yöntemlerinin yüzdelik bilgileri [17] 23

Şekil 2.7 Prizmatik kartezyen eksen gösterimi ve çalışma uzayı [91] 27

Şekil 2.8 Bir robotun sahip olduğu çalışma düzlemlerinin gösterimi [91].....28

Şekil 2.9 Dönme ve konum vektörleri gösterimi [91].....30

Şekil 2.10 Dönüşüm matrisi denklemleri için uç işlevci vektörleri gösterimi [91].....30

Şekil 2.11 Koordinat eksenlerinin eklemlere yerleştirilmesi [91].....31

Şekil 2.12 Z_{i-1} ile Z_i eksenleri arasındaki bağ uzunluğu [91].....31

Şekil 2.13 X_{i-1} ekseni ile X_i ekseni arasındaki Z_i boyunca ölçülen bağ kaçıklığı [91] 31

Şekil 2.14 Z_{i-1} ekseni ile Z_i ekseni arasındaki ölçülen bağ açısı [91] 32

Şekil 2.15 a_{i-1} ile a_i bağları arasındaki X_i ekseni boyunca ölçülen eklem açısı [91].....32

Şekil 2.16 a_{i-1}, α_{i-1}, d_i ve θ_i eklem değişkenlerinin belirlenmesi [91].....33

Şekil 2.17 Parça üretimi için kullanılan CNC tezgâh tasarımı 33

Şekil 2.18 Test sistemi için kullanılacak CNC tezgâhın eksen koordinatları.....34

Şekil 2.19 Test sistemi için kullanılacak robotun döner tablaya göre koordinatları 34

Şekil 2.20 Deneysel çalışmalarda kullanılan robotun eksen yerleşimleri 36

Şekil 2.21 Deneysel çalışmalarda kullanılan robotun eksen uzunlukları 37

Şekil 2.22 Deneysel çalışmalarda kullanılan tablanın eksen uzunlukları.....37

Şekil 2.23 Dönüşüm matrisleri için belirlenen noktalar 37

Şekil 2.24 Testlerde kullanılacak dört eksenli sisteminin detaylı koordinat sistemi, mesafe ve uzunluk bilgileri 38

Şekil 2.25 Kartezyen uzaydan eklem uzayına geçişte değişkenlerin ters kinematik dönüşümü 40

Şekil 2.26 İleri ve ters kinematik dönüşümlerinin gösterimi [91].....41

Şekil 2.27 G-kodu G5 ile teğet oluşturma çalışması 46

Şekil 2.28 CODESYS programında Spline eğri uydurma yöntemi ile X20-Y20 noktalarındaki örnek eğri çalışması.....47

Şekil 2.29 Bir noktadan başka bir noktaya yapılan hareket yörüngesi.....48

Şekil 2.30 Örnek yörünge planlama için eksen yerleşimleri ve kinematik denklem zincirlerinin gösterimi [93].....48

Şekil 2.31 Yörünge planlama sırasında gerçekleşen aşamalar 49

Şekil 2.32 CNC Tezgâh modelinin yörünge planlama simülasyon çalışmaları 50

Şekil 2.33 CNC işleme tezgâh uç işlevcisinin başlangıç ve hedef pozisyonları ...51

Şekil 2.34 CNC tezgâh uç işlevcisinin p_x, p_y, p_z için planlanan yörünge bilgileri.51

Şekil 2.35 Sistemin ileri kinematik ve ters kinematik model bloklarının gösterimi 52

Şekil 2.36 CNC tezgâh modelinin motor blok şeması.....52

Şekil 2.37 Matlab programında oluşturulan *X* ekseni için pozisyon, hız, ivme ve sarsınım simülasyon sonuçları.....53

Şekil 2.38 Matlab programında oluşturulan *Y* ekseni için pozisyon, hız, ivme ve sarsınım simülasyon sonuçları.....54

Şekil 2.39 Matlab programında oluşturulan *Z* ekseni için pozisyon, hız, ivme ve sarsınım simülasyon sonuçları.....54

Şekil 2.40 CNC tezgâh uç işlevcisinin p_x, p_y, p_z için hedefe yörüngesi.....55

Şekil 3.1 Takım yolu örnek planlama çalışması: a) Orijinal takım yolu, b) yol kısaltma optimizasyonunu dikkate alarak yeniden oluşturulan takım yol.....58

Şekil 3.2 Takım yolu örnek planlama çalışması: a) Orijinal takım yolu, b) yol düzgünlüğü optimizasyonunu dikkate alarak yeniden oluşturulan takım yolu.....60

Şekil 3.3 Takım yolu örnek planlama çalışması: a) Orijinal takım yolu, b) yol güvenliği optimizasyonunu dikkate alarak yeniden oluşturulan takım yolu.....62

Şekil 3.4 Takım yolu engellerden kaçma örnek planlama çalışması.....65

Şekil 3.5 PSO algoritmasının akış şeması 68

Şekil 3.6 ABC algoritmasının akış şeması 69

Şekil 3.7 GA algoritmasının akış şeması.....70

Şekil 3.8 NSGA-II algoritmasının akış şeması.....73

Şekil 3.9 Elitist-NSGA-II algoritmasının akış şeması.....79

Şekil 3.10 Bir dikdörtgen parçada delik açma problemi için orijinal takım yolu .80

Şekil 3.11 Bir dikdörtgen parçada delik açma problemi için optimize edilmiş takım yolu.....80

Şekil 4.1 B-Spline eğri uydurma çalışmasında işlenecek kelebek noktalar kümesinin G-kod görüntü simülasyonu 83

Şekil 4.2 CODESYS G5 eğri uydurma yöntemi ile kelebeğin düzenlenmesi.....83

Şekil 4.3 Kelebek şeklinin CNC tezgâhta X-Y düzleminde işlenmesi.....85

Şekil 4.4 Kinematik modeli tasarlanan CNC tezgâhında işleme çalışmaları 85

Şekil 4.5 Dört algoritmanın hedef konuma doğru optimal pozisyon yörüngesi..89

Şekil 4.6 Evrimsel algoritmanın iterasyon sayısına göre optimizasyon sonuçları 90

Şekil 4.7 NSGA-II optimizasyon yörünge planlama simülasyon sonucu 91

Şekil 4.8 Yol uzunluğu ve yol düzgünlüğü amaç fonksiyonlarının MOGA ve NSGA-II optimal Pareto sınır grafiği 93

Şekil 4.9 Örnek bir çalışma parçasının orijinal ve optimize edilen hareket yollarının karşılaştırılması 95

Şekil 4.10 İş Parçası 1 için orijinal işleme programının gösterimi 96

Şekil 4.11 İş Parçası 1 için optimize edilmiş işleme programının gösterimi 96

Şekil 4.12 İş Parçası 2 için orijinal işleme programının gösterimi 97

Şekil 4.13 İş Parçası 2 için optimize edilmiş işleme programının gösterimi 97

Şekil 4.14 CNC makinesinde işlenen parçalar a) İş Parçası 1 ve (b) İş Parçası 2 98

Şekil 4.15 Orijinal İş Parçası 1 ve optimize edilmiş İş Parçası 1'in (a) kesim dışı toplam hareket seyahati ve (b) çevrim süresi karşılaştırma grafiği 99

Şekil 4.16 Orijinal İş Parçası 2 ve optimize edilmiş İş Parçası 2'in (a) kesim dışı toplam hareket seyahati ve (b) çevrim süresi karşılaştırma grafiği 99

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Robot çerçeve alanları ve çalışma düzlemleri [91].....28

Tablo 2.2 Şekil 2.17'de gösterilen sistemin *X*, *Y*, ve *Z* eksenleri için D-H değişkenleri 35

Tablo 2.3 Şekil 2.17'de gösterilen sistemin *b* ekseni için D-H değişkenleri 36

Tablo 2.4 G-kodunda "G5 X Y Z A B C P Q U V W F E H L/O D S" komutunun açıklaması.....46

Tablo 3.1 Her bir ağırlık fonksiyonu için oluşturulan ağırlık faktörleri 74

Tablo 4.1 NSGA-II parametre değerleri 86

Tablo 4.2 GA parametre değerleri 87

Tablo 4.3 ABC parametre değerleri.....87

Tablo 4.4 PSO parametre değerleri.....88

Tablo 4.5 Optimizasyonların gerçekleşme süresi 89

Tablo 4.6 NSGA-II parametre değerleri 94

Tablo 4.7 İş Parçası 1 için optimizasyonların gerçekleşme süresi.....95

Tablo 4.8 İş Parçası 2 optimizasyonların gerçekleşme süresi.....97

Tablo 4.9 CNC makine işleme süreleri.....98

ÖZET

Takım Tezgâhlarında Optimal Yörünge Planlama: Evrimsel Algoritmalar ve Eğri Uydurma Yöntemleri ile Performans İyileştirme

Gamze DEMİR

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Programı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Revna ACAR VURAL

Bilgisayar destekli sayısal kontrollü (CNC) makinelerde yörünge planlama, karar alma ve kontrol süreçlerinde temel bir rol oynamakta olup akıllı imalat alanındaki araştırmaların önemli bir odak noktasını oluşturmaktadır. İmalat endüstrisinde yörünge planlama hareket doğruluğunu artırmanın yanı sıra CNC makine araçlarının döngü süresini azaltırken üretkenliğini artırmak da büyük öneme sahiptir. CNC tezgâhlarda en iyi yörüngeleri elde etmek için makine verimliliği, işleme kalitesi ve döngü süresini iyileştirmek amacıyla literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Bu çalışmada CNC tezgâhlarda optimal yörüngeyi oluşturmak için yol uzunluğunu kısaltma, yol pürüzlülüğünü azaltma, engellerden kaçınma ve makine çevrim süresini iyileştirme hedeflenmiş ve bu amaçla genetik algoritma (GA), yapay arı kolonisi (ABC), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve baskın olmayan sıralama genetik algoritma (NSGA-II) gibi evrimsel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin performans karşılaştırma çalışmaları sonucunda NSGA-II'nin çok

amaçlı yörünge planlama problemlerinin çözümünde etkili bir yöntem olduğu gösterilmiştir. NSGA-II'nin başarısını vurgulamak için Pareto etkinlik durumu çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) ile sunulmuş olup NSGA-II tarafından üretilen çözümlerin olumlu özellikleri öne çıkarılmıştır. Kapsamlı analiz sonuçlarına göre, NSGA-II ile yapılan yol optimizasyonu ile yol uzunluğunda %30 ve işleme döngü süresinde %7 oranında azalma sağladığı görülmüştür.

Ayrıca beş eksenli bir CNC tezgâh sisteminin kinematik modeli oluşturularak yörünge planlama simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada Spline eğri uydurma yöntemleri kullanılarak örnekler sunulmuştur. Bu çalışmalar, karmaşık geometrilere sahip parçaların hassas işlenmesinde önemli avantajlar sağlamıştır. Spline eğri uydurma yöntemlerinin kullanımı daha pürüzsüz ve optimize edilmiş takım yolları oluşturarak işleme kalitesini artırmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemlerin CNC tezgâhların performansını ve verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, eğri uydurma yöntemlerinin endüstriyel uygulamalarda daha yüksek doğruluk ve üretkenlik sağlama potansiyeline sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayar sayısal kontrol, yörünge planlama, eğri uydurma, çoklu amaçlı optimizasyon, evrimsel algoritma.

ABSTRACT

Optimal Trajectory Planning in Machine Tools: Performance Improvement with Evolutionary Algorithms and Curve Fitting Methods

Gamze DEMİR

Department of Electronics and Communication Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Revna ACAR VURAL

Trajectory planning (TP) is fundamental in the decision-making and control processes of computer numerical control (CNC) machines and is also an important focus of research in the field of smart manufacturing. Apart from improving motion accuracy in TP, increasing productivity while reducing CNC machine tools' cycle time is crucial in the manufacturing industry. To achieve optimal trajectories, various methods have been proposed in the literature to improve machine efficiency, processing quality, and cycle time.

In this study, evolutionary methods such as genetic algorithm (GA), artificial bee colony (ABC), particle swarm optimization (PSO), and non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) is used to generate optimal trajectories for CNC machines, aiming to shorten path length, reduce roughness, avoid obstacles, improve machine cycle time. By means of performance comparison studies of these methods, it is shown that NSGA-II is an effective method for solving multi-objective trajectory planning problems. To highlight the success of NSGA-II, Pareto optimality is presented alongside the multi-objective genetic algorithm (MOGA), emphasizing the positive features of the solutions generated by NSGA-

II. According to comprehensive analysis results, path optimization studies carried out with NSGA-II achieved reductions of 30% in path length and 7% in machining cycle time.

Additionally, a kinematic model of a five-axis CNC machine is created and trajectory planning simulation studies are conducted. Herein, examples are presented using B-Spline methods. These studies provide significant advantages in the precise machining of parts with complex geometries. The use of B-Spline methods resulted in smoother and more optimized tool paths, enhancing machining quality and reducing cycle times. Simulation results demonstrate that the proposed methods could significantly improve the performance and efficiency of CNC machines. These findings indicate that curve fitting methods have the potential to provide higher accuracy and productivity in industrial applications.

Keywords: Computer numerical control, trajectory planning, curve fitting, multi-objective optimization, evolutionary algorithm.

1
GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Endüstri dünyasında CNC takım tezgâhları, imalat süreçlerinin vazgeçilmez unsurları arasında yer almaktadır. CNC tezgâhları, otomotivden elektroniğe, savunmadan ağır sanayiye kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu tezgâhlar, yüksek hassasiyet ve sürekli çalışma gerektiren işlemleri başarıyla gerçekleştirerek parça üretiminde yüksek doğruluk ve tekrarlanabilir yapılar sağlamaktadır. CNC tezgâhlarının bu özellikleri üretim sektöründe yaygın olarak tercih edilmelerinin başlıca nedenlerindendir.

Endüstri 4.0 kavramının yaygınlaşmasıyla beraber üretim sistemlerini akıllı bir seviyeye çıkarmak için nesnelerin interneti (IoT), siber-fiziksel sistem, optimizasyon yöntemleri, büyük veri ve veri analitiği gibi birimleri içeren yeni nesil gelişmiş üretim sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmiş sistemlerden biri olan CNC tezgâhlar, talaşlı imalat endüstrisinin en kritik teknolojilerinden biridir ve imalat işlemlerinde birçok avantaj sağlar [1]. Talaşlı imalatta yapılan çalışmaların temel hedefleri genellikle kesme tekniklerini geliştirerek verimliliği artırmak, yüksek hassasiyette uzun ömürlü parçalar üretmek veya mevcut imkânlarını en uygun şekilde kullanarak farklı ürünlerin imalat oranlarını artırmaktır.

CNC takım tezgâhları, otomotiv, havacılık ve makine imalatı gibi sektörler için önemli bir rol oynamaktadırlar. CNC tezgâhlar üzerine yapılan araştırmalar her zaman güncel kalmış ve endüstrinin ihtiyaçlarına cevap vermiştir. Üretimde en uygun imalatı gerçekleştirmek ve verimli üretim şartlarını belirlemek için yapılan çalışmalar işletmelerin rekabet gücünü artırarak sürekliliğini sağlamaktadır. Küresel ekonominin işletmeleri yoğun rekabet şartlarına zorlaması, uygun üretim şartlarının belirlenmesi için araştırma ve geliştirme çalışmalarının önemini artırmaktadır [2].

CNC ürün kalitesini ve verimliliği artırmak için literatürde birçok araştırma yapılmaktadır. CNC takım tezgâhlarının işleme parametrelerinin seçimi, tezgâhının pürüzsüz yüzey kabiliyeti, frezeleme doğruluğu, işleme hızı, makine

çevrim süresi gibi sistemin performansını etkileyen faktörler için önemli bir araştırma konusudur. Takım yolunun seçim süreci ise işleme sürecinin optimize edilmesi için önemli bir unsurdur. Bu nedenle CNC makine araçlarını kullanarak kesme işlemine başlamadan önce en verimli takım yolunun belirlenmesi üretim için kritik konulardan biridir [3].

Bugünün bilgisayar teknolojisi, CNC'de gerçekleşen üretimin her aşamasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde üretim koşulları bilgisayar ortamında tasarlanarak analizinin ve kontrollünün yapılması sağlanır. Üretim sırasında tezgâhlarda en hassas şekilde ürünlerin imal edilmesi için bilgisayar çözümlerinden optimum şekilde faydalanılmaktadır. Akıllı optimizasyon yöntemleri son yıllarda üretim sürecinde önemli bir yer edinmiştir. Bu yöntemler tasarım ve analiz programlarının geliştirilmesinde, işleme şartlarının optimize edilmesinde ve işleme sırasında ortaya çıkan problemlerin izlenip önlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan imalat tekniklerinde işleme şartlarının karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkiler içinde olması matematiksel teorilerin uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Optimizasyon yöntemlerinin bu karmaşık ilişkilere daha hızlı bir şekilde optimum çözümler üretebilmesi endüstri imalat alanında yapılan çalışmalarda tercih edilmesini sağlamıştır [4].

CNC tezgâhlarının çalışma prensipleri mekanik yapıları ve kontrol üniteleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir. CNC kontrol üniteleri hem endüstriyel hem de akademik alanda yoğun araştırma ve geliştirme çalışmalarına konu olmaktadır. Bu nedenle bu çalışma CNC tezgâhlarının sanayideki kritik rolünü ve bu tezgâhların verimliliğini artırmak için yapılan yenilikçi kontrol ünitesi tasarımlarını ele almaktadır.

Endüstriyel CNC tezgâhlarında yüksek hızda ve hassasiyette çalışma yeteneklerinin sağlanması yörünge planlaması ve kinematik analizlerin başarılı bir şekilde yapılması ile mümkündür. Bu doğrultuda CNC tezgâhlarının performansını artırmak için motor kapasitelerine uygun pozisyon, hız, ivme ve sarsıntı profillerinin belirlenmesi kritik bir adımdır. Hedeflenen hareket profillerine uygun yörünge interpolasyonu ve eğri uydurma yöntemleri büyük önem taşır. CNC tezgâhlarda yörünge planlaması ve kinematik analizler, tezgâhların hassas ve verimli çalışması için kritik bir rol oynar.

Son yıllarda CNC tezgâhlarında yörünge planlamasında evrimsel algoritmaların kullanımı yaygınlaşmıştır. Evrimsel algoritmalar, biyolojik evrimin doğal seçilim süreçlerinden ilham alarak karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili olan yöntemlerdir. Bu algoritmalar, yörünge planlamasında tezgâhın hareket yollarını en uygun şekilde belirlemek için kullanılır. Genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi gibi evrimsel yöntemler CNC tezgâhların hareket yollarını optimize ederek hem makine işlem süresini kısaltır hem de enerji tüketimini azalmasına katkı sağlar.

Evrimsel algoritmaların yol planlama optimizasyonu üzerindeki etkileri CNC tezgâhlarının dinamik ve değişken çalışma koşullarına hızlı bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanır. Bu algoritmalar, farklı yörünge seçeneklerini değerlendirerek en uygun yolu belirler. Bu sayede üretim süreçlerinin verimliliğini artırır. Ayrıca EA'lar tezgâhların mekanik ve elektronik bileşenlerinin uyum içinde çalışmasını sağlayarak genel performansı iyileştirir.

CNC tezgâhlarının endüstriyel uygulamalarda başarılı olabilmesi için bu teknolojik hedeflere ulaşmak şarttır. Yüksek hızda ve hassasiyette çalışma şartlarının sağlanması sadece üretim süreçlerinin verimliliğini artırmakla kalmaz. Aynı zamanda maliyetlerin düşmesine ve ürün kalitesinin yükselmesine de katkıda bulunur. Bu nedenle CNC tezgâhların mekanik ve elektronik bileşenlerinin uyumlu bir şekilde çalışması için mühendislik ve üretim süreçlerinde yenilik ve geliştirme faaliyetlerini sürekli hale getirmek gerekmektedir.

Bu çalışmada, CNC tezgâhlarının performans hedeflerine ulaşmak için izlenmesi gereken adımları ve bu adımların optimizasyonu için gerekli olan mühendislik analizleri detaylı bir şekilde sunulmuştur. CNC teknolojisinin sanayideki önemi ve gelecekteki potansiyel gelişim alanları ele alınarak yenilikçi yaklaşımlar uygulanmıştır.

Bu tez çalışmasında yürütülen araştırmalar beş ana başlık altında kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bölüm 1, giriş olarak CNC sistemlerine odaklanmaktadır. CNC takım yolu, yörünge planlama ve optimizasyon yöntemleri hakkında genel bilgiler sunulmuş ve bu konuda literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. CNC yol planlama ve optimizasyon algoritmaları ilgili detaylı literatür taraması da bu

bölümde sunulmuştur. Bölümün sonunda tez amacı ve çalışmanın motivasyonu belirtilmiştir.

Bölüm 2, CNC tezgâhlarda yörünge planlama çalışmalarına odaklanmaktadır. Bu bölümde G-kod fonksiyonları ayrıntılı olarak ele alınmış ve tez kapsamında geliştirilen yörünge planlama algoritmaları hakkında bilgi verilmiştir. G-kod dosyalarından elde edilen yörüngelerin CNC tezgâhlarında titreşimsiz ve yüksek hassasiyette işlenebilmesi için geliştirilen eğri uydurma ve interpolasyon yöntemlerine yer verilmiştir. Ayrıca çalışmaların gerçekleştirileceği CNC tezgâhın kinematik modeli oluşturularak yörünge planlama simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3, CNC sistemlerinde yol problemlerinin tanımı ve optimizasyon algoritmaları için tasarım ayrıntılarını içerir. Tez kapsamında geliştirilen yol planlama algoritmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Yol planlama problemleri için tercih edilen evrimsel algoritmalar ve Elitist-NSGA-II modelini kullanarak çok amaçlı yol planlama optimizasyonunu açıklar.

Bölüm 4, elde edilen simülasyon sonuçlarına ve deneysel çalışmalara ayrılmıştır. Eğri uydurma yöntemi ile interpolasyon çalışmaları, MOGA ile karşılaştırmalı Pareto grafiği, evrimsel algoritmalar ve NSGA-II'nin iş parçaları üzerindeki etkisinin analizini hem simülasyon hem de deneysel ortamlarda sunar. CNC tezgâhlarında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Elde edilen veriler ışığında yapılan analizler ve değerlendirmeler detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Bölüm 5, son bölümde ise tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Bu bölümde genel bir değerlendirme yapılmış ve gelecekte yapılabilecek iyileştirmeler ile ilgili öneriler sunulmuştur. Ayrıca bu alanda yapılabilecek yeni araştırmalar için potansiyel çalışma konuları tartışılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması ve İlgili Çalışmalar

CNC makine araçları, genellikle otomotiv, havacılık, biyomedikal, ev aletleri ve kalıp endüstrisi gibi son derece karmaşık endüstriyel ürünlerin üretiminde tercih edilir. Bu tercihin temel nedeni verimliliği ve kitlesel üretimi artırmaktır [5].

Bilgisayar destekli tasarım (CAD), nesnelerin dijital temsillerini oluşturmayı içerirken, bilgisayar destekli imalat (CAM), imalat sürecinin çeşitli yönlerini otomatikleştirmek için yazılım ve bilgisayar kontrollü makinelerin kullanımını ifade eder. CAD/CAM yazılımı, frezeleme, yönlendirme, tornalama ve elektriksel deşarj işleme gibi CNC makinelerini yönetir. Bu programlar, CNC makinelerinin manuel ayarlanması sırasında ortaya çıkabilecek hataları ortadan kaldırmada kritik bir rol oynar. Ayrıca manuel programlamayla elde edilemeyen bir seviyede adaptasyon ve hassas işleme yöntemleri sağlarlar. CAD ve CAM programları imalat sürecinde birbirini tamamlayan araçlar olup üretilecek parçanın tasarım aşamasını CAD ele alırken imalat ve üretim yönlerini CAM denetler. Öte yandan CAM, araç yollarını programlamak ve CNC makinelerinin üretim aşamalarını kontrol etmek için kullanılır [6]. Mevcut CAM teknolojisi genellikle araç yolu oluşturmak için geometrik hesaplamalara dayanır. Ancak bu geleneksel araç yolları (zig-zag, konsantrik, radyal vb.) işleme mekaniği göz önünde bulundurulmadan yalnızca geometrik hesaplamalara dayalı olarak üretilir [7]. Özellikle karmaşık geometrili parçaların işlenmesi sırasında bu yöntemle üretilen araç yolları en uygun seçim olmayabilir. Kesme büyüklükleri, takım ucu hasarı, takım ucu eğilimi ve yüzey form hataları riski optimize edilmemiş yollara kıyasla artar. Bu nedenle araç yolu optimizasyonu, araç ömrünü uzatmak, kırılma riskini azaltmak ve işlenmiş parçadaki yüzey form hatalarını en aza indirmek amacıyla önemlidir [8].

Son gelişmeler CAM sistemlerinde karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak tanımıştır. Bu sistemlerle ilgili en önemli sorunlardan biri bu geometrik parçaları işlemek için uygun bir araç yolunun seçimidir. Bu seçimde manuel kontrol iş parçası geometrisine dayanarak hem üretken hem de üretken olmayan araç yollarının oluşturulmasına neden olabilir [9]. G-kodu, CAM kontrolü altındaki donanımlar için metrik tabanlı sayısal kontrol sağlar. CAM yazılımı, basit tasarımların çizilmesine ve CNC makine için G-kodu üretimine olanak tanır. Bu üretilen araç yolu daha sonra CNC makineleri tarafından yürütülmek üzere G-koduna dönüştürülür [10]. Optimize edilmiş yazılımlar otomasyonu artırarak zaman tasarrufu, hata azaltma ve üretim sürecinde hassasiyet ve verimliliği artırır [11]. CNC makine araçları, işleme çıkışlarını (hava zamanı, mil hızı, besleme hızı, kesim derinliği, yol uzunluğu, takım ömrü, yüzey kalitesi, kesme kuvvetleri ve

kesme süresi vb.) etkileyen çeşitli ve karmaşık kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyar [12]. Bu kontrol süreçleri, işlem sırasında bir aracın enerji tüketiminde değişikliklere neden olabilir [13], [14]. Literatürde önemli bir konu ise CNC enerji tüketimi için kullanılabilen enerjinin önceden tahmin edilmesidir. CNC makine araçlarının optimal enerji kullanımı için tezgâhların etkili bir şekilde izlenmesi, analiz edilmesi, iyileştirilmesi ve enerji tüketimini tahmin edilmesi önemli araştırma konularıdır [15].

Önceki çalışmalar, yol planlama ile ilgili geometrik kısıtlamalar, mesafe, döngü süresi, kesme koşulları, parça malzemeleri, sarsınım sınırlı besleme hızları ve çarpışma önleme gibi önemli konulara odaklanmıştır [16]. Bu alandaki araştırmalarda evrimsel algoritmalar (EA) ve yapay sinir ağları (ANN) gibi son teknolojilerin uygulanmasıyla sistem kullanılabilirliğinin artırılması ve performans optimizasyonu gibi olumlu sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır [17], [18].

Optimizasyon, verilen şartlar altında bir problemin çözüm uzayındaki en iyi sonucun elde edilmesidir. Evrimsel algoritmalar günümüzde çoklu optimizasyon problemlerine yönelik kabul edilebilir bir sürede optimuma yakın çözümler sağlayabilmektedir. Genel amaçlı evrimsel optimizasyon algoritmalarını, sezgisel, biyolojik, fiziksel, sürü, sosyal ve kimya tabanlı olmak üzere farklı başlıklar altında toplayabiliriz [19]. Evrimsel optimizasyon algoritmalarının en önemli avantajlarından biri yerel optimum noktalara takılmadan global sonuca ulaşabilme yeteneğidir. GA, karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), PSO, ABC, diferansiyel gelişim algoritması (DEA) gibi literatürde sıklıkla kullanılan ve kabul görmüş birçok evrimsel algoritma ve modifikasyonları mevcuttur [20]-[22].

Son yıllarda CNC yörünge planlamada EA kontrol, parametre optimizasyonu, akıllı sistem tanımlama gibi birçok yöntem uygulanmıştır. CNC tezgâh kontrol ünitesi araştırmalarında en kritik konulardan biri olan takım yolu veya yörünge planlaması genellikle birbiriyle çelişebilen çeşitli kriterlerin optimizasyonunu gerektirir [23]. Uygulama alanına göre minimum geçen süre, minimum enerji tüketimi, optimal tork ve/veya engellerden kaçınma gibi kriterler dikkate alınarak en iyi performans sağlanabilir. Yörünge planlama, uç işlevcinin hızlanması ve yavaşlaması için kabul edilebilir bir zaman dilimini sağlamak amacıyla oldukça düzgün yapılmalıdır. Uç işlevci bir konumdan diğerine hareket ederken noktaları

birbirine bağlayan ve çarpışmalardan kaçınan bir yol elde etmelidir [24]. Literatürde yer alan EA çalışmaları yörünge problemlerine kabul edilebilir derecede optimal çözümler sunmaktadır. Bu algoritmalar belirli bir yol için düzgün yörünge üretmek amacıyla önerilmektedir [25], [26]. Bu yaklaşımlarda, optimal yörünge belirlerken hava zamanı en aza indirmek için genellikle sarsıntı parametresi incelenmektedir. Geliştirilen EA yöntemleri gemi navigasyonu ve denizcilik için çeşitli alanlarda da kullanarak başarılı sonuçlar elde etmiştir [27], [28]. Akıllı mobil navigasyon sistemi için çok amaçlı parçacık sürü optimizasyon algoritması tabanlı bir rota planlama yöntemi geliştirilmiştir [29]. Bu sistemlerde tasarım parametreleri belirli kısıtlamalara uygun olarak doğrusal olmayan optimizasyon teknikleri kullanılarak optimize edilmiştir.

Literatürde robot manipülatörlerinin yörünge planlama optimizasyonuna yönelik yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi çeşitli yaklaşımlar kullanmaktadır [30], [31]. Ayrıca birçok çalışmada yol hatasını en aza indirmek için bulanık mantık, yapay sinir ağı ve genetik algoritma önerilmiştir [32]. Hareket kontrolü için yüksek doğruluk elde etmek amacıyla interpolasyon yöntemlerini araştıran çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [33]. CNC tezgâhta yörünge planlama konuları literatürde işlenen önemli konulardandır. Bu çalışmada ise kullanıcı gereksinimleri dikkate alınarak optimal yörüngeyi, amaç fonksiyonlarının en iyi maliyetini, optimal hareket ve pozisyon hatalarını değerlendirmek için NSGA-II, GA, ABC ve PSO yaklaşımları uygulanmıştır. Kullanılan EA'ların karşılaştırılması yapılarak elde edilen sonuçlar detaylı olarak verilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak geliştirilmiş Elitist-NSGA-II algoritması tasarlanarak uç işlevcinin yol planlama aşamalarında kullanılmıştır.

Karmaşık parçaların delme işlemleri düşünüldüğünde araç yolu optimizasyonu gezgin satıcı problemi (TSP) olarak doğrulanmıştır [20]. TSP modeli, delikler veya kaynaklar arasındaki hareket yolu uzunluğunu en aza indirmeyi amaçlar [34]. Ayrıca TSP'nin üretimde yol planlama problemleri için etkili bir strateji olduğu gösterilmiştir [35]. Ancak genellikle CNC tezgâhlarda yolu optimizasyonu alanındaki çalışmalarda basit şekiller ve delik delme düzenlemelerine odaklanılmıştır [36].

Literatürde yüksek hızlı bir CNC sistem tasarımı için döngü süresini iyileştirmek ve enerji tasarrufu sağlamak için optimal yörüngelere ulaşmak için çeşitli

metodolojiler önerilmiştir. Altıntaş ve Erkorkmaz, beşinci derece eğri takım yolu interpolasyonu için özel olarak uyarlanmış zamansal olarak optimal besleme hızı planlaması yöntemini sunmuştur [37]. Diğer bir çalışmada ise endüstriyel robotlar için zaman-optimal hareket ve engel kaçınma yörüngesi oluşturulmasını ele alırken aynı zamanda salınım bastırma dikkate alınarak optimal yörünge planlama tekniğini tanıtılmıştır [38]. Farklı bir çalışmada da parametrik eğriler boyunca sarsıntı sınırlı besleme hızlarını optimize etmek için bir algoritma çalışmaları önerilmiştir [39]. Erkorkmaz ve Heng [40], NURBS araç yollarını optimize ederek besleme hızı dalgalanmalarını en aza indirmeyi ve beslemeyi sürekli olarak modüle etmeyi amaçlayan bir arama yaklaşımı önerdiler.

Ayrıca benzer konularda yapılan literatür çalışmalarında izleme hatasının ön tahminlemesi hassas ve doğru bir CNC işleme için önemli bir konudur [41]. Başarılı bir yörünge izleme için sistemin çıkışı (gerçek pozisyonu) ve girişi (istenen pozisyonu) aynı hizaya getirilmeye çalışılarak düzeltici eylemlerde bulunulur. Bir hareket kontrolörü ayrıca istenen komutları yerine getirmek için motorların izlemesini istediği hareket profilini de oluşturur. Farklı polinom profillerini içeren çok sayıda hareket profili vardır. Hareket profilini belirlemek için CNC yörünge planlama konusu önemli araştırma alanlarından birisidir [42]. Uç işlevciyi bulunduğu konumdan arzu edilen konuma götürmek için yapılan çalışmalarda en temel sorunlardan biri yörüngeyi doğru planlamaktır. Uç işlevci, belirlenen yörünge noktalarından geçerken zamana bağlı olarak değişen bir hıza ve ivmeye sahiptir. Bu değişken ivmeli hareket sarsıntıya neden olabilir. Robotun sarsıntıdan uzak, çalışma uzayındaki herhangi bir cisme çarpmadan eyleyicilerin sınırlarını zorlamadan kontrollü ve yumuşak bir şekilde hareket edebilmesi için yörünge planlaması yapılır [43]. İncelenen çalışmalarda eklem uzayında yörünge planlaması yapılırken üç veya daha yüksek dereceli polinomlar kullanılarak yörünge kontrolü gerçekleştirilir.

Literatürde yörünge planlama için en eski çalışma robotik alanda yapılmıştır. Bu problemde eklemlerin hızları robotun Jacobian matrisinin Moore-Penrose tersi kullanılarak çözülmüştür [44]. Jacobian matrisinin fonksiyonlarını en aza indirmek için başka bir çalışma gerçekleştirilmiştir [45]. Birçok çalışmada ise bu problemlerin çözümü için optimizasyon algoritmaları tercih edilerek kullanmıştır. Bu çözümler geliştirilerek tüm yörünge yolu üzerinde sistemsel etkileri en aza

indirmek için kullanılmıştır [46]. Yörünge hesaplamalarında gerçek hareket noktalarını elde etmek için artık noktaların çözümünü sisteme dâhil etmek gerekmektedir. Çeşitli sayısal uyum teknikleri arasındaki hata farklılıkları araştırılarak Runge Kutta Metodu'nun iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ama bu yöntemlerle ortaya çıkan yörüngeler, eklem hızı, ivme ve sarsıntı limitlerini dikkate alarak optimum şartlarda oluşturulan yörüngeler değildir. Robotik alanda optimal yörünge oluşturma için çeşitli çalışmaları mevcuttur [47]. Ayrıca bir diğer yöntem olan CNC işleme parametrelerinin optimize edilmesine ilişkin yüksek hızlı yörünge takip uygulamalarını gerçekleştirmek için sanal bir CNC sistemi sunulmuştur [48]. CNC uygulamalarda parametre optimizasyonlarında yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve işleme doğruluğunu artırmak için ANN ve bulanık mantık yaklaşımları kullanılmaktadır [49]. Yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için GA ve CNC işleme parametrelerini optimize etmek için PSO algoritması önerilmiştir [50].

Ayrıca CNC işlemede yüksek bir doğruluk elde etmek için gerekli olan hareket kontrolü interpolasyon yöntemleri üzerine odaklanılmaktadır [51]. CNC takım tezgâhları için yörünge oluşturma algoritmaları literatür araştırmaları için önemli bir konudur. Bu algoritmalar mümkün olduğunca optimum zamanda olmalı ve tüm sürücüler belirlenen sınırlara uymalıdır. Sonuç olarak CNC takım tezgâhı literatüründeki yörünge oluşturma tekniklerine ve bu tekniklerdeki kriterleri farklı şekillerde yerine getirmeye odaklanmıştır. Bir çalışmada yörüngeyi yalnızca sarsıntı için optimize etmek üzere çift yönlü taramalı bir zaman algoritması önerilmiştir [52]. Ayrıca her sürücü zaman adımında teğet bir yer değiştirmenin seçildiği bir çözüm önerisi sunulmuştur [53]. Önerilen bu çözümlerde genellikle ivme parametresi için çalışılmıştır. Ayrıca Altıntaş ve Erkorkmaz, hız, ivme ve sarsıntı ile ilgili parametrelerle benzer lineer kontrol yöntemleri kullanmıştır [54]. Sistemde yaşanan belirsizlik ve karışlıklılardan dolayı doğrusal olmayan optimizasyon teknikleri kullanılarak bu parametrelerin belirlenen koşulara uygun olarak optimize edilmesi gerekir. Yapılan araştırılmalardan yola çıkılarak bu konuda literatürde bir boşluk olduğu görülmektedir.

Karmaşık geometriler için araç yolları oluşturmak, özellikle yüksek hızlı çok eksenli makinelerde araç ve iş parçası arasındaki çarpışmaları önlemek için ekstra dikkat gerektirir [55]. Bu nedenle hem optimize edilmiş hem de çarpışmalardan

arındırılmış araç yollarını analitik olarak elde edebilen tekniklerin keşfedilmesi önemlidir [56]. Tek amaca yönelik iyileştirmelerin aksine hem minimum araç yolu uzunluğunu hem de çarpışma önleme hedeflerini aynı anda ele alan çok amaçlı optimizasyon çalışmaları sınırlıdır. Aynı zamanda etkili ve yüksek hızlı CNC sistemleri için incelenmesi gerekmektedir. CNC tezgâhlarda yalnızca delik delme işlemleri için bu kısıtları dikkate alan yeni bir optimizasyon modeline odaklanılmıştır [57].

Yukarıdaki çalışmaları büyük bir motivasyon kaynağı olarak gören bu tezin temel katkısı; CNC parça işleme süreçlerinde araç yolu uzunluğunu en aza indirgemeyi ve yolun düzgünlüğünü artırmayı hedefleyen, ayrıca engellerden kaçınarak çok amaçlı optimal bir takım yolu için evrimsel algoritma yaklaşımının sunulmasıdır. Bu katkı yenilikçi bir yaklaşım sunarak CNC makinelerinin takım yolu problemini çözmek için NSGA-II'nin etkili bir şekilde kullanımının avantajlarını ortaya çıkarmaktadır. NSGA-II, güçlü optimizasyon yetenekleriyle tanınır ve çeşitli optimizasyon problemlerini başarıyla ele alır [58]. Deneysel sonuçlar NSGA-II tarafından elde edilen baskın olmayan çözümlerin kısa ve daha düzgün bir yol seçeneği sunduğunu göstermektedir. Bu çalışmada takım yolu problemleri hem simülasyon hem de deneysel ortamlarda test edilmiştir. Ayrıca çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) [59], bu problemin çözümü için NSGA-II'nin baskın olmayan sıralama verimliliğini ve uygunluğunu değerlendirmek için kullanılmıştır. Birden çok hedef için yolları optimize etme amacı olduğundan hedefler arasında Pareto etkinlik durumu çerçevesinde bir çözüm bulunması tercih edilir. Ancak MOGA, önemli seçim baskısı yaratabilen paylaşılan fonksiyonların seçilmesine ağırlık vererek erken yakınsamaya neden olabilir [60]. Ayrıca modellenen bir CNC tezgâh üzerinde eğri uydurma ve interpolasyon çalışmaları gerçekleştirilerek yörünge planlama çalışmalarına katkı sağlanmıştır.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Motivasyon

Birçok ulusal ve uluslararası yayınlar üzerinden literatür araştırması yapılarak çok eksenli CNC işleme tezgâhlarında ve robot sistemlerinde kullanılan çok eksenli hareket kontrolörü uygulamaları ve bunların kontrol yöntemleri irdelenmiştir. Bu yayınlarda sunulan kontrol yöntemlerinin özellikle yenilikçi yaklaşımı, çözüm sunulan problemi, güçlü ve zayıf yönleri üzerinde durularak literatüre katkı

sağlayabilecek tasarımlar araştırılmıştır. Bu çalışmada evrimsel tabanlı kontrol optimizasyon yöntemleri kullanılarak CNC tezgâhlarda sık karşılaşılan problemlere yönelik optimal parametre seçimleri yapılmıştır.

Literatürde yapılan bu çalışmalar genellikle CNC işlemede görülen sadece tek probleme yönelik çözümler üretmektedir. CNC üretim verimliliğini etkileyen işleme doğruluğu, yüzey düzgünlüğü ve yüksek işlem hızı gibi faktörleri aynı anda optimum değerlerde elde etmek için kullanılan optimizasyon yöntemleri daha az yaygındır. Özellikle çok eksenli hareket kontrolörü parametre seçimi ve optimizasyonuna dayalı akıllı işleme sistemleri hakkında sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu durum, kompleks ve çok boyutlu problemlerin çözümünde yetersiz kalmaktadır. CNC işlemede gerekli ürün kalitesi, önerilen parametre seçimi ve optimizasyonuna dayalı akıllı çok eksenli hareket kontrolörü sistemi tarafından sağlanmaktadır. Bu çalışmada sistemin ihtiyacına göre evrimsel algoritma tabanlı tasarımlarla optimum çözümler hedeflenmektedir.

Çalışmadaki ana motivasyon, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak gerçek bir CNC tezgâh işleme kodu üzerinde optimizasyon yapılmasıdır. Literatürdeki evrimsel algoritmalar ile kurgulanan mevcut çalışmalar genellikle başlangıç ve bitiş noktaları verilen bir haritada yol planlaması üzerine yoğunlaşmaktadır. Çoğu çalışma teorik modeller veya simülasyonlar üzerinden yapılmakta olup gerçek CNC tezgâh kodları üzerinde optimizasyon çalışmaları eksiktir. Önerilen bu optimizasyon çözümleri daha çok mobil robotlar gibi araçlar için uygundur. Bu çalışmada engellerin bulunduğu bir harita üzerinde GA, ABC, PSO ve NSGA-II algoritmaları ile yol planlama yaklaşımları gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen karşılaştırmalı analizlere dayanarak NSGA-II algoritmasının çok amaçlı problem üzerinde başarısı göz önüne sunulmuştur. Bir sonraki çok amaçlı yol planlama problemi için NSGA-II algoritması geliştirilerek Elitist-NSGA-II yaklaşımı sunularak CNC takım yolu üzerinde yol kısaltma ve yol düzgünlüğü problemleri üzerine başarılı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Talaşlı kaldırma işlemleri için yol planlaması tamamen değiştirilemediğinden CNC tezgâh işleme sürecinde mevcut kod üzerinde kesme yapmayan hareket optimizasyonu yapılarak verimlilik artırılmaktadır.

Ayrıca CNC işlemlerinde çevrimiçi optimizasyon stratejileri üzerine literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada modellenen bir CNC tezgâh üzerinde

eğri uydurma ve interpolasyon çalışmaları gerçekleştirilerek yörünge planlama çalışmalarına destek sağlanmıştır. Böylece üretimde çevrimiçi kullanılan CNC tezgâhlar üzerinde daha etkili ve verimli işleme stratejileri geliştirilmek için literatüre katkılar sunulmaktadır.

2
TAKIM TEZGÂHLARINDA YÖRÜNGE PLANLAMA ÇALIŞMALARI

2.1 CNC Takım Tezgâh Sistemleri

CNC tezgâh sistemi, bir bilgisayar tarafından kontrol edilen bir kontrol ünitesi, motorlar ve çevresel algılayıcılardan oluşur. Kullanıcı veya operatör, bir bilgisayar ara yüzü aracılığıyla tasarladıkları parçaların katı modelini ve üretim dosyasını oluşturur. Ardından bu bilgileri CNC makinesine ileterek parçaların üretimini sağlarlar. CNC makinesi bu talimatları alarak malzeme üzerinde kesme, delme, frezeleme veya diğer işleme adımlarını otomatik olarak gerçekleştirir.

CNC teknolojisi, bilgisayar tabanlı kontrol sistemlerini kullanarak makineleri otomatik olarak yönetme sürecidir. Bu makineler genellikle torna tezgâhları, freze makineleri, lazer kesim makineleri, su jeti kesim makineleri gibi birçok endüstriyel üretim ve işleme donanımını içerir [61].

CNC teknolojisinin avantajları şunlardır:

- Hassasiyet: CNC makineleri, yüksek hassasiyetle çalışabilir ve tekrarlanabilir sonuçlar üretebilir.
- Üretkenlik: Otomatik kontrol sayesinde işleme süreçleri daha hızlı ve verimli hale gelir.
- Çeşitlilik: CNC makineleri, farklı malzemelerde ve karmaşık tasarımlarda çalışabilme yeteneğine sahiptir.
- Teknolojik Esneklik: Yazılım aracılığıyla güncellenerek farklı işlemleri gerçekleştirebilmek için programlanabilir makinelerdir.

CNC teknolojisi bu avantajları sayesinde endüstriyel üretim, metal işleme, ahşap işleme, otomotiv, havacılık ve birçok başka sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2 CNC Takım Tezgâhlarında Takım Yolu

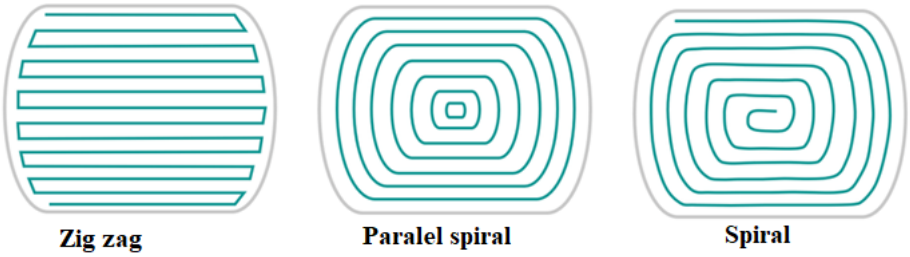
CNC tezgâhlarda takım yolu, bir CNC makinesinin belirli bir parça veya iş parçasını işlerken takip ettiği yolun diğer bir ifade ile uç işlevcinin hareket ettiği

yörüngenin planlanmasıdır. CAD programında tasarlanan model CAM programına iletilerek bu platformda üretilecek parçanın takım yolu oluşturulur [62].

Takım yolu oluşturulurken dikkate alınması gereken önemli hususlar aşağıda sıralanmıştır.

- Malzeme özellikleri; kesme hızı, yükseklik ve diğer işleme parametrelerini belirler. Takım yolu bu özelliklere uygun olarak oluşturulmalıdır.
- İş parçası geometrisi, işlenecek parçanın şekli ve boyutları takım yolunun nasıl oluşturulacağını etkiler. Karmaşık geometriler takım yolunun daha dikkatlice planlanmasını gerektirebilir.
- Kesici uç türü; freze, matkap, torna ucu vb. uç türü özellikleri takım yolu oluşturulurken dikkate alınmalıdır. Kesici ucun malzemeyle etkileşimini optimize etmek için uygun yollar seçilmelidir.
- İşleme stratejileri, malzemenin nasıl işleneceğini belirler.

Takım yolu oluşturulduktan sonra bu bilgiler bir CNC tezgâha gönderilir. CNC tezgâh belirlenen yol boyunca kesme, delme veya diğer işleme adımlarını gerçekleştirir. Takım yolunun doğru bir şekilde tasarlanması işleme sürecinin doğruluğunu, verimliliğini ve güvenilirliğini büyük ölçüde etkiler [63]. Takım yolu oluşturulurken sıklıkla tercih edilen desen modelleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 CNC tezgâhlarda sık kullanılan takım yolu desenleri [64]

2.3 CNC Takım Tezgâhlarında G-Kod Tanımı

G-kod, CNC tezgâh sistemlerinde kullanılan bir programlama dilidir. CNC makinelerine bir iş parçasını işleme veya kesme işlemleri gibi belirli görevleri gerçekleştirmesi için talimatları iletmek için kullanılır. G-kod, temel olarak CNC makinesine hareket ve işleme komutlarını ileten bir dizi sayısal değerden oluşur.

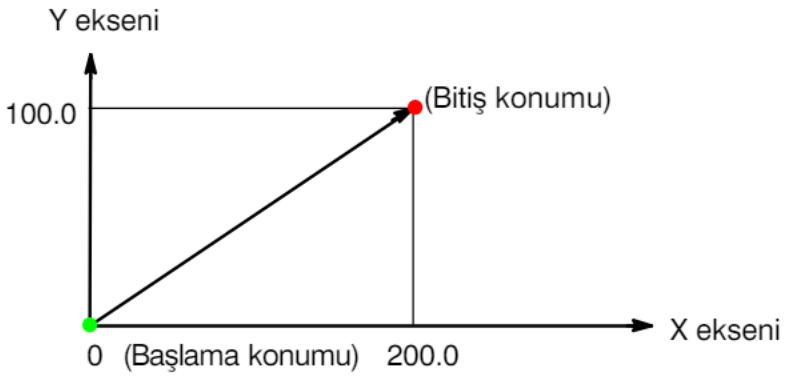
Bu değerler genellikle bir metin dosyası içinde saklanır. Oluşturulan dosya CNC makinesine yüklenerek çalıştırılır. Her G-kod komutu belirli bir işleme adımını veya hareketi temsil eder. Bir frezeleme işlemi için G-kod, frezenin hangi yolları takip edeceğini, hangi hızda döneceğini ve malzemeye ne kadar derinlemesine gireceğini belirler. Aşağıdaki madde listesinde belirtildiği gibi G-kod komutları standartlaştırılmış bir formata sahiptir. Genellikle harf ve sayı kombinasyonlarından oluşur.

- G00: Hızlı hareket komutu
- G01: Doğrusal hareket komutu
- G02 ve G03: Dairesel hareket komutları
- M03 ve M05: Mil (spindle) kontrol komutları
- M08 ve M09: Soğutma sistemi kontrol komutları

G kodları, CNC programlamanın temel taşlarını oluşturur. İlk olarak 1960'larda Elektronik Endüstri Birliği (Electronics Industry Association) tarafından RS-274D adı altında tanıtılmıştır. Kodların "G" harfi ile başlamalarından dolayı endüstride G-kod olarak tanınmaktadır. Bu kodlar bir CNC makinesinin bir parçayı nasıl üreteceğini belirleyen hareketleri kontrol eder. G-kodlarını elle yazmak mümkündür. Ancak bu yöntem sadece basit işler için uygulanabilir. Daha karmaşık ve detaylı üretim işlemleri için CAM yazılımlarının kullanılması gereklidir [65]. CNC tezgâhlar için G-kodu listesi ve açıklamaları Ek-A'da verilmiştir [66].

Her CNC tezgâh, kullanılan kontrol sistemine ve donanım özelliklerine bağlı olarak belirli bir G-kodu yorumlama yeteneğine sahiptir. Bu nedenle kullanıcılar spesifik bir makineyle uyumlu G-kod üretmek için farklı yöntemler uygulayabilir. CNC programcıları genellikle CAD/CAM yazılımları kullanarak tasarım yapar. Bu programlar G-kodları otomatik olarak oluşturabilir. Operatör ve kullanıcıların yorumlamalarına bağlı olarak aynı işlemi yapan G-kod değişebilir.

Şekil 2.2'de (0, 0) başlangıç noktasından, (200, 100) bitiş noktasına doğrusal interpolasyon yapan bir G-kod satırı olan (G91) G01komutunun bir çalışma örneği sunulmuştur. Bu çalışmanın G-kodunda yer alan "(G91) G01 X200.0 Y100.0 F200.0;" komut satırının detaylı açıklaması aşağıda yer alan maddelerde verilmiştir.



Şekil 2.2 Örnek G-Kod simülasyon gösterimi

- G91: Bu komut artımlı veya göreli konumlandırma ayarını belirtir. Bu ayar yapıldığında hareket komutları mevcut konumdan belirtilen değerler kadar hareket eder.
- G01: Bu komut doğrusal interpolasyonu ifade eder. CNC makinesi belirtilen X ve Y koordinatlarına doğrusal bir çizgi boyunca hareket eder.
- X200.0: X ekseni boyunca 200.0 birimlik bir hareketi ifade eder. G91 komutu aktif olduğu için bu hareket mevcut X pozisyonundan 200 birim ileri hareket edileceği anlamına gelir.
- Y100.0: Y ekseni boyunca 100.0 birimlik bir hareketi ifade eder. Mevcut Y pozisyonundan 100 birim ileri hareket edileceğini ifade eder.
- F200.0: Bu komut besleme hızını (feed rate) belirtir. Burada besleme hızı 200.0 birim/dakika olarak ayarlanmıştır. Bu değer takımın malzeme üzerinde hareket etme hızını belirler.

Bu komut dizisi CNC makinesinin, saatte 200 birim hızla bulunduğu mevcut konumundan başlayarak X ekseni boyunca 200 birim ve Y ekseni boyunca 100 birim ileri doğru bir çizgi çizmesini sağlar.

CNC takım tezgâhlarında G-koda bağlı optimize edilen parametreler genellikle iş parçasının işlenmesi sürecini etkileyen ve iş parçasının istenen özelliklerini elde etmeye yönelik olan bir dizi faktörü içerir [66]. G-kod optimizasyonu için bazı temel stratejiler aşağıdaki sonraki alt bölümlerde sunulmuştur.

2.3.1 Genel Takım Yolu Optimizasyonu

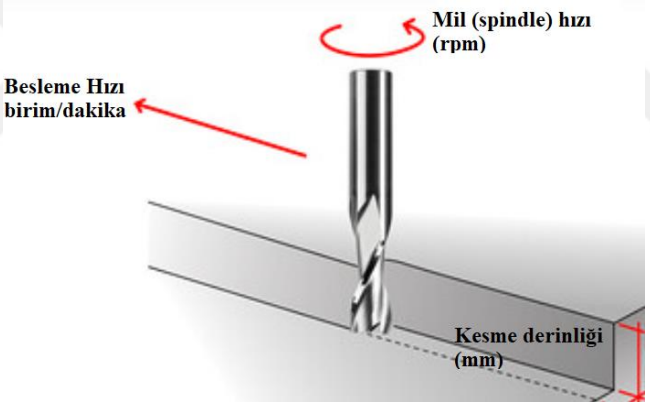
CNC makinesinin kesici uç hareketlerini ve işleme yollarını daha etkili, verimli ve hızlı hale getirmek amacıyla tasarlanan bir süreçtir. Bu optimizasyon genellikle daha kaliteli sonuçlar elde etmeye yardımcı olur. Takım yolu optimizasyonu ile

kesici uç yolu optimize edilerek malzeme üzerindeki gereksiz geçişler ve tekrarlar önlenir. Bu sayede iş parçasının yüzey kalitesi artırılabilir ve makine daha verimli hale getirilebilir.

Bu çalışmada G-kod optimizasyonu ile bir CNC takım yolunun optimize edilmesi amaçlanmıştır. CNC makinesinin hareketlerini ve işlemlerini daha etkili ve verimli hale getirmek amacıyla G-kod programının iyileştirilmektedir. Bu optimizasyon tekniği ile üretkenlik artırabilir, işleme sürelerini azaltabilir ve malzeme kullanımı optimize edebilir.

2.3.2 Hız Optimizasyonu

CNC tezgâhın sahip olduğu hareket hızları iş parçasının işlenme sürecinde önemli faktörlerdir. G-kod içindeki ilgili hız komutları gözden geçirilerek işleme hızları optimize edilebilir. Şekil 2.3'de CNC'nin optimize edilebilecek hız parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Uç işlevcide hız optimizasyonu için önemli parametrelerin gösterimi [67]

2.3.3 Yol Düzeltme ve Kısaltma Optimizasyonu

G-kodun içinde yer alan gereksiz veya fazla olan hareketler ve bu hareketlere bağlı yollar belirlenerek düzeltilebilir. Bu düzenleme makine işleme süresini ve makine üzerindeki aşınma ve yıpranmayı azaltır.

2.3.4 Hareket Komutları Optimizasyonu

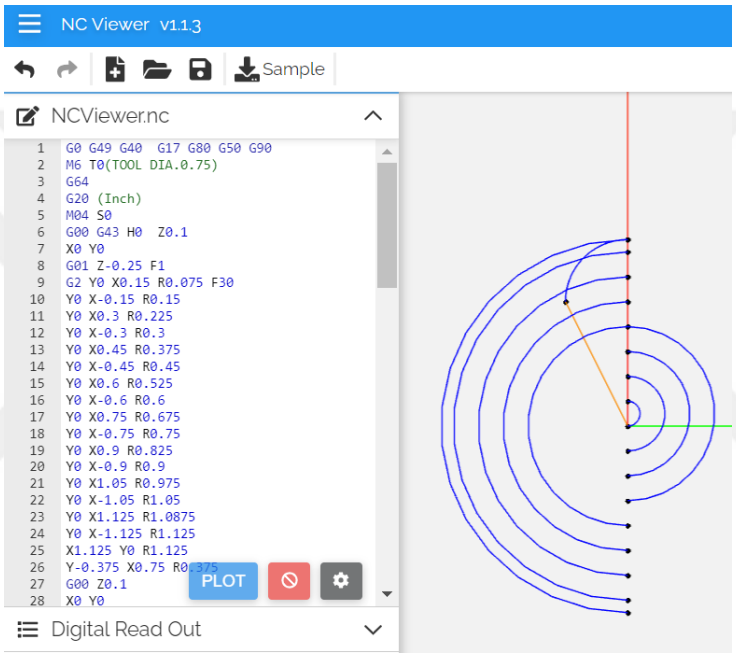
G-kod içindeki ardışık hareket komutları analiz edilerek daha efektif hareket yolları belirlenebilir. Örneğin bir doğrusal hareket yerine dairesel bir hareketin kullanılması gerekip gerekmediği değerlendirilebilir.

2.3.5 Parça Sıralama Optimizasyonu

Birden fazla parçanın işlenmesi sırasında G-kod düzenlenerek daha az araç değişimi veya makine hareketi sağlanarak işleme süreleri azaltılabilir.

2.3.6 Makine Yüksek Performans Ayarları Optimizasyonu

Makine özelliklerine ve kontrol sistemine bağlı olarak bazı özel komutlar veya parametre ayarlamaları yaparak daha yüksek performans elde edilebilir. Burada belirtilen CNC yol optimizasyonları kullanıcılar tarafından manuel olarak yapılması zor kavramlardır.



Şekil 2.4 Örnek G-Kod simülasyon gösterimi

CAM programlarında parça işleme için gerekli adımlar için G-kod üretilirken genellikle operatörün veya kullanıcının bilgi ve deneyimlerinden faydalanarak tasarlanır. Tez çalışması için oluşturulan örnek G-kodun çıktıları NC Viewer simülasyon programında Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

2.4 CNC Takım Tezgâhlarında G-Kod Çalışma Prensipleri

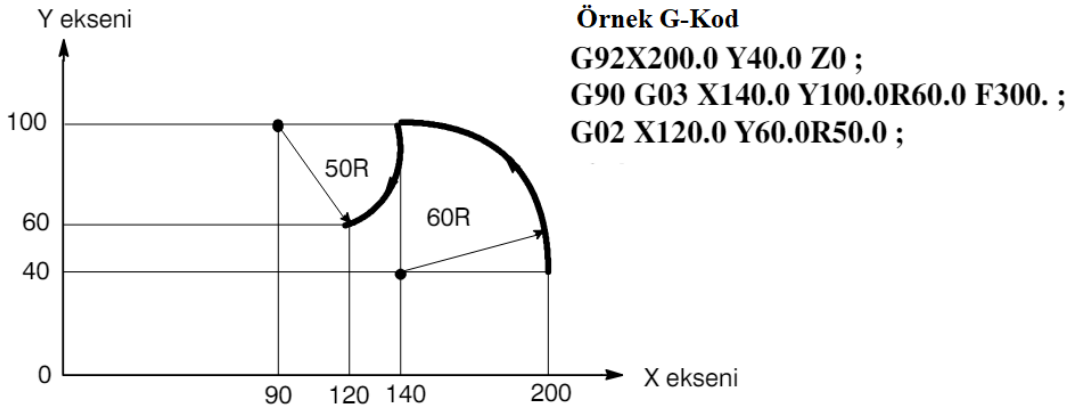
CAM programlarında tasarlanan G-kodlar aşağıdaki adımlar doğrultusunda CNC tezgâhlarda çalıştırılarak CAD dosyasındaki tasarımı parçalarını üretir hale gelirler.

- CAD Tasarım Aşaması: İlk adım olarak bir ürün veya parçanın iki boyutta çizimleri ya da üç boyutta modelleri tasarlanır. Bu tasarımlar için genellikle CAD programları kullanılır.
- CAM Tasarım Aşaması: CAD tasarımları bir CAM programında CNC makinesi tarafından anlaşılabilir hale gelmesi için G-koda dönüştürülür. CAM programı, malzeme, kesici uçlar, işleme stratejileri ve diğer işleme parametreleri gibi faktörleri dikkate alarak G-kodu oluşturur.
- G-Kod Üretimi: CAM yazılımı, kesme, delme, frezeleme gibi işleme adımlarını belirleyen bir dizi G-kod üretir. Üretilen her G-kod komut satırı CNC makinesinin belirli bir işlemi gerçekleştirmesini sağlar.

2.5 CNC Takım Tezgâhlarında G-Kod Yükleme ve Çalıştırma

G-kod dosyası üretim süreci başlamadan önce CNC makinesine yüklenir. Bu dosya makinenin ne yapması gerektiğini belirten komutları içerir. CNC makinesi iş parçasının pozisyonunu ve boyutunu belirlemek için referans noktalarına yönlendirilir. İlgili kesici uç ve diğer araç takımları ayarlanarak konumlandırılır. Operatör, CNC makinesini başlatarak G-kod talimatlarını uygular. CNC makinesi belirtilen yollarda ve hızlarda hareket ederek kesme, delme veya frezeleme işlemlerini gerçekleştirir. CNC makinesi işleme sürecini izleyerek iş parçasını belirlenen tasarıma uygun olarak şekillendirir. Operatör işleme sürecini takip eder. Gerekli durumlarda parametreleri tekrar ayarlayarak kontrolü sağlar. İşleme tamamlandığında CNC makinesi durdurulur. Operatör iş parçasını kontrol eder. İş parçasının kalitesini değerlendirerek gerektiğinde son iyileştirmeler yapılır.

Bu adımlar genel olarak bir CNC işleme sürecinin temelini oluşturur. G-kod bir CNC makinesini programlamak ve yönlendirmek için kritik bir rol oynar. Bu nedenle doğru ve optimize edilmiş bir G-kod üretkenlik, hassasiyet ve verimlilik açısından önemlidir.



Şekil 2.5 Üretilen G-kodun CNC tezgâhlarda kullanımı

Şekil 2.5'te iki boyutlu bir uzayda tanımlanan G-Kod ile kesim işlemleri yapılmaktadır. Örnek G-kod, CNC makinesi üzerinde çeşitli hareketler yapılmasını sağlayan komutları içerir. Aşağıda her bir komut satırı için detaylı açıklamalar yer almaktadır:

G92 X200.0 Y40.0 Z0;

- G92: Bu komut belirtilen koordinatları geçici referans noktası olarak ayarlar. Bu koda göre makinenin mevcut konumu X=200.0, Y=40.0, Z=0 olarak sıfırlanır.
- X200.0 Y40.0 Z0: X, Y ve Z eksenlerinde yeni sıfır noktasını ayarlanır.

G90 G03 X140.0 Y100.0 R60.0 F300.;

- G90: Mutlak konumlandırma ayarını etkinleştirir. Bu ayar ile tüm koordinatlar ana başlangıç noktasına göre hesaplanır.
- G03: Saat yönünün tersine yuvarlak veya dairesel hareketi başlatır. Bu komut bir ark veya çember çizmeyi sağlar.
- X140.0 Y100.0: Bu parçada arkın bitiş noktasıdır.
- R60.0: Arkın yarıçapı 60 birimdir.
- F300: İşlem sırasında kullanılacak besleme hızı dakikada 300 birimdir.

G02 X120.0 Y60.0 R50.0;

- G02: Saat yönünde dairesel hareketi başlatır. Bu komutla bir ark veya çember çizimi sağlanır.
- X120.0 Y60.0: Arkın bitiş noktasıdır.
- R50.0: Arkın yarıçapı 50 birimdir.

Verilen G-kod örneğinde komutlar, CNC makinesinin belirli bir düzende ve geometrik şekillerde hareket etmesini sağlayarak iş parçasının istenilen şekilde işlenmesini sağlar. İşleme sürecinin başarıyla tamamlanabilmesi için kodların doğru bir şekilde yazılması ve parametrelerin kesinlikle doğru ayarlanması gereklidir.

2.6 CNC Takım Tezgâhlarında Eğri Uydurma Yöntemleri

CNC tezgâhlarında eğri uydurma yöntemleri karmaşık geometrilerin ve yüzeylerin işlenmesinde kritik bir rol oynar. Bu teknikler, işlenen parçalarda istenen hassasiyet ve yüzey kalitesini sağlamak için kullanılır. Doğrusal (G01) ve dairesel (G02, G03) interpolasyonlar basit geometriler için etkili çözümler sunarken daha kompleks yüzeylerin üretilmesi için B-Spline, Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) ve Bezier eğrileri gibi gelişmiş teknikler devreye girer [68]. Özellikle B-Spline ve NURBS interpolasyonları CAD/CAM yazılımlarında sıklıkla tercih edilir. Bu yöntem sayesinde kontrol noktaları kullanılarak yüzeyler üzerinde sürekli ve pürüzsüz geçişler yaratılabilir [68], [69]. Eğri uydurma yöntemleri yüksek düzeyde yüzey düzgünlüğü gerektiren uygulamalar için idealdir. Bu yöntemler modern üretim süreçlerinde yüksek hassasiyet gerektiren otomotiv ve havacılık gibi endüstrilerde standart hale gelmiştir. Eğri uydurma tekniklerinin doğru uygulanması CNC işleme süreçlerinin verimliliğini artırırken malzeme israfını azaltır ve ürün kalitesini yükseltir. Bu tekniklerin gelişimi ve uygulanması üretim tekniklerinin önemli bir parçası olarak öne çıkmaktadır [70].

CNC tezgâhlarında eğri uydurma yöntemleri G-kod üzerinden yapılabilir. Literatür çalışmalarında CNC tezgâhlarının hız ve hassasiyet kapasitelerini artırırken titreşimsiz ve pürüzsüz işleme çalışmalarını dengede tutarak optimum işleme koşullarını sağlamak önemli konular arasındadır. Ayrıca parçalarda istenen yumuşak geçişler çoğunlukla dairesel hareket komutları ile elde edilmektedir. Gelişmiş eğri uydurma yöntemleri dairesel geçişleri doğrusal komutlarla birleştirerek daha hassas ve pürüzsüz sonuçlar elde edebilmektedir. Bu sayede CNC tezgâhlar doğrusal hareketler üzerinde daha iyi kontrol sahibi olmaktadır. Bu yöntemde işlenen parçalar üzerinde ideal eğrilerin oluşturulması için kullanılan teknikler üretim kalitesini doğrudan etkileyen faktörler arasındadır.

CNC tezgâhlardaki üretim süreçlerini daha verimli hale getiren bu olumlu çalışmalar araştırmacıları bu konuda yeni yöntemler geliştirmeye yönlendirmektedir [71], [72].

Literatürde eğri uydurma yöntemleri için CNC tezgâhlarının üretim süreçlerinde nasıl daha hassas kontrol sağlanabileceği üzerine çalışmalara yer verilmektedir. Çok dereceli eğri uydurma yöntemleri kullanılarak daha hassas yörüngeler oluşturulmuştur. Bu çalışmalar sayesinde CNC tezgâhlarının eksen motorlarının hız, ivme ve sarsınım limitlerini aşmadan etkin bir şekilde kontrol edilmesi mümkün olmuştur. Araştırmalarda kullanılan eğri uydurma teknikleri yörünge optimizasyonlarını daha hassas konuma getirerek CNC tezgâhının üretim sürecinin kontrolünü önemli ölçüde iyileştirmiştir. Yapılan bu işlemle üretilen parçalar üzerindeki hassasiyet ve işleme kalitesi artırılmış. Böylece CNC işlemlerinde yeni bir verimlilik standardı belirlenmiştir [73], [74].

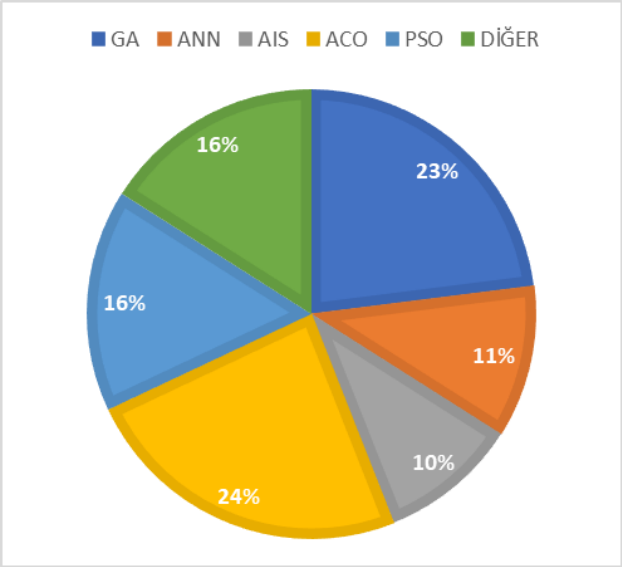
2.7 CNC Takım Tezgâhlarında Takım Yolu Planlama

CNC tezgâhında yol planlama CNC işlemlerinin gerçekleştirilmesi için gerekli olan hareket yolunun hesaplanma süreci için gereklidir. Bu hesaplama ile takımın nasıl hareket edeceği belirlenir. Yol planlamada iş parçasının tasarım verileri ve işleme gereksinimleri dikkate alınır. CNC tezgâhlarda işlemlerinin adım adım nasıl gerçekleştirileceği belirlenerek kesici takımın iş parçası üzerindeki hareket yolu tanımlanır. Yol planlama sürecinde işlemlerinin doğru ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak önemli bir konudur. Yol planlama süreci, CNC tezgâhında karmaşık geometriye sahip iş parçasının işlenmesini mümkün kılarken tezgâhın performansını yüksek düzeyde kullanmayı hedefler. Bu nedenle yol planlama imalat süreçlerinde kritik bir öneme sahiptir [75].

CAD/CAM sistemleri tarafından işleme geometrisinin tanımlandığı bir parçanın CNC sistemlerinde yörünge oluşturma süreci üç ana aşamadan oluşur. Birinci aşamada takım yolu planlama yapılır. İkinci aşamada yol hareketinin planlanması yapılarak hareket profili oluşturulur. Hareket profili, motor sürücülerinin hız, ivme ve sarsım sınırlamaları dikkate alınarak CNC sistemi tarafından planlanır. Son aşama ise gerçek zamanlı interpolasyon yöntemi uygulanır.

2.8 CNC Tezgâhlarda En Çok Tercih Edilen Takım Yolu Optimizasyon Yöntemleri

CNC tezgâhlar, üretim süreçlerinde yüksek hassasiyetli işleme elde etmek için güvenilir ve tekrarlanabilir yöntemler sundukları için yaygın olarak kullanılmaktadır. CNC kesim işlemi sırasında takım yolu verimliliği artırmak ve üretim maliyetlerini azaltmak için kesme koşullarının optimize eden birçok yöntem gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.6 CNC işleme faktörlerini iyileştirmek için kullanılan optimizasyon yöntemlerinin yüzdelik bilgileri [17]

Bu amaçla çeşitli algoritma yöntemlerinin CNC işleme sistemleri içindeki uygulanabilirliklerini açıklayarak takım yolu optimizasyonu alanına odaklanılmıştır. Özellikle bu alanda genetik algoritmalar (GA), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), yapay arı kolonisi (ABC), benzetilmiş tavlama (SA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve hibrit yöntemler önerilmektedir. Örnek olarak CNC takım yolu optimizasyonu için sık tercih edilen yöntemlerin yüzde bilgileri Şekil 2.6'da verilmiştir [76].

1950'lerin ortalarından günümüze kadar doğayı taklit ederek zorlu problemleri ele alarak makineleri akıllı hale getiren pratik uygulamalara sahip birçok yöntem geliştirmiştir [77]. Çalışmanın bu bölümünde CNC takım yolu optimizasyonunu gerçekleştirmek için uygulanan bu yöntemler hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Ayrıca ilerleyen bölümlerde bu yöntemlerin karşılaştırmalı analizleri yapılarak

gelecekte diğer araştırmacıların CNC işleme operasyonlarında uygun yöntemleri belirlemelerine faydalı olacak çalışmalar yapılmıştır.

2.8.1 Genetik Algoritma

İlk olarak 1970'lerde geliştirilen GA, Darwin'in evrimsel teorisine dayanarak biyolojik evrim sürecini taklit eden ve problemleri çözmek için optimize edilmiş çözümler üreten bir algoritma olarak tanımlanır. GA, genellikle doğal seleksiyon, çaprazlama, mutasyon gibi kavramları kullanarak işleme süreçlerinin optimize edilmesini sağlar [78].

GA'nın çalışma prensibinde bir başlangıç popülasyonu oluşturularak popülasyon tekrarlı olarak çoğaltılır. Her tekrarda mevcut popülasyondan yeni bireyler oluşturulur. Oluşturulan bireyler belirlenen kriterlere uygun olarak değerlendirilerek daha iyi bireyler olarak seçilir. Seçilen bireyler çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlerle değiştirilebilir. Böylece yeni nesil için en iyi popülasyon oluşturulur. Bu işlemler belirli bir sonlandırma kriterine kadar devam eder [79].

GA'lar, çeşitli optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılabilir [80]. Özellikle karmaşık, çok boyutlu ve çok değişkenli problemler için uygundurlar. GA'lar, günümüzde optimizasyon algoritmaları alanında önemli bir araştırma tekniği haline gelmiştir. CNC işleme alanında birçok optimizasyon probleminde sıklıkla tercih edilmektedir [81].

2.8.2 Karınca Kolonisi Optimizasyonu

ACO, doğada karıncaların yiyecek kaynaklarını bulma ve yuvalarına geri dönme sürecindeki davranışlarını taklit eden bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma bir problemi çözmek için karıncaların doğadaki davranışlarını modelleyerek çalışır. ACO'nun temel prensibine göre çözüm alanında dolaşan karıncalar iz bırakarak diğer karıncaların hangi yolun daha iyi olduğunu belirlemelerine yardımcı olur. Daha fazla iz bırakılan yol diğer karıncalar tarafından daha çok tercih edilerek zamanla daha iyi çözüm kümesi haline gelir. [82].

ACO, CNC işlemede optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır. Özellikle gezgin satıcı problemi gibi çözümleriyle birlikte pratikte daha zor olan CNC takım yolu optimizasyon problemlerinde etkili bir şekilde kullanılır [83].

2.8.3 Parçacık Sürü Optimizasyonu

PSO, doğadaki sürü davranışlarını taklit ederek probleme en iyi çözümü bulmayı amaçlayan bir optimizasyon yöntemidir. PSO'nun çalışma prensibine göre parçacıkların problem alanında hareket ederek en iyi çözümü bulmak için birbirleriyle etkileşim halinde olur. Her parçacık kendi yeni konumlarını, kendi en iyi konumuyla ve tüm parçacıkların en iyi konumlarıyla karşılaştırarak belirler. Her tekrarda parçacıklar problem alanında en iyi konumlarını ve hızlarını buna göre güncellerler. Böylelikle parçacıklar problem alanında en iyi çözüme yakınsar. Sonlandırma kriterine kadar tekrarlayıcı olarak çalışır [84].

PSO, karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. PSO, CNC takım yolup optimizasyon problemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir [85].

2.8.4 Yapay Bağışıklık Sistemi

AIS, insan bağışıklık sisteminin işleyişini taklit ederek problemi çözen bir algoritma türüdür. AIS'e ilham olan antijen terimi, bağışıklık sistemi tarafından tanınarak tepki oluşturulan herhangi bir yabancı madde veya mikroorganizma olarak tanımlanır. AIS, insan doğal bağışıklık sisteminde bulunan hücresel ve moleküler mekanizmaları modellemeye dayanır.

AIS'in temel amacı belirli bir problem alanında antijenleri tanımlayarak bunlara karşı tepki oluşturmaktır. Bağışıklık sisteminin öğrenme, adaptasyon ve hafıza yeteneklerini taklit ederek problemi çözmeye çalışır. Bir AIS algoritması belirli bir problemle karşılaştığı antijenlere karşı çözümler üretir. Bu tepkiler, belirli bir hedefe ulaşmak için uygun çözümleri bulma yeteneğiyle tanımlanmıştır.

AIS, dinamik ve karmaşık ortamlarda çözüm bulma yeteneği sayesinde CNC takım yolu optimizasyon alanında da sıklıkla tercih edilir [86].

2.8.5 Yapay Sinir Ağları

ANN, insan beyninin çalışma prensiplerini taklit etmeye çalışarak bilgi işleme ve öğrenme için kullanılan bir yapay zekâ modelidir. ANN, nöron olarak adlandırılan sinir hücresinin bir ağı gibi davranan matematiksel ve istatistiksel modellerden oluşur. ANN'ler, büyük miktarda veriyi işleyerek sınıflandırma ve karar alma gibi çeşitli görevleri yerine getirmek için giriş verilerini katmanlar halindeki sinir

hücrelerine ileterek belirli matematiksel işlemler gerçekleştirir. Bu işlemler neticesinde ağın çıktı katmanından istenilen sonuçlar elde edilir. ANN'nin eğitimi sırasında ağa birçok örnek giriş ve çıkış verilerek problem çözümü için gerekli olan parametreler ve ağırlıklar için öğrenme süreçleri gerçekleştirilir. Bu yöntemle ANN, veriye dayalı örüntülerin tanınması, sınıflandırılması ve tahmini gibi karmaşık görevleri başarabilir [87], [88].

Yapay sinir ağları da diğer yöntemler gibi çeşitli CNC takım yolu optimizasyon alanında yaygın olarak kullanılır. Örneğin bir çalışmada CNC tezgâhında yüzey pürüzlülüğünün tahmini ve kontrolü için bir ANN yaklaşımı sunulmaktadır. CNC tezgâhında deneyler yapılarak sinir ağının eğitimi ve test edilmesi için veriler elde edilmiştir. Deneylerde kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızı olmak üzere üç kesme parametresine kullanılmıştır. İleri beslemeli çok katmanlı bir sinir ağı geliştirilerek eğitilmiştir [89].

2.9 CNC Takım Tezgâhlarında Kinematik Yapılandırma Çalışmaları

CNC tezgâhları ve robotik sistemler, modern üretim teknolojilerinin temel bileşenleridir. Her iki sistem de eksenlerin doğru kinematik yapılandırılması ile yüksek hassasiyet ve verimlilik sağlar. Bu sistemlerin kinematiğinde hareket, hız, ivme analizi çalışmaları ile ilgilenilir [90].

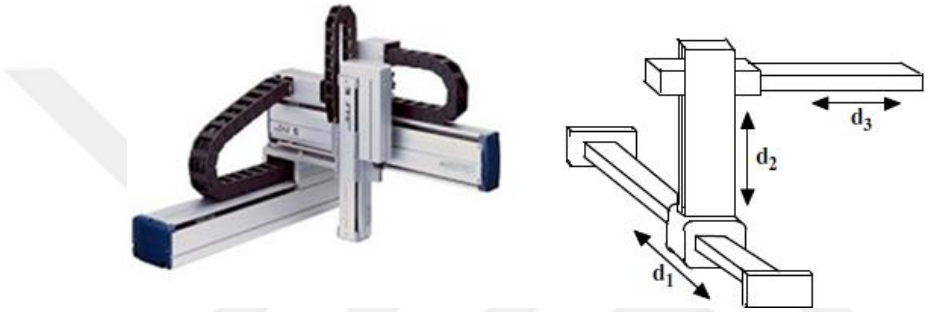
Endüstride CNC tezgâhlarda kartezyen koordinat sistemine göre eksenler belirlenir. CNC tezgâhın sahip olduğu kesici takım ve tabla hareketlerine göre eksenleri tanımlanır. CNC tezgâhlarında kinematik dönüşüm işlemleri eksen sayısı ve hareket tipine göre yapılır. Robotik sistemlerde ise kinematik yapılandırma robotun hareket yeteneklerini ve işlevselliğini belirler. Endüstriyel robotlar, çeşitli eksen konfigürasyonlarına sahip olup robot kollarının hareket kabiliyetleri doğrusal veya döner eksenler üzerinden tanımlanır. Robotik sistemlerde olduğu gibi CNC tezgâhlarda da kinematik analizler, robotun hareket yollarını optimize etmek ve işlevselliğini artırmak amacıyla yapılır.

Bu bölümde modellenen CNC tezgâhın kartezyen robotik sistemin kinematik yapılandırmaları ele alınarak her iki sistemin ortak özellikleri incelenecektir. CNC tezgâhlardaki eksenlerin hareket kabiliyetleri, kinematik analizler ve yapılandırma

örnekleri üzerinden detaylandırılacaktır. Ayrıca bu iki sistemin entegrasyonunda ortak kullanılan kinematik yöntemler ve evrimsel algoritmalar gibi optimizasyon teknikleri de tartışılacaktır.

2.9.1 Serbestlik Derecelerine Göre Sistem Tanımlamaları

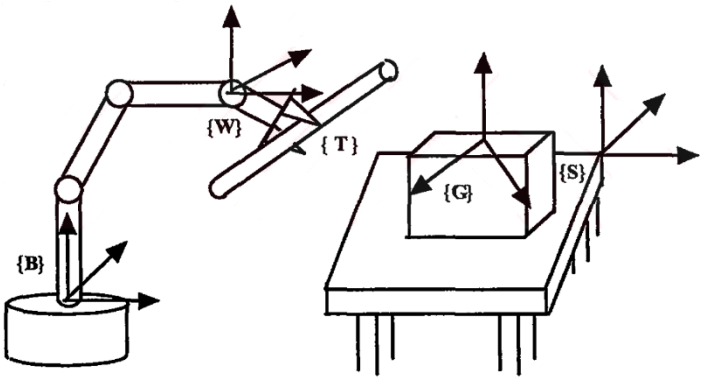
İlk üç eklemi prizmatik olarak tasarlanan robotlar kartezyen manipülatör olarak tanımlanır. Bu robotlar mekanik olarak sağlam yapılar sunmalarına rağmen çalışma alanlarındaki hareket kabiliyetleri diğer robot türlerine göre daha sınırlıdır. Kartezyen manipülatörler genellikle ağır ve büyük boyuttaki nesnelerin bir yerden başka bir yere taşınmasında tercih edilir.



Şekil 2.7 Prizmatik kartezyen eksen gösterimi ve çalışma uzayı [91]

Bu çalışmada kullanılacak test sisteminin tasarımının ilk aşamasında serbestlik derecesine göre ilk üç ekseni tamamen prizmatik olan (PPP) bir kartezyen robot kullanılmıştır. Kartezyen robotun çalışma alanı Şekil 2.7'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

İlk üç eklemi döner eklem olan robotlara dönel manipülatör denir. Bu robotlar, çalışma alanlarındaki hareket yetenekleri açısından en yüksek performansa sahiptir. Bu çalışmada kullanılacak test sisteminin tasarımının ikinci bölümünde serbestlik derecesine göre tek ekseni döner bir tabla kullanılmıştır. Bu tür robotlar geniş bir çalışma alanına sahiptir ve tüm döner eklemleri kolayca hareket edebilir. Geniş çaplı hareket kabiliyetleri her noktada farklılık gösterir. Bu robotlar oldukça esnek ve hızlıdır. Ancak bu esneklik ve hız, kinematik denklemlerinin karmaşıklığını artırarak kontrol işlemlerini zorlaştırır.



Şekil 2.8 Bir robotun sahip olduğu çalışma düzlemlerinin gösterimi [91]

Tablo 2.1 Robot çerçeve alanları ve çalışma düzlemleri [91]

Çerçeve Türü	Açıklama
Ana Çerçeve {B}	Robotun hareketsiz kinematik zincirin ilk parçasıdır.
İstasyon Çerçeve {S}	Robotun tanımlı hareketlerini yaptığı düzlemdir.
Bilek Çerçevesi {W}	Manipülatörde kinematik zincirin son parçasıdır.
Araç Çerçevesi {T}	Robotun hangi işlevi gerçekleştirmesi isteniyorsa ona uygun bir araç sunulur.
Hedef Çerçevesi {G}	Robotun işlem yapacağı nesnenin üzerindeki düzlemdir.

Robot eklemlerinin konumu önceki ve sonraki konumlara göre tanımlanır. Bu sıralama açık kinematik zinciri oluşturur. Bu matematiksel model robotun konum ve yönelim bilgisini içeren dönüşüm matrisi olarak tanımlanır. Matrislerin sayısını etkileyen en önemli faktör robotun serbestlik derecesidir. Bu değer altıdan fazla olan robotlar üç boyutlu bir uzayda tanımlanan herhangi bir noktaya ulaşabilir. Serbestlik derecesinin altının üzerinde olması durumlarında eklemlerin taradıkları alanlar çakışarak artıklık durumuna neden olabilir. Zafer Bingül, Şekil 2.8'de örnek bir robotun çalışma uzayını ve Tablo 2.1'de çalışma düzlemelerini detaylı bir şekilde sunmuştur [91].

2.9.2 Konum Matrisi

Koordinat sistemi çalışma uzayı çerçevesinde herhangi bir noktaya konumlanabilir. Bir nokta üç boyutlu uzayda koordinat sisteminin merkezine göre ifade edilerek 3x1 boyutlu bir vektörle tanımlanabilir. Bu vektör konum matrisi olarak da tanımlanır. Bu matris tanımlandığı koordinat sistemine göre isimlendirilir. Mesela *P* noktasının *A* koordinat sistemine göre konumu bir vektörle ifade edilir. Bu ifadenin matematiksel gösterimi Denklem (2.1)'de gösterilmektedir [91].

$$ {}^{A}P_{BORG} = \begin{bmatrix} {}^{A}P_{BORG_x} \\ {}^{A}P_{BORG_y} \\ {}^{A}P_{BORGz} \end{bmatrix} \mathrm{T} \tag{2.1} $$

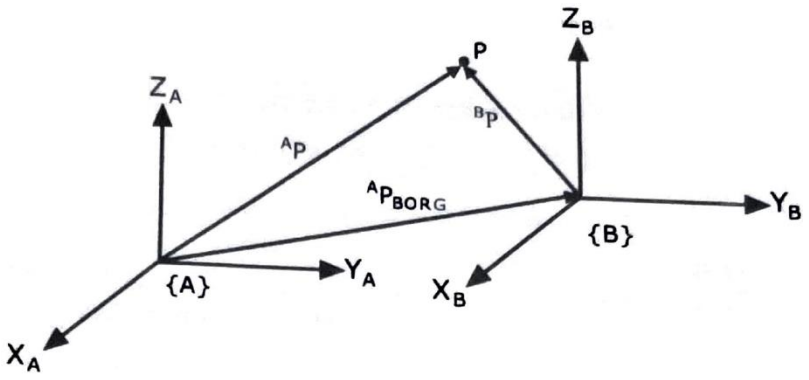
2.9.3 Yönelim Matrisi

Bir koordinat sisteminin herhangi bir eksen etrafında döndürülmesi üç boyutlu uzayda tanımlanabilir. Bir *B* koordinat sisteminin *A* koordinat sistemine göre yönelimi aşağıdaki formülde ifade edilebilir. *B* olarak tanımlanan koordinat sisteminin *A* koordinat sistemine göre *X, Y* ve *Z* eksenleri etrafında döndürülmesinden elde edilen matrisler Denklem (2.2)'deki gibi ifade edilebilir [91].

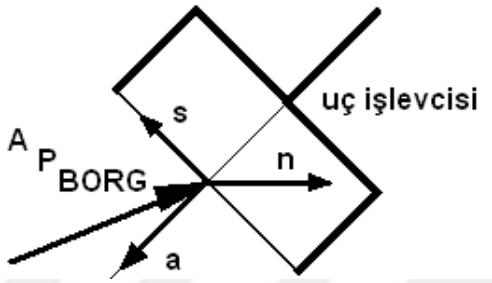
$$ {}^{A}_{B}R = \begin{bmatrix} {}^{A}\hat{X}_B, {}^{A}\hat{Y}_B, {}^{A}\hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{2.2} $$

2.9.4 Dönüşüm Matrisi

A koordinat sistemini, *B* koordinat sistemine göre ifade etmek için birim vektörler kullanılır. *P* noktasının *A* ve *B* koordinat sistemine uzaklığı aşağıdaki Şekil 2.9'de gösterilmiştir. *A* ve *B* koordinat sisteminin noktaya olan uzaklıkları arasındaki bağlantı dönme ve konum vektörlerinin de bulunduğu 4x4 büyüklüğünde bir matrisle gösterilir. Bu matrise dönüşüm matrisi denir ve Denklem (2.3)'de gösterildiği gibi ifade edilir [91].



Şekil 2.9 Dönme ve konum vektörleri gösterimi [91]



Şekil 2.10 Dönüşüm matrisi denklemleri için uç işlevci vektörleri gösterimi [91]

Dönüşüm matrisi, dönme matrisi ve konum vektöründen oluşur. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi bir uç işlevcisi bir hedefe yöneldiği zaman bu yönelimi uç işlevcisinin normal vektörü (*n*), kayma vektörü (*s*) ve yaklaşım vektörü (*a*) şeklinde ifade edilir. Bu vektörler dönüşüm matrisinde Denklem (2.3)'deki gibi eklenir [91].

$$
\begin{aligned}
{}^{A}_{B}T &= \begin{bmatrix} {}^{A}_{B}R & {}^{A}P_{BORG} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.3}
$$

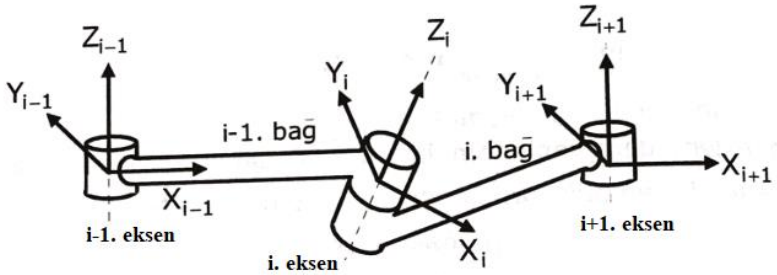
2.9.5 İleri Yön Kinematik Modelleme

Robotun ileri kinematik modeli robotun bağlantı noktalarının konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkileri inceler. Bir robot, ana çerçeveden araç çerçevesine doğru prizmatik veya dönel eklemlerle bağlanmış seri eklemlerden oluşur. İki eklem arasındaki ifade homojen bir dönüşüm matrisiyle tanımlanır. Bu eklemler arasındaki ilişki dönüşüm matrislerinin ardışık çarpımlarıyla belirlenir. Böylece

araç çerçevesinin yönelimi ve konumu ana çerçeveye göre tanımlar [92].

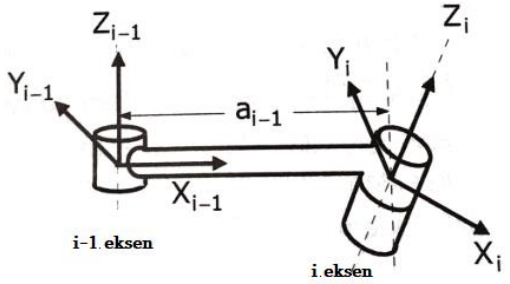
2.9.6 Denavit-Hartenberg Yöntemi

Denavit-Hartenberg (D-H) yönteme göre robot kinematiği çıkarılırken D-H değişkenleri olarak tanımlanan iki eksen arasındaki bağ uzunluğu, eksenler arasındaki bağ açısı, çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı ve iki bağ arasında oluşan eklem açısı olarak tanımlanan eklem değişkenleri kullanılır [91], [92].

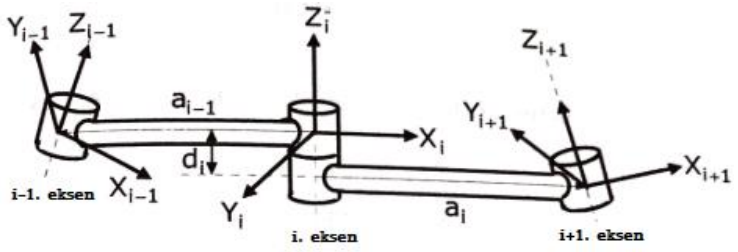


Şekil 2.11 Koordinat eksenlerinin eklemlere yerleştirilmesi [91]

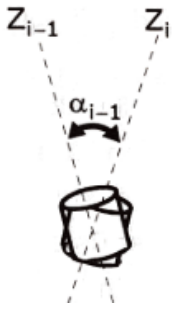
Şekil 2.11'te gösterildiği gibi tüm eklemlere koordinat sistemi yerleştirilerek Z ekseni bağ dönme ekseni olarak tanımlanır. Şekil 2.12'da ifade edildiği gibi X_{i-1} ekseni boyunca Z_{i-1} ile Z_i eksenleri arasındaki dik uzaklık a_{i-1} bağ uzunluğunu ifade eder. Şekil 2.13'deki gibi Z_i yönünde uzanan X_{i-1} ile X_i eksenleri arasındaki uzaklık d_i bağ kaçıklığını ifade eder.



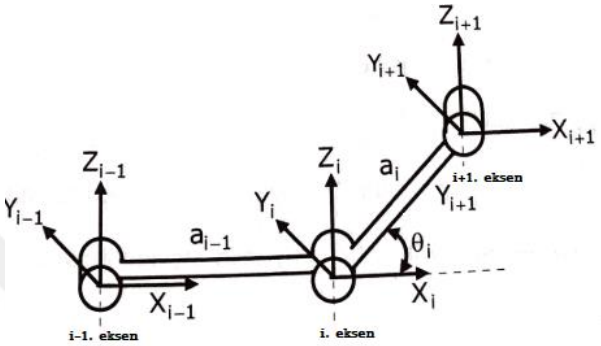
Şekil 2.12 Z_{i-1} ile Z_i eksenleri arasındaki bağ uzunluğu [91]



Şekil 2.13 X_{i-1} ekseni ile X_i ekseni arasındaki Z_i boyunca ölçülen bağ kaçıklığı [91]



Şekil 2.14 Z_{i-1} ekseni ile Z_i ekseni arasındaki ölçülen bağ açısı [91]

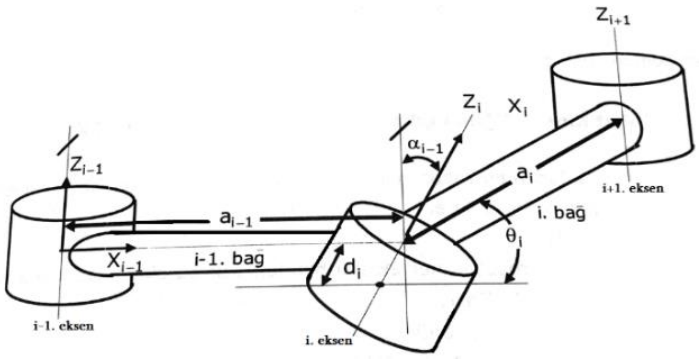


Şekil 2.15 a_{i-1} ile a_i bağları arasındaki X_i ekseni boyunca ölçülen eklem açısı [91]

Şekil 2.14'de verildiği gibi Z_{i-1} ekseni ile Z_i ekseni arasındaki açıya α_{i-1} bağ açısı denir. Şekil 2.15'da gösterildiği gibi a_{i-1} ile a_i bağları arasındaki X_i ekseni boyunca oluşan açı θ_i eklem açısı olarak tanımlanır.

Eklemlere yerleştirilen koordinat sisteminden sonra yukarıda bahsedilen kurallar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Böylelikle n serbestlik derecesine sahip bir robotun dönüşüm matrisi oluşturularak ileri yön kinematik modeli bu kurallar çerçevesinde çıkarılabilir. Şekil 2.16'da gösterilen i. ekleme yerleştirilen koordinat sistemine göre belirlenen eklem değişkenlerine göre eklem dönüşüm matrisi tanımlanır.

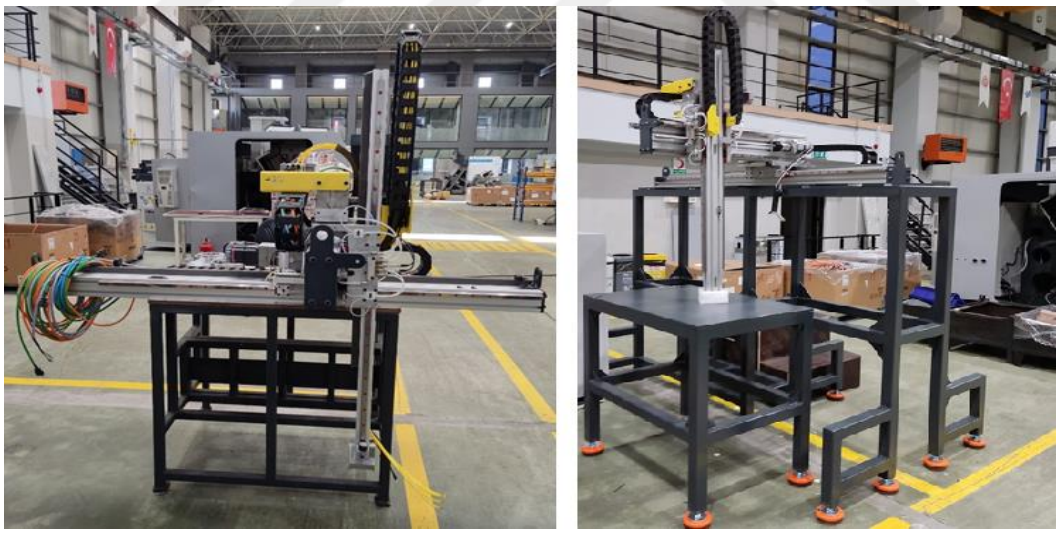
- a_{i-1}, Z_{i-1} ile Z_i eksenleri arasında X_{i-1} ekseni boyunca ölçülen bağ uzunluğu olarak tanımlanır.
- α_{i-1}, Z_{i-1} ile Z_i eksenleri arasında X_{i-1} ekseni boyunca ölçülen bağ açısı olarak tanımlanır.
- d_i, X_{i-1} ile X_i eksenleri arasındaki Z_i ekseni boyunca uzanan bağ kaçıklık mesafesi olarak tanımlanır.
- θ_i, X_{i-1} ile X_i eksenleri arasındaki Z_i boyunca oluşan eklem açısı olarak tanımlanır.



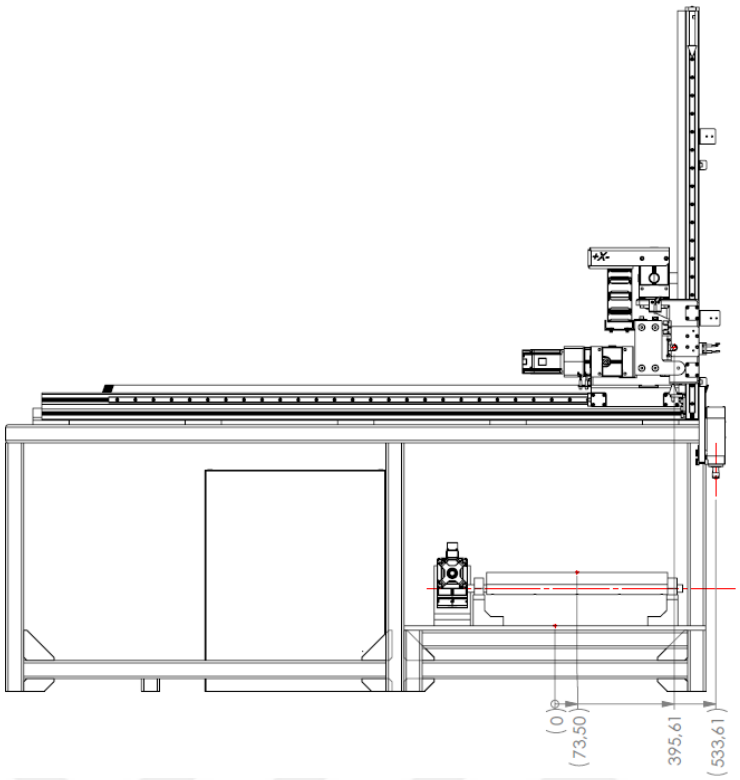
Şekil 2.16 a_{i-1}, α_{i-1}, d_i ve θ_i eklem değişkenlerinin belirlenmesi [91]

2.9.7 Çalışmalarda Kullanılan Örnek CNC Takım Tezgâhın Kinematik Modellenmesi

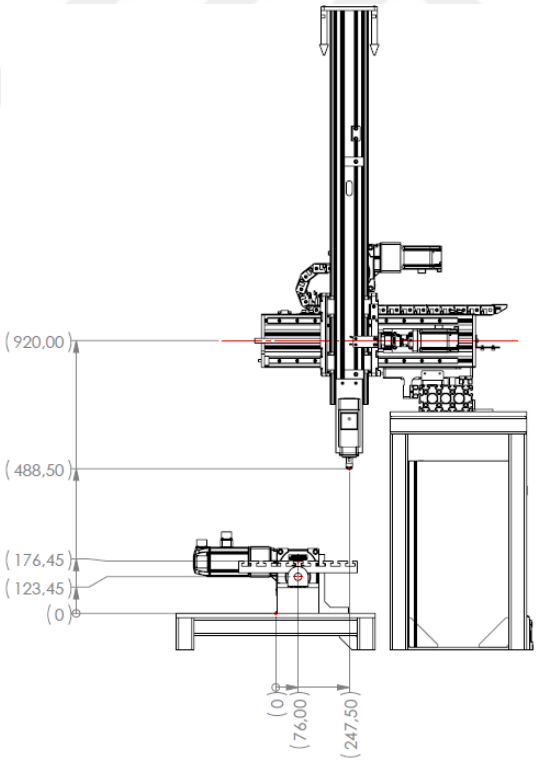
Bu çalışmada Şekil 2.17'da gösterilen üç boyutlu bir uzayda tanımlanan herhangi bir noktaya kolayca ulaşabilmek adına CNC sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemde üç adet kartezyen eksen ve freze tezgâh özelliği katabilmek adına bir adet döner tabla eklenmiştir. Kullanılan ana motor (spindle) ile beraber sistem beş eksene sahiptir. Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da robot sisteminin ve kullanılan döner tablanın eksen koordinatları belirlenerek gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Parça üretimi için kullanılan CNC tezgâh tasarımı



Şekil 2.18 Test sistemi için kullanılacak CNC tezgâhın eksen koordinatları



Şekil 2.19 Test sistemi için kullanılacak robotun döner tablaya göre koordinatları

2.9.7.1 Kartezyen Uzayda İleri Kinematik Model Çalışması

Bu çalışmada sistemin kinematik modeli çıkarılırken D-H yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde robot modellenirken eksenlerin bağ uzunluğu, bağ açısı, eklem kaçıklığı ve eklem açısından faydalanılır. Bu dört değişkene D-H değişkenleri denilmektedir. Kinematik model denklemler oluşturulurken aşağıdaki adımlar takip edilir.

- Öncelikle dönme eksenleri üzerinde koordinatları belirlenir.
- Sonrasında eklemler arası bağ uzunlukları ve bağ kaçıklıkları belirlenir.
- Dönme eksenleri arasında oluşan bağ açıları tanımlanır.
- Son olarak da dönel eklemler için eklem açısı belirlenir.

Bu değişkenleri belirlemek için öncelikli olarak robotun dönme eksenleri belirlenerek numaralandırılır. Böylelikle *n* serbestlik derecesine sahip bir robotun dönüşüm matrisi oluşturularak ileri yön kinematik modeli çıkarılır.

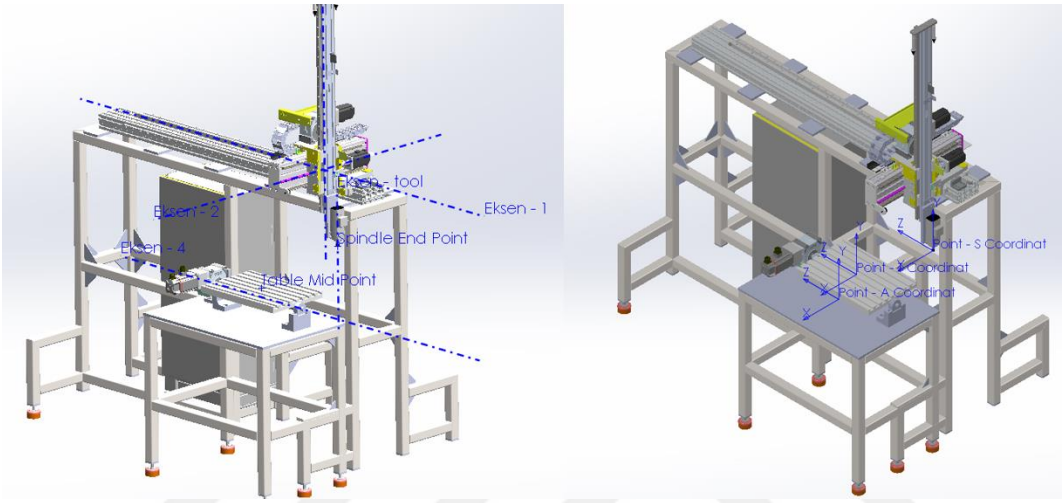
Deneysel sistemin gerçekleştirileceği robotun 3+1 eksenleri için Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'de D-H değişkenleri verilmiştir. Burada prizmatik ve dönel eklem değişkenleri karşılıklı matris elemanlarının eşitlenmesi ile bulunur. Sistemin bir ekleme ait dönüşüm matrisi bu değişkenlerden faydalanarak yazılır. Bu matrislerin çarpımı ile dört serbestlik derecesine sahip dönüşüm matrisi elde edilir. Örnek CNC tezgâhının ileri yön kinematiği aşağıda belirtilen kurallar çerçevesinde bulunur.

Tablo 2.2 Şekil 2.17'de gösterilen sistemin *X*, *Y* ve *Z* eksenleri için D-H değişkenleri

Eksen (*i*)	$\alpha_{(i-1)}$	$\mathbf{a}_{(i-1)}$	$d_{(i)}$	$\theta_{(i)}$	**Değişken**
1	0˚	h_1=255	d_1+102.5	0˚	d_1
2	+90˚	0	d_2+137.5	90˚	d_2
3	-90˚	0	d_3+431.5	0˚	d_3

Tablo 2.3 Şekil 2.17'de gösterilen sistemin *b* ekseni için D-H değişkenleri

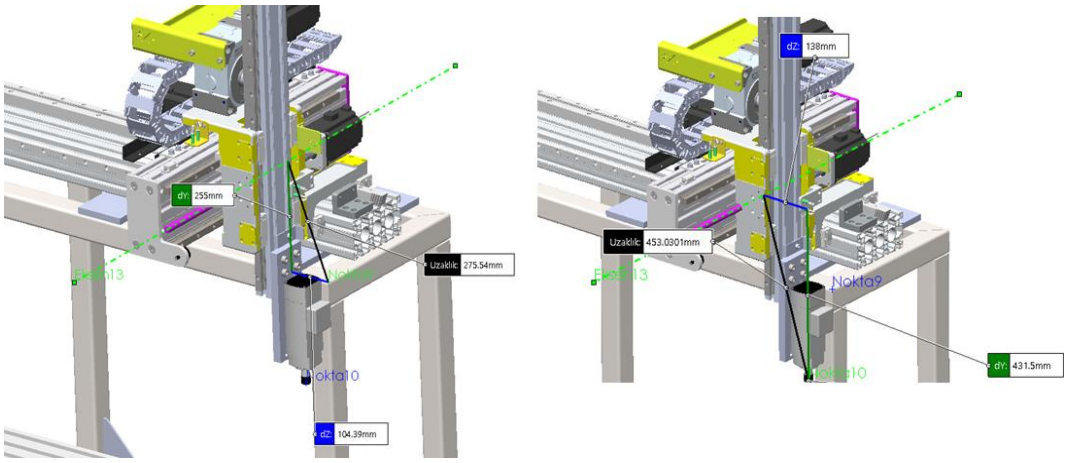
Eksen (*i*)	$\alpha_{(i-1)}$	$a_{(i-1)}$	$d_{(i)}$	$\theta_{(i)}$	**Değişken**
1	0˚	0	0	θ_b+0	θ_b
2	+90˚	0	+53	0˚	-



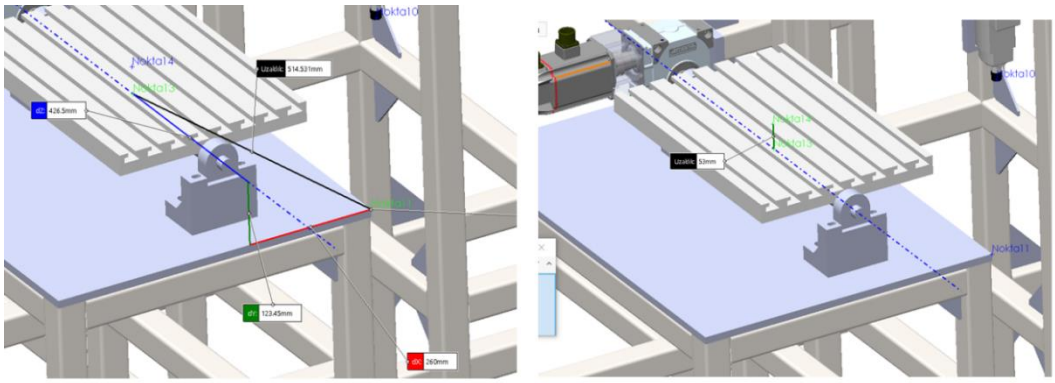
Şekil 2.20 Deneysel çalışmalarda kullanılan robotun eksen yerleşimleri

İlk olarak sistemin sahip olduğu tüm eklemlere koordinat sistemi yerleştirilir. Bu sistemde yer alan üç eksen ve *b* ekseni için Şekil 2.20'de gösterildiği gibi eksenler yerleştirilir.

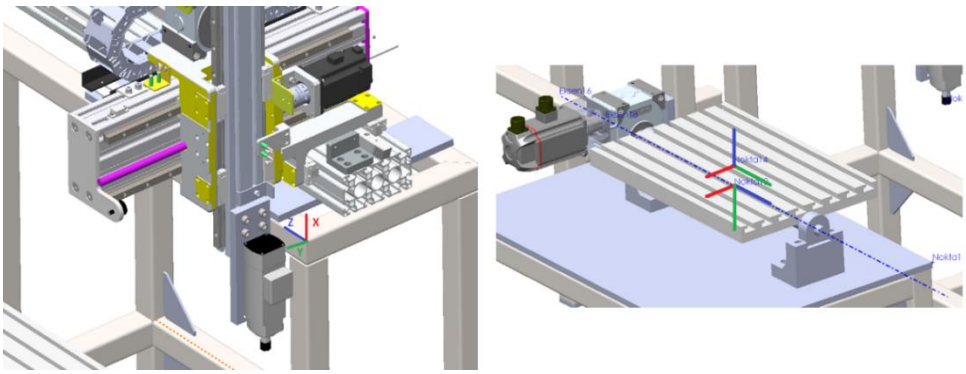
Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'de yer alan D-H değişkenlerine göre her ekleme ait dönüşüm matrisleri elde edilir. Dönüşüm matrisinin büyüklüğü robotun serbestlik derecesine göre belirlenir. D-H tablosunda yer alan eksen uzunlukları Şekil 2.21ve Şekil 2.22'de verilen uzunluklara göre tanımlanır. D-H tablosunda yer alan $\alpha_{(i-1)}$ ve $a_{(i-1)}$ parametreleri sabit olarak tanımlanırken $d_{(i)}$ ve $\theta_{(i)}$ parametreleri değişken olarak tanımlanır. Her eklemin sadece bir değişken parametresi olabilir. Bu duruma göre D-H tablolarının son sütununda yer alan değişkenler belirlenir. Şekil 2.23'de dönüşüm matrisleri için belirlenen noktalar verilmiştir.



Şekil 2.21 Deneysel çalışmalarda kullanılan robotun eksen uzunlukları



Şekil 2.22 Deneysel çalışmalarda kullanılan tablanın eksen uzunlukları

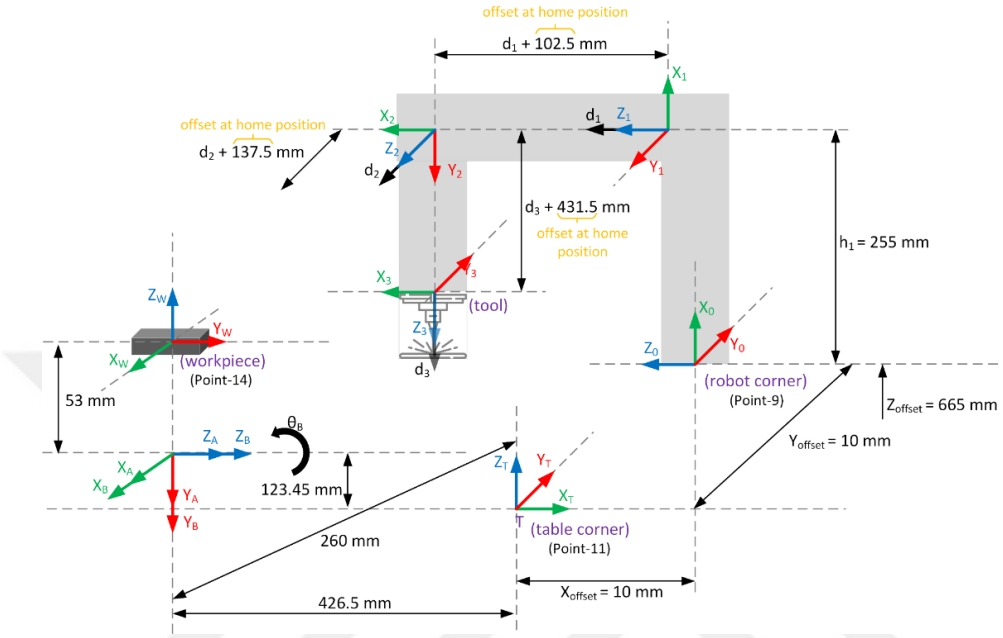


Şekil 2.23 Dönüşüm matrisleri için belirlenen noktalar

D-H değişkenlerinden sonra her bir eklem için dönüşüm matrisi elde edilir. Her bir ekleme ait genel dönüşüm matrisi elde edildikten sonra matrisler birbirleriyle çarpılarak ana çerçeveden araç çerçevesine doğru manipülatöre ait dönüşüm matrisi Denklem (2.4)'deki gibi elde edilir.

$$
{}^{i-1}_{i}T = R_x(\alpha_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i)
$$

$$
= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.4}
$$



Şekil 2.24 Testlerde kullanılacak dört eksenli sisteminin detaylı koordinat sistemi, mesafe ve uzunluk bilgileri

Bu test sisteminde PPP robot için dönüşüm matrisi 3x3'lük bir dönme matrisi ve bu matristen elde edilen 3x1'lik bir konum vektörü elde edilerek bu robotun ileri yön kinematik modeli çıkarılmıştır. Şekil 2.24'de sistemin D-H tablosu için gerekli olan bilgileri verilmiştir.

Ayrıca tabla için de D-H tablosuna göre dönüşüm matrisleri çıkarılmıştır. Şekil 2.24'de yer alan bilgilere göre transformasyon matrisinin Matlab ortamında oluşturulan kod bilgisi Ek-C'de sunulmaktadır. Ayrıca D-H tablosu ve Matlab kodlarından elde edilen transformasyon matrisleri aşağıdaki denklemlerde sunulmaktadır.

$$
{}^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 255 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + 102.5 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.5}
$$

$$ {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 - 137.5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.6} $$

$$ {}^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 + 431.5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.7} $$

$$ {}^{0}_{3}T = {}^{0}_{1}T \, {}^{1}_{2}T \, {}^{2}_{3}T \tag{2.8} $$

$$ {}^{0}_{3}T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -d_3 - 176.5 \\ 0 & 1 & 0 & -d_2 - 137.5 \\ 1 & 0 & 0 & d_1 - 102.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.9} $$

$$ {}^{T}_{0}T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 10 \\ 0 & 1 & 0 & 10 \\ 1 & 0 & 0 & 665 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.10} $$

$$ {}^{T}_{3}T = {}^{T}_{0}T \, {}^{0}_{3}T \tag{2.11} $$

$$ {}^{T}_{3}T = {}^{T}_{0}T \, {}^{0}_{1}T \, {}^{1}_{2}T \, {}^{2}_{3}T \tag{2.12} $$

$$ {}^{T}_{3}T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -d_1 - 92.5 \\ 0 & 1 & 0 & -d_2 - 127.5 \\ 0 & 0 & -1 & d_3 + 488.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.13} $$

$$ {}^{T}_{A}T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -426.5 \\ -1 & 0 & 0 & -260 \\ 0 & -1 & 0 & -123.45 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.14} $$

$$
{}^{A}_{W}T = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 0 & \sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 53\sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 0 & -\cos\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & -53\sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.15}
$$

$$
{}^{T}_{W}T = {}^{T}_{A}T\,{}^{A}_{W}T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -426.5 \\ -\cos\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 0 & -\sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & -260 \\ -\sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 0 & \cos\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 123.45 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.16}
$$

2.9.7.2 Kartezyen Uzayda Ters Kinematik Model Çalışması

Ters kinematik robot kontrolünün en önemli konulardan biridir. Modellenen CNC tezgâhta hedeflenen beş serbestlik derecesine sahip sistemde karmaşık ters kinematik denklemlerini üretmektir. İlk üç eksen için eklemler bir noktada kesiştiği için denklemler daha kolay elde edilirken sonraki eklemlerde kesişmeler olmadığı için ters kinematik denklemi çözümleri karmaşıklaşmaktadır. Ters kinematik problemlerde kartezyen uzaydan ana çerçeveye göre uç işlevcinin konum ve yönelimleri Şekil 2.25'da gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

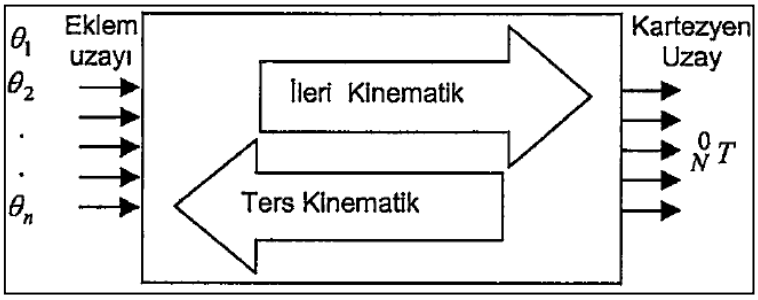


Şekil 2.25 Kartezyen uzaydan eklem uzayına geçişte değişkenlerin ters kinematik dönüşümü

İleri kinematik modelde eklem açıları ve robotun fiziksel parametreleri hesaplanır. Bu parametreler dönüşüm matrisine yerleştirilerek ana çerçeveden araç çerçevesine doğru robotun yönelimi ve konumu belirlenir. Böylece uç işlevcinin hedefe ulaşması için gerekli olan eklem açıları araç çerçevesinin ana çerçeveye göre yönelimi ve konumu ile hesaplanır [92].

Ters kinematik denklemler karmaşık ve doğrusal olmadıkları için birden fazla fiziksel durum üretebilirler. Bu nedenle birden fazla çözüm vardır. Bu da

problemlerin çözümleri oldukça güçleştirir. İleri ve ters kinematik problemlerin dönüşümleri Şekil 2.26'de gösterilmiştir.



Şekil 2.26 İleri ve ters kinematik dönüşümlerinin gösterimi [91]

Ters kinematik problemleri tamamen analitik çözülebileceği gibi analitik çözümün mümkün olmadığı durumlarda farklı sayısal yöntem ve algoritmalar ile de çözülebilir. Aşağıdaki denklemler ile CNC tezgâh modelinin ters kinematik çözümleri gerçekleştirilmiştir.

$$\left[{}^{0}_{1}T\right]^{-1}\,{}^{0}_{3}T = \left[{}^{0}_{1}T\right]^{-1}\,{}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T \tag{2.17}$$

$$\left[{}^{0}_{1}T\right]^{-1}\,{}^{0}_{3}T = {}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T \tag{2.18}$$

$${}^{0}_{1}T^{-1} = \begin{bmatrix} {}^{0}_{1}R^{T} & -{}^{0}_{1}R^{T}\,{}^{0}P_{1} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

$${}^{0}_{1}R = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

$${}^{0}_{1}R^{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

$${}^{T}_{3}T = {}^{T}_{0}T\,{}^{0}_{3}T \tag{2.22}$$

$${}^{T}_{3}T = {}^{T}_{0}T\,{}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T \tag{2.23}$$

$$\left({}^{T}_{0}T\right)^{-1}\,{}^{T}_{3}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T \tag{2.24}$$

$$\begin{bmatrix} r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z - 665 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y - 10 \\ -r_{11} & -r_{12} & -r_{13} & 10 - p_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -d_3 - 176.5 \\ 0 & 1 & 0 & -d_2 - 137.5 \\ 1 & 0 & 0 & d_1 + 102.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

$$d_1 = -p_x - 92.5 \tag{2.26}$$

$$d_2 = -p_y - 127.5 \tag{2.27}$$

$$d_3 = -p_z + 488.5 \tag{2.28}$$

$${}^{T}_{W}T = {}^{T}_{0}T\,{}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T \tag{2.29}$$

$$\left({}^{T}_{0}T\right)^{-1}\,{}^{T}_{W}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T \tag{2.30}$$

$$\theta_{B1} = -\left(180.\arcsin\left(p_y / 53 + 4.90\right)\right)/\pi \tag{2.31}$$

$$\theta'_{B1} = \left(180.\left(\pi + \arcsin\left(p_y / 53 + 4.90\right)\right)\right)/\pi \tag{2.32}$$

$$\theta_{B2} = -\left(180.\arccos\left(p_z / 53 - 2.33\right)\right)/\pi \tag{2.33}$$

$$\theta'_{B2} = \left(180.\left(\arccos\left(p_z / 53 - 2.33\right)\right)\right)/\pi \tag{2.34}$$

$$\begin{bmatrix} -r_{21} & -r_{22} & -r_{23} & -p_y - 260 \\ -r_{31} & -r_{32} & -r_{33} & -p_z + 123.45 \\ r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x + 426.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 0 & \sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 53\sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & 0 & -\cos\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) & -53\cos\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.35}$$

$$p_x = -426.5 \tag{2.36}$$

$$p_y = -53\sin\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) - 260 \tag{2.37}$$

$$p_z = 53\cos\left(\frac{\theta_B \pi}{180}\right) + 123.45 \tag{2.38}$$

2.10 CNC Takım Tezgâhlarında Eğri Uydurma Yöntemleri ve İnterpolasyon Çalışmaları

Günümüzde endüstrisinde eğriler ve karmaşık yüzeyler içeren parçalar sıklıkla üretilmektedir. Literatürde bu ihtiyaçlar B-Spline ve NURBS gibi parametrik eğrilerle karşılanmış olsa da imalat süreçlerinde her CNC tezgâhta aynı kolaylıklar bulunmamaktadır [93].

Bir CNC tezgâhta çember yayları olmadığı durumlarda bir eğri yol işlenmesi gerektiğinde eğri üzerinde çok sayıda nokta hesaplanır. Hesaplanan bu noktaları düz yollara veya önceden belirlenmiş tolerans yaylarına bağlamak gerekir [94]. Bu yaklaşım ile yaklaşık yörüngeye göre eğri oluşturulmaya başlanır. Bileşen elemanlar arttıkça nihai şekil daha hassas hale gelir. Ancak bu durum besleme hızında ve ivmede kesintilere yol açarak titreşimlere neden olabilir. Bu durum işleme kalitesini düşürür. Ayrıca kısa yollar için besleme hızı programlanamazsa sistem yüksek çalışma hızına ulaşılamaz. Bu durumda CNC tezgâh büyük miktarda veri üreterek sistem aşırı yüklenir. Son yıllarda belirtilen bu sorunları çözmek için literatürde çeşitli çözümler önerilmiştir [95], [96]. Ancak önerilen tüm yöntemler CNC takım tezgâhlarında üretim için uygulanabilir değildir.

Eğri uydurma yöntemleri, bir fonksiyonun x_i (i=0, 1, ...N) noktalarında bilinen f_i (i=0, 1, ...N) değerlerinden hareketle herhangi bir x ara noktasında bilinmeyen $f(x)$ ara değerinin bulunması anlamına gelen interpolasyonu kullanarak matematiksel eğri oluşturmak için kullanılan tekniklerdir. Bu yöntemler mühendislik, fizik, bilgisayar grafikleri ve veri analizi gibi birçok alanda uygulanır. Literatürde sıklıkla kullanılan temel eğri uydurma yöntemleri şunlardır:

- Polinom eğrileri: Verilen veri noktalarına en iyi şekilde uyan bir polinom eğrisi oluşturulur. Polinomun derecesi eğrinin doğruluğunu ve karmaşıklığını belirler.
- Spline eğrileri: Polinom parçalarının birleşiminden oluşan her bir parça arasında sürekli ve düzgün geçişler sağlayan eğrilerdir. B-Spline ve NURBS CNC tezgâhlarda yaygın olarak kullanılan eğri türleridir.

- Bezier eğrileri: Kontrol noktaları kullanarak eğrinin şeklini belirleyen parametreli eğrilerdir.
- En küçük kareler yöntemi: Veri noktaları arasındaki farkların karelerinin toplamını en aza indiren bir eğri oluşturur. Bu yöntem en uygun doğrusal ve doğrusal olmayan eğrileri bulmak için yaygın olarak kullanılır.

B-Spline ve NURBS eğrileri, CAD ve CAM sistemlerinde yaygın olarak kullanılan esnek ve güçlü matematiksel modellerdir. Bu yöntem karmaşık şekillerin ve yüzeylerin doğru ve kesintisiz bir şekilde temsil edilmesini sağlar. CNC tezgâhlarda G-kod dosyalarındaki nokta bulutları NURBS eğrilerine dönüştürülerek bu eğrilerin takip edilmesiyle yüksek hassasiyetli ve pürüzsüz işleme gerçekleştirilir. NURBS eğrileri, özellikle karmaşık geometrik formların üretiminde yüksek doğruluk ve kalite elde etmek için kritik bir rol oynar [97].

$$C(t) = \sum_{i=0}^{n} P_i N_{i,k}(t) \tag{2.39}$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t - t_i)}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{(t_{i+k} - t)}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \tag{2.40}$$

$$N_{i,k}(t) = \begin{cases} 1 & t_i \le t < t_{i+1} \\ 0 & degilse \end{cases} \tag{2.41}$$

B-Spline eğrileri için genel ifade Denklem (2.39)'da açıklanmıştır. Burada P_i, *i.* Kontrol noktasını ve *t* ise düğüm noktasındaki koordinatını temsil eder. Denklem (2.40) ve (2.41)'de ise *N*, B-Spline temel fonksiyonlarını (*i*, kontrol noktasının indeksi ve *p*, eğrinin derecesi).ve *n, i* kontrol noktalarının sayısını ifade eder [98].

CAD/CAM sistemlerinde takım yolu oluşturmak için B-Spline ve NURBS kullanılırsa doğrusal veya dairesel yollar için detaylı yazılım oluşturulması gerekir. Ancak bu üretim sürecinde besleme hızında istenmeyen etkilere sebep olabilir. Ayrıca böyle bir yazılım çok sayıda satırdan oluşarak yönetilmesi zordur. Bu sorunları azaltmak için CODESYS programı, B-Spline ve NURBS eğrilerinin pratik ve verimli bir şekilde tanımlanması için özel G-Kodu eklenebilecek şekilde geliştirilmiştir. Böylece eğrinin interpolasyonu işlemi için ek bir yazılım geliştirilebilir ve aynı zamanda besleme hızı ile ilgili sorunların önemli ölçüde azalması sağlanır.

2.10.1 CODESYS'de Spline G kodu

CODESYS'de G5 komutu, bir yol elemanından bir sonraki yol elemanına geçişlerin kesintisiz bir şekilde birleştiği bir eğri ile yol elemanını interpole eder. Aynı zamanda eğri parçası sistem tarafından hesaplanarak bir önceki yol elemanının bitiş teğeti, eğrinin başlangıç teğetiyle uyumlu olması sağlanır. Benzer şekilde oluşan eğrinin bitiş teğeti de bir sonraki yol elemanının başlangıç teğetiyle uyumlu olurken verilen pozisyon için bir eğri parçası oluşturulmuş olunur. Böylece bir yol elemanından bir sonraki yol elemanına geçişler doğru pozisyonunda ve teğette kesintisizdir [99].

2.10.2 CODESYS'de Spline Eğri Uydurma Yöntemi

CODESYS'te tanımlı G-kod "G5 X Y Z A B C P Q U V W F E H L/O D S" dizini için açıklamalar Tablo 2.4'de açıklanmıştır. Bu yöntemde birbirini takip eden birden fazla eğri parçası aşağıdaki adımlar ile birbirine bağlanabilir.

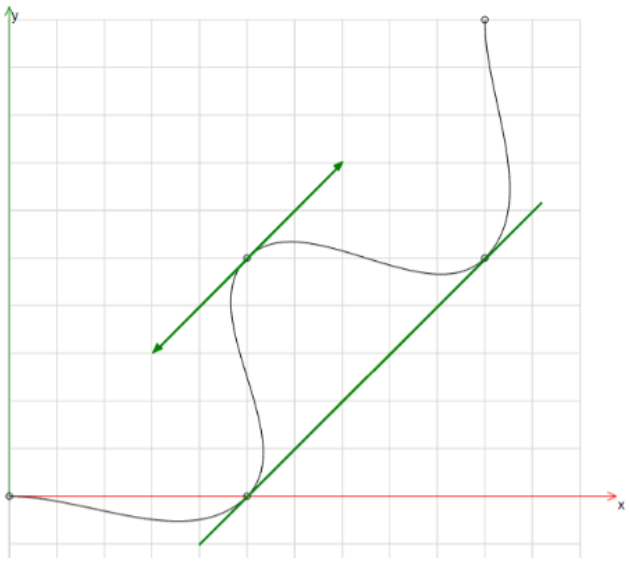
- Başlangıç teğeti belirleme: G-kodunda G1, G2, G3, G8, G9 gibi takım işlemi olan bir komut varsa o zaman yol komutunun bitiş teğeti eğri için başlangıç teğeti olarak kullanılır. Eğer G-kodunda G0, G92, M gibi komutlar varsa o zaman başlangıç noktası ile ilk eğri noktası arasındaki bağlantı çizgisi başlangıç teğeti olarak kullanılır.
- Eğri ortasında teğet belirleme: Bu işlem için komşu noktalar bağlanır. Şekil 2.27'de gösterildiği gibi noktanın teğeti yeşil bağlantı çizgilerine paraleldir.
- Bitiş teğeti belirleme: G-kodunda G1, G2, G3, G8, G9 gibi takım işlemi olan bir komut varsa o zaman yol elemanının başlangıç teğeti eğri için bitiş teğeti olarak kullanılır. Eğer G-kodunda G0, G92, M olan bir komut yoksa o zaman bitiş noktası ile ilk eğri noktası arasındaki bağlantı çizgisi bitiş teğeti olarak kullanılır.

Şekil 2.28'de X20-Y20 koordinatlarında eğri noktası çalışması tanımlanmıştır. Bu örnekte eğri kesilerek yeniden başlatılır. Bu işlem teğet tanımlama yöntemi ile yapılır. Eğrinin başlangıç ve bitiş noktaları oluşturulurken bir önceki ve bir sonraki çizgi parçasının başlangıç teğetleri ile tanımlanır.

Tablo 2.4 G-kodunda “G5 X Y Z A B C P Q U V W F E H L/O D S” komutunun açıklaması

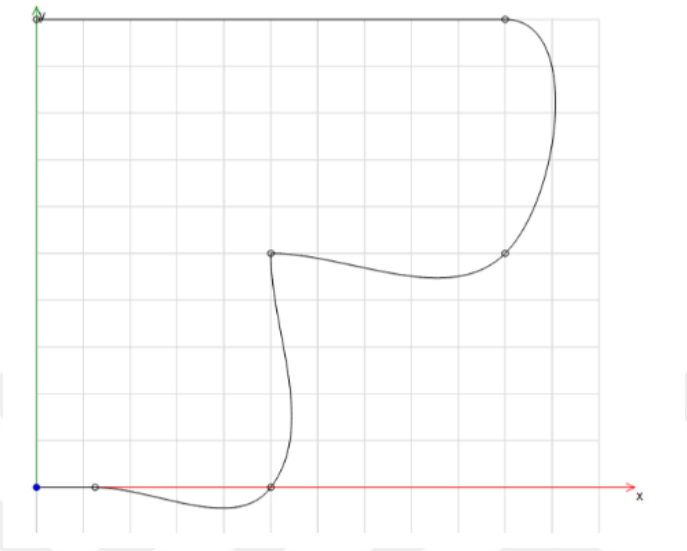
G-kod Komutu	Açıklama
X Y Z	Kartezyen eksenlerin hedef pozisyonları
A B C P Q U V W	Ek eksenlerin hedef pozisyonları
F E:	Yol hızı, yol ivmesi/yavaşlaması
H L/O	Anahtar noktası
D	Takım yarıçapı
S	S profili

```
N0 G0 X0 Y0 Z0 F100 (Startposition)
N10 G5 X20 Y0
N20 G5 X20 Y20
N30 G5 X40 Y20
N40 G5 X40 Y40
```



Şekil 2.27 G-kodu G5 ile teğet oluşturma çalışması

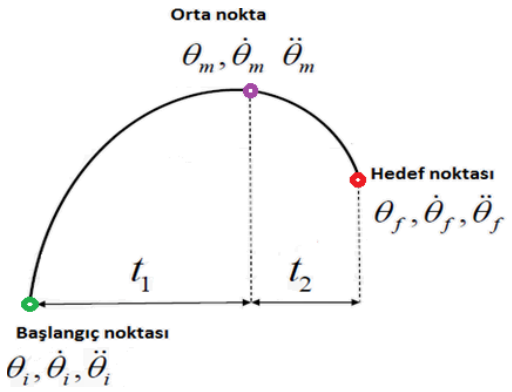
```
N0 G0 X0 Y0 F100 (Startposition)
N5 G1 X5 Y0
N10 G5 X20 Y0
N20 G5 X20 Y20
N21 G5 X20 Y20
N30 G5 X40 Y20
N40 G5 X40 Y40
N45 G1 X0 Y40
```



Şekil 2.28 CODESYS programında Spline eğri uydurma yöntemi ile X20-Y20 noktalarındaki örnek eğri çalışması

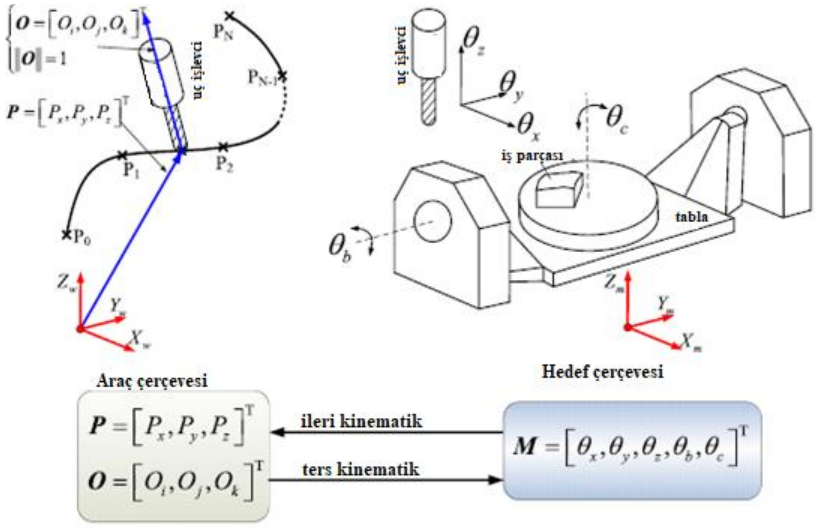
2.11 CNC Takım Tezgâhlarında Yörünge Planlama Çalışmaları

Yörünge planlama, CNC tezgâh araştırmalarının önemli çalışma alanlarından biridir. Bu tür yol planlamalarında operatörü planlama işinden kurtararak olası hata riskini azaltarak tüm sürecin verimliliğini artırmak gerekir. Geleneksel hesaplama yöntemleri ile uç işlevcinin belirli gereksinimlerle bir çalışma alanında bir noktadan diğerine nasıl hareket ettiğine karar vermek zordur. CNC tezgâhlarda uç işlevciyi başlangıç konumundan hedef konuma götürmek için bir dizi hareketin gerçekleşmesi gerekir. Bu hareketlerde yönelim ve konum değişimleri yaşanır. Başlangıç ve hedef noktaları da birer ara nokta sayılmak üzere yörünge planlama ara noktaların tamamlanması ile oluşur. Şekil 2.29'da örnek olarak gösterilen bir yörüngede başlangıç noktasından hedef noktaya doğru hareketi ara geçiş noktaları ile bağlanır. Ara noktalar üzerinden geçilmesi gereken belirli noktalar dizini olarak verilebilir. Burada θ_i ve θ_f kullanıcı tarafından belirlenen noktalardır. θ_m ise orta nokta noktaları temsil etmektedir.



Şekil 2.29 Bir noktadan başka bir noktaya yapılan hareket yörüngesi

Uç işlevcinin yörünge planlama sırasında oluşturduğu hareketleri belirli hız ve ivmeye sahiptir. Bu hareketin titreşimsiz, kontrollü ve yumuşak geçişlere sahip olması beklenir. Uç işlevci noktalar arasında doğrusal, dairesel ve farklı şekillerde yörünge planlama yapabilir. Bu yörünge planlama şekilleri kartezyen koordinatları ve eklem açıları uzayında tanımlanır. Tüm noktalar ana çerçeveye göre uç işlevcinin konumu ve yönelimine göre tanımlanır. Sonrasında ters kinematik işlemiyle eklem açılarına dönüştürülür. CNC tezgâhlarda yörünge planlaması kartezyen ve eklem uzayı olmak üzere iki farklı şekilde yapılır [91]. Şekil 2.30'de örnek bir yörünge planlama için eksenlerin yerleşimleri, kartezyen ve eklem uzayındaki dönüşümleri verilmiştir.



Şekil 2.30 Örnek yörünge planlama için eksen yerleşimleri ve kinematik denklem zincirlerinin gösterimi [93]



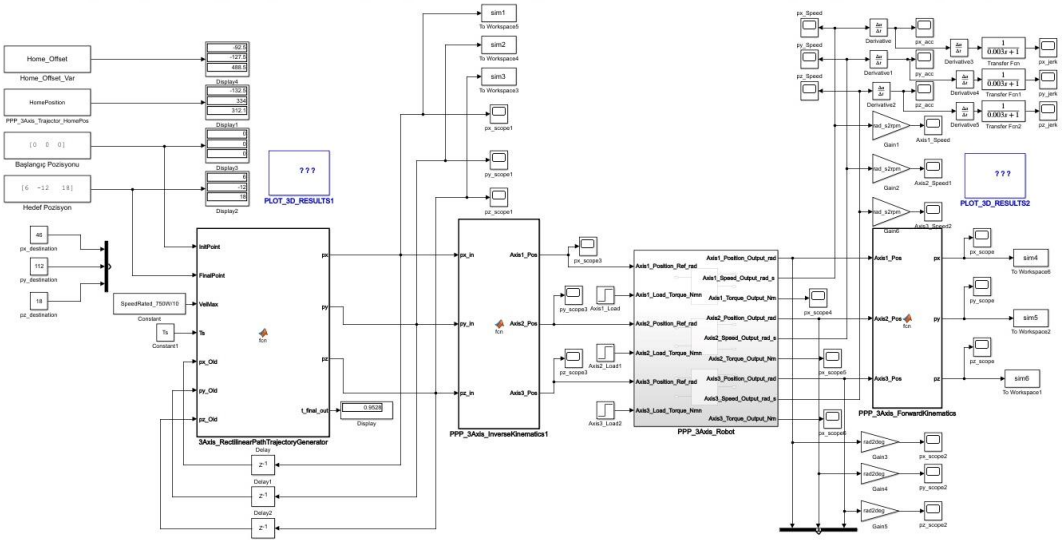
Şekil 2.31 Yörünge planlama sırasında gerçekleşen aşamalar

Bu çalışma, yörünge planlama kartezyen ve eklem uzayda ileri ve ters kinematik modelleri ve interpolasyon hesaplama yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Buna dair akış diyagramı Şekil 2.31'de belirtildiği gibidir. Bu akış diyagramı yörünge planlama sürecini adım adım açıklamaktadır. Tasarım süreci, yörünge planlama ile başlatılır. İlk olarak kartezyen uzayda noktalar dizisi oluşturulur. Bu noktalar dizisi hareket boyunca izlenecek konumların belirlenmesini sağlar. Daha sonra kartezyen uzayda interpolasyon adımları ile bu noktalar arasında sürekli bir yol oluşturulur. Ardından geometrik yörünge belirlenerek istenen hareketin geometrik olarak tanımlanması sağlanır. Bu geometrik yörünge örneklenerek robotun eklem hareketlerine dönüştürülür. Bu aşamada yörünge noktaları ve eklem açıları hesaplanarak eklem uzayda noktalar dizisi elde edilir. Bu noktalar dizisi arasında eklem uzayda interpolasyon yapılarak eklemler arasındaki hareketin pürüzsüz ve sürekli olması sağlanır. Son adım olan eklem uzayda yörünge planlama yapılarak süreç tamamlanır. Böylece robotun eklemlerinin

belirli bir yörünge boyunca hareket etmesini sağlanır ve planlanan hareket başarıyla gerçekleştirilmiş olur.

CNC tezgâhta uç işlevcinin bir noktadan başka bir noktaya sarsıntısız ve tüm eklemler aynı anda hareket ederek etrafındaki cisme çarpmadan belirlenen yörüngeyi takip etmesi istenir. Bu nedenle kartezyen ve eklem uzayda yörünge analizi yapılır.

CNC uç işlevcisinin başlangıçtan hedefe doğru sarsıntısız bir yörüngede hareket etmesini ve tüm eklemlerin aynı anda hareketi tamamlamasını sağlamak için çok dereceli polinomlar kullanılarak eklem uzayında yörünge planlaması gerçekleştirilmiştir. Motorların istenilen bir konumdan farklı bir konuma optimum hız, ivme ve sarsınım çerçevesinde hareket etmesi için gerekli yörüngelerin simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Motor için elde edilen uzay eklem yörüngelerinde hız, ivme ve sarsınım bakımından uygun olmayan durumlar görülebilir. Bu yaklaşımla hareket eden bir robot hem sisteme hem de motorlara zarar verebilir. Bu nedenle hesaplanan herhangi bir kartezyen uzay yörüngesi aynı zamanda kurallarına uygun bir şekilde tüm eksenlerde uygun bir hareket profilini takip etmelidir.

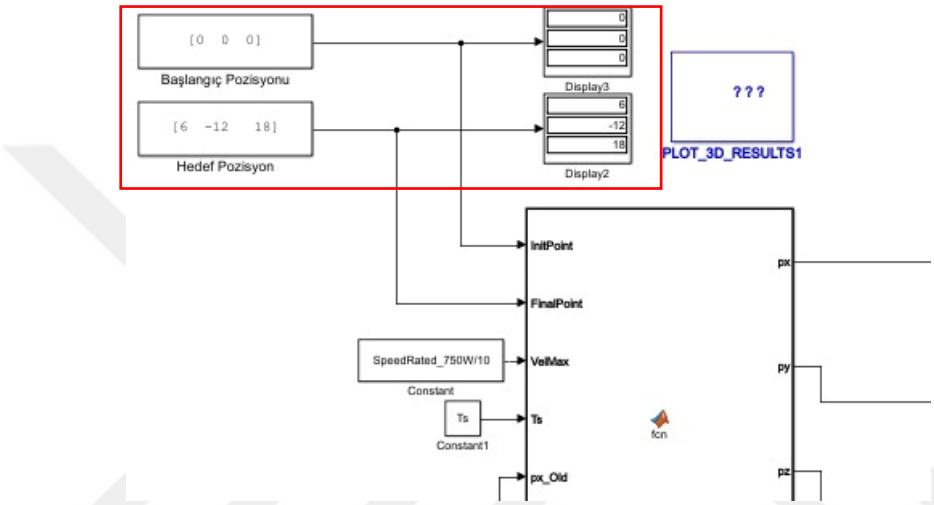


Şekil 2.32 CNC Tezgâh modelinin yörünge planlama simülasyon çalışmaları

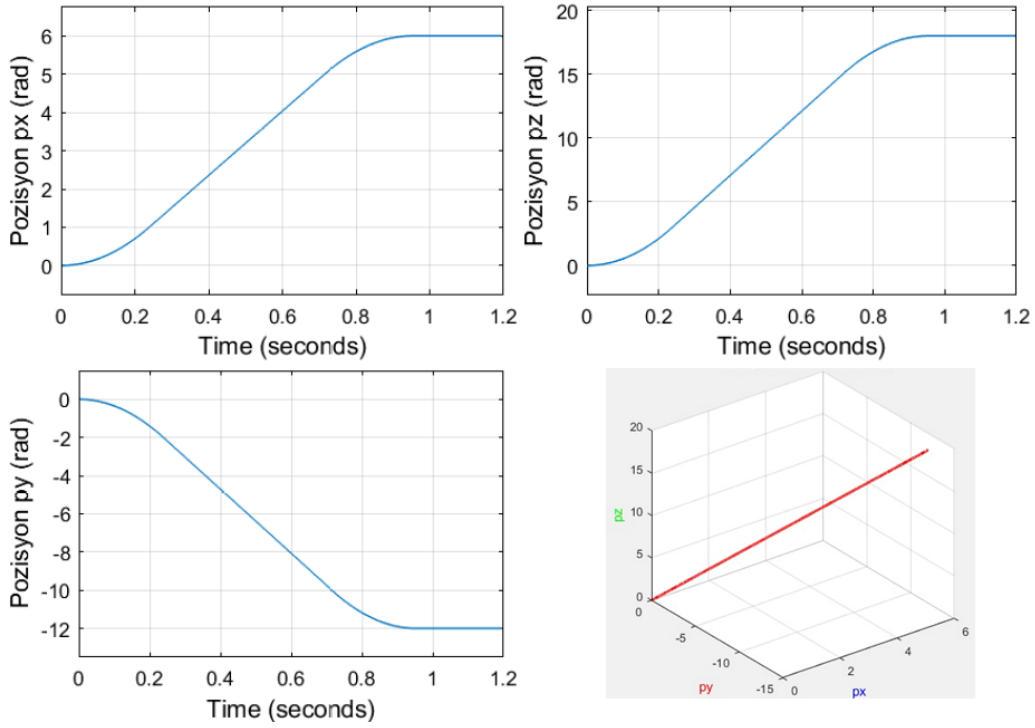
Deneysel çalışmalar için modellenen beş eksenli CNC tezgâh için yörünge planlama simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada CNC tezgâhın üç ekseni için başlangıçtan hedefe doğru sarsıntısız bir yörüngede hareket etmesini ve tüm eklemlerin aynı anda hareketi tamamlaması için eklem uzayında yörünge

planlaması gerçekleştirilmiştir. Motorların istenilen bir konumdan farklı bir konuma optimum hız, ivme ve sarsıntı çerçevesinde hareket etmesi için gerekli yörüngelerin simülasyon modelleri Şekil 2.32'de gösterilen Matlab-Simulink programında tasarlanmıştır.

Belirlenen kartezyen yörünge profilinde motor için elde edilen uzay eklem yörüngelerinde hız, ivme ve sarsıntı bakımından uygun olmadığı durumlar görülebilir. Tüm eksenlerde motorların başlangıç konumları ve takip edilmesi istenen pozisyon profili Şekil 2.33'de yer alan simülasyon bloklarına eklenmiştir.



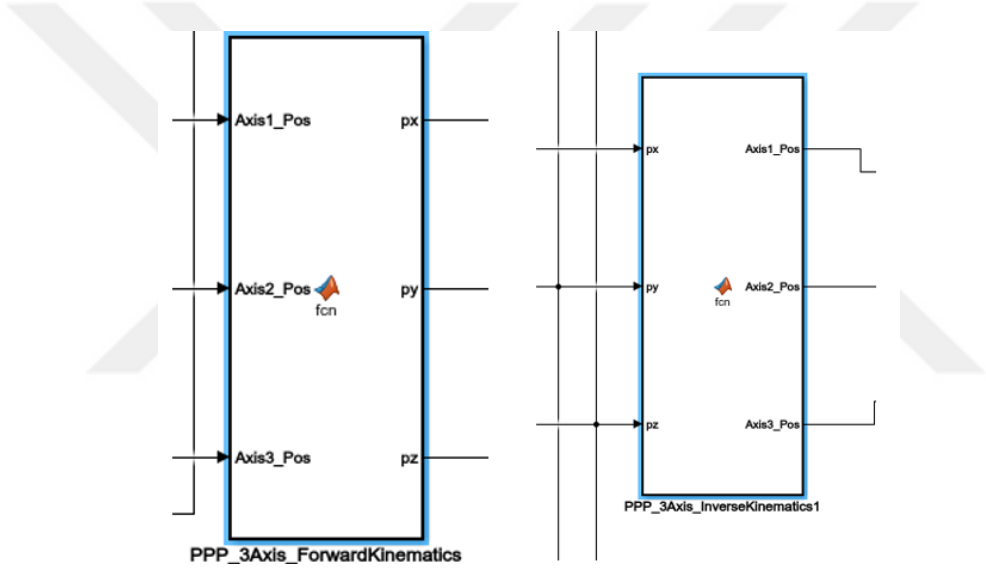
Şekil 2.33 CNC işleme tezgâh uç işlevcisinin başlangıç ve hedef pozisyonları



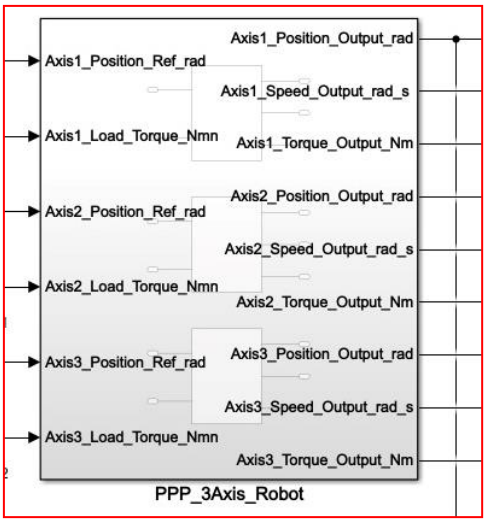
Şekil 2.34 CNC tezgâh uç işlevcisinin p_x, p_y, p_z için planlanan yörünge bilgileri

Hesaplanan kartezyen uzay yörüngesi aynı zamanda Şekil 2.34'te gösterilen p_x, p_y, p_z hedef pozisyon ve hareket profilini takip etmelidir.

Yörünge planlama, kartezyen ve eklem uzayda ters ve ileri kinematik hesaplama yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalarda gerçekleştirilen ters kinematik çözümleri her bir eksen için hesaplanmıştır. Bu işlem uç işlevcinin başlangıçtan hedefe doğru sarsıntısız bir yörüngede hareket etmesini sağlamayı hedeflenmektedir. Bu çalışmaların ileri ve ters kinematik modelleri Matlab-Simulink programında Şekil 2.35'te belirtildiği gibi oluşturulmuştur. Bölüm 2.9'da modelin her ekseni için ileri kinematik ve ters kinematik denklemlerin hesaplanarak ve Matlab-Simulink blok içerisine kodları yazılarak istenen kartezyen yörünge planlaması yapılmıştır.



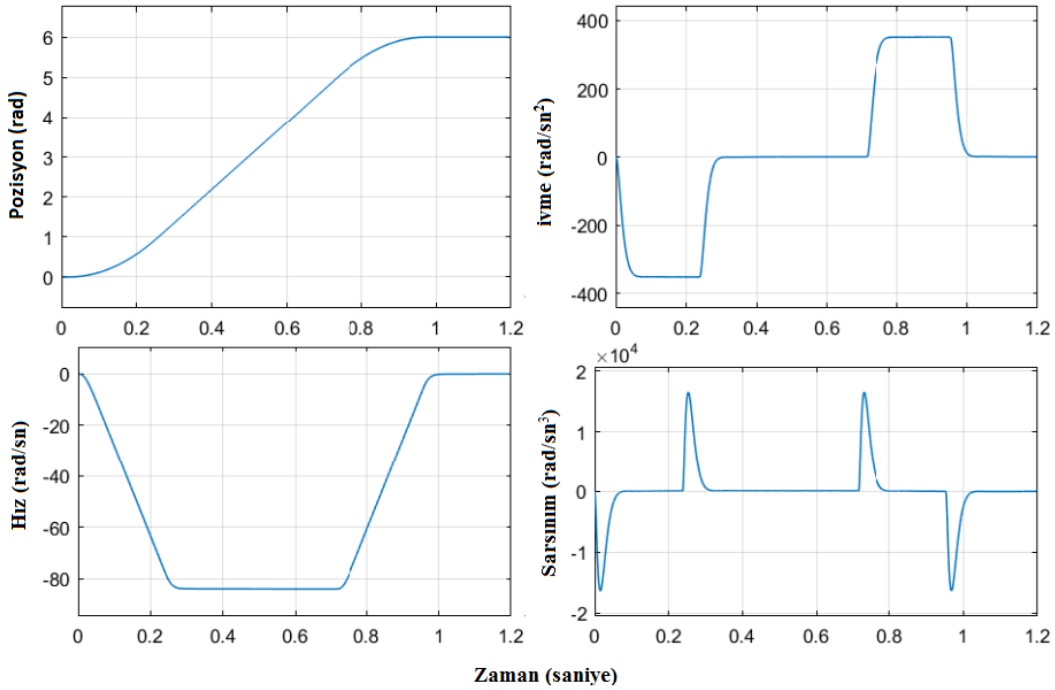
Şekil 2.35 Sistemin ileri kinematik ve ters kinematik model bloklarının gösterimi



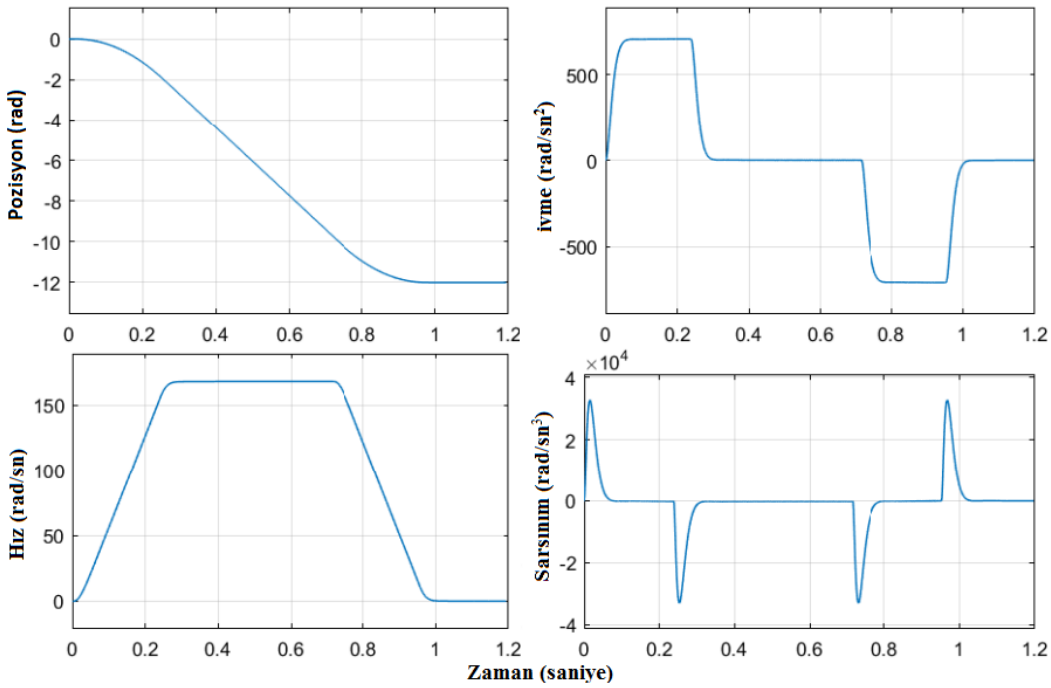
Şekil 2.36 CNC tezgâh modelinin motor blok şeması

Modellenen CNC tezgâhın eksenleri için SMB Technics markasının iki adet SM08-DBM16-075B0 ve bir adet SM10-DBM16-100B1 model servo motorları; iki adet SD-LP-07-D1-E ve de bir adet SD-LP-10-D1-E model EtherCAT haberleşmeli servo sürücüleri kullanılmıştır. Şekil 2.36'te belirtilen Matlab-Simulink programında blok şemasında bu motor ve sürücülerin teknik bilgileri girilmiştir.

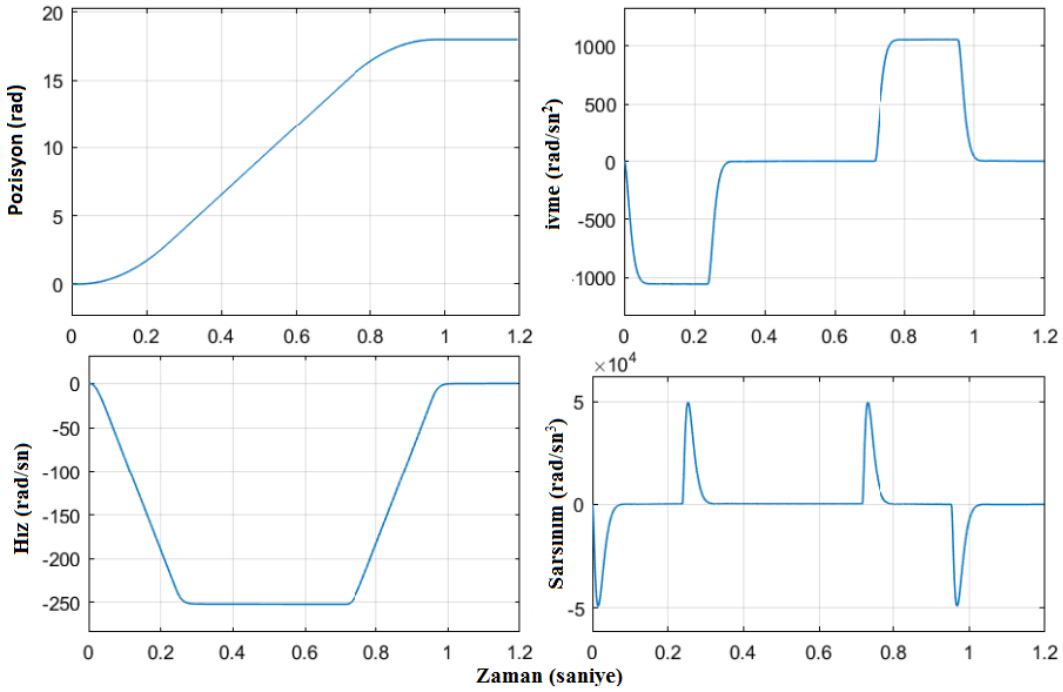
Kartezyen uzaydaki istenen yörüngenin takip edilebilmesi için eklem uzayında elde edilmesi gereken pozisyon, hız, ivme ve sarsınım grafikleri Matlab-Simulink programında elde edilmiştir. CNC tezgâhın *X, Y* ve *Z* ekseni için ayrı ayrı simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 2.37, Şekil 2.38 ve Şekil 2.39'de gösterilmiştir.



Şekil 2.37 Matlab programında oluşturulan *X* ekseni için pozisyon, hız, ivme ve sarsınım simülasyon sonuçları

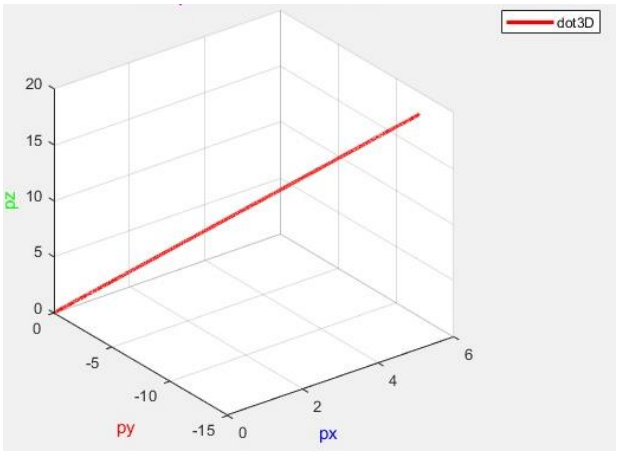


Şekil 2.38 Matlab programında oluşturulan *Y* ekseni için pozisyon, hız, ivme ve sarsınım simülasyon sonuçları



Şekil 2.39 Matlab programında oluşturulan *Z* ekseni için pozisyon, hız, ivme ve sarsınım simülasyon sonuçları

Bu çalışmada kartezyen uzay yörünge hesaplanıp simülasyonlarda uygulandığında çalışma uzayında istenilen hedef yörüngeye Şekil 2.40'de ulaştığı ve yörüngeyi birebir takip ettiği görülmektedir.



Şekil 2.40 CNC tezgâh uç işlevcisinin p_x, p_y, p_z için hedefe yörüngesi

Uygun olmayan değerler ile hesaplanan motorların pozisyon, hız, ivme ve sarsınım grafikleri titreşimler ve salınımlara sahip olabilmektedir. Bu durum yörüngede izleme hatasına sebep olmaktadır. İzleme hatası CNC tezgâhlarda işlenen parçalarda yüzey pürüzlülüğüne neden olmakta ve frezelemenin doğruluğunu azaltmaktadır. Ayrıca bu hesaplamalar çok fazla işlem yükünü artırarak işlem süresini ciddi derecede uzatmaktadır. Bu çalışmada yapılan simülasyonlarda elde edilen yol, hız ve ivme değerleri incelendiğinde hareketin sarsıntısız bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, uygun parametrelerin belirlenmesi ve kullanılması durumunda CNC tezgâhlarının performansının ve işleme doğruluğunun önemli ölçüde artırılabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışma, motor kontrol sistemlerinde optimizasyonun kritik bir rol oynadığını ve bu optimizasyonun doğru bir şekilde yapılmasının hem üretim kalitesini hem de işlem verimliliğini artırabileceğini ortaya koymaktadır.

3
CNC TAKIM YOLU PROBLEMLERİ VE OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

3.1 Yol Planlama Problemleri

CNC tezgâhlarda takım yolu problemleri, üretim süreçlerinde verimliliği ve doğruluğu etkileyebilecek önemli sorunlardır. Yol planlama, bir başlangıç noktasından bir bitiş noktasına optimize edilmiş bir yol bulmayı, engellerden kaçınmayı ve yol düzgünlüğünü, güvenliği ve verimliliği sağlamayı içerir. CNC takımı optimizasyonunda ihtiyaç duyulan yöntemlerden biri de havada geçen sürenin azaltılması ve işleme sırasında yörünge bölgelerinin en kısa mesafelerle birbirine bağlanmasını sağlamaktır. Bu tür sorunları azaltmak için takım yolu planlaması yapılırken dikkatli analizler yapılmalı, doğru yazılım ve donanım kullanılmalı ve operatörlerin iyi eğitilmesi gerekmektedir.

3.1.1 TSP (Seyahat Eden Satıcı Problemi)

Yol planlama problemleri, başlangıç ve bitiş noktaları bilindiği ve her bir yörünge noktasının ziyaret edilecek bir şehir koordinatı olarak ele alındığı için genelleştirilmiş bir TSP olarak formüle edilebilir. TSP, bir satıcının belirli bir sayıda şehri bir kez ziyaret ederek gerektiği durumlarda en kısa yolu tercih eden başlangıç noktasına geri dönme problemidir. Buradaki temel amaç tüm şehirleri ziyaret ederken toplam yolun minimum olmasını sağlamaktır. Bu problem birçok algoritma ve matematiksel teknik kullanılarak çözülmeye çalışılır. TSP için çeşitli matematiksel formüller mevcuttur. Bu problemde TSP'nin kullanım yaklaşımı, k_{ij}'nin i şehri hemen ardından j şehrinin ziyaret edilmesi durumunda 1 olarak tanımlanması ve aksi durumda 0 olarak tanımlanmasıdır. i şehrinden j şehrine olan mesafe c_{ij} ile temsil edilir. TSP ifadesi Denklem (3.1)'deki gibidir [100].

$$\min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} k_{ij} \tag{3.1}$$

$$\sum_{i=1}^{n} k_{ij} = 1; \quad \forall_j \tag{3.2}$$

$$\sum_{j=1}^{n} k_{ij} = 1; \quad \forall_i \tag{3.3}$$

TSP'de döngü oluşmaması için kısıtı, k_{ij}'nin 0 veya 1 olması durumunda diğer tüm noktaları ziyaret etmedikçe aynı konumu tekrar ziyaret edemeyeceği anlamına gelir. Denklem (3.2) ve (3.3), her şehrin tam olarak bir kez ziyaret edildiğinden emin olurken son kısıtlama bireysel döngülerin engellenmesini sağlar.

Takım yolu optimizasyonunda takımın temas edeceği noktalar belirlenir. Bu noktalar delme, frezeleme kesme veya kesme olmayan işlemlerinin yapılacağı koordinatları temsil eder. Bu işleme noktaları, TSP'deki şehirler olarak ele alınır. Her işleme noktası bir düğüm olarak kabul edilerek takımın bu düğümler arasında geçiş yapması sağlanır. Düğümler arasındaki mesafeler Öklid yöntemi kullanılarak hesaplanır. TSP algoritmaları ile EA kullanılarak en kısa yol bulunur. Böylelikle takım, tüm noktaları ziyaret edip başlangıç noktasına döndüğü minimum mesafede yolu hesaplar. TSP algoritmasının çıktısı takımın izlemesi gereken optimum yolu belirler. Belirlenen optimum yol, takımın minimum mesafede tüm noktalarını ziyaret etmesini sağlayarak CNC makinesi için takım yolu olarak kullanılır. İzlenen bu adımlar, takım yolu optimizasyon problemi ile TSP'yi birleştirerek CNC işlemlerinde daha verimli ve etkili yollar oluşturulmasına yardımcı olur.

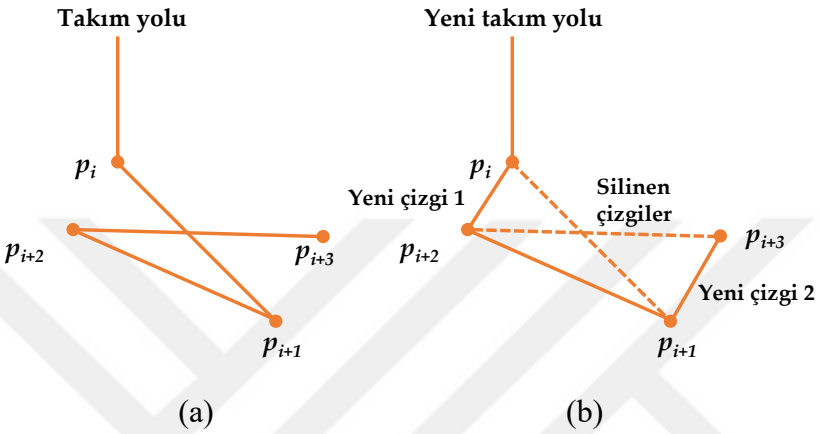
3.1.2 CNC Tezgâh Takım Yolu Kısaltma Problemi

Kesme işleminde kesici takım en kısa mesafede n sayıda seyahat noktasını geçmesi gerekir. Her iki nokta arasındaki en kısa mesafe Öklid yöntemi kullanılarak belirlenebilir. Denklem (3.4), iki boyutlu uzayda bir dizi noktayı bağlayan yolun mesafesini hesaplar. Bu denklem, CNC işleme gibi uygulamalarda bir işlevcinin kat etmesi gereken en kısa yolu belirlemek için kullanılır. Sıralamada her bir p_i noktası, koordinat olarak x_i, y_i şeklinde temsil edilir. $D(p_i, p_{i+1})$, başlangıç noktası p_i'den bitiş noktası p_{i+1}'e kadar kat edilen toplam mesafeyi temsil eder. x_i ve y_i, i. noktanın kartezyen koordinatlarıdır. x_{i+1} ve y_{i+1} ise p_i'yi izleyen p_{i+1} noktasının kartezyen koordinatlarıdır. Böylece iki ardışık nokta olan $p_i = (x_i, y_i)$ ve $p_{i+1} = (x_{i+1}, y_{i+1})$ için bu noktaları birleştiren yol uzunluğu hesaplanabilir. Yol uzunluğu daha sonra tüm sıralı doğru parçaların toplamıyla

elde edilir. Toplam yolculuk mesafesi sıralı tüm yol uzunluklarının toplamı alınarak Denklem (3.5)'deki gibi ifade edilir [101].

$$D(p_i, p_{i+1}) = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \tag{3.4}$$

$$Uzunluk(p) = \sum_{i=1}^{n-1} \{D(p_i, p_{i+1})\} \tag{3.5}$$



Şekil 3.1 Takım yolu örnek planlama çalışması: a) Orijinal takım yolu, b) yol kısaltma optimizasyonunu dikkate alarak yeniden oluşturulan takım yol

Şekil 3.1'de yol uzunluğunun en kısa operatör tarafından minimize edilme yönteminin görseli gösterilmektedir. Bu operatör, en kısa yolu elde etmek için gereksiz uzunluktaki turuncu çizgileri kaldırır. Yerine optimize edilmiş kısa çizgileri oluşturur. Yeni takım yolundaki güncellenmiş çizgiler Şekil 3.1(b)'de gösterilmektedir.

3.1.3 CNC Tezgâh Takım Yolu Düzgünlük Problemi

CNC tezgâh takım yolu problemleri ayrıca düzgünlük optimizasyonunu da içerir. Bu yöntemin takımda herhangi bir arıza olması durumunda önemli hasarlara yol açabileceği ve görevin geri kalanını riske atabileceği için kapsamlı bir şekilde doğrulanması gerekir [102]. CNC tezgâh takım yolu düzgünlük problemi, robotların veya CNC makinelerinin güvenli yol planını sağlamak için takım yolu optimizasyon algoritmalarının tasarımında dikkate alınması gereken bir unsurdur. Bu optimizasyon sayesinde takım yolu değerlendirilerek istenen hedeflere ulaşılırken bir yandan da seyahat süresini ve enerji tüketimini en aza indiren düzgün yol yörüngeleri belirlenir.

Bir yolun düzgünlüğü, yolun ne kadar az kıvrımlı olduğunu belirtir. Daha düzgün bir yol, hareket yörüngesi için daha düşük enerji tüketimi sağlar. Bir eğrinin düzgünlüğü p_i, p_{i+1} ve p_{i+2} olarak tanımlanan üç ardışık nokta kullanılarak bu noktalar tarafından oluşturulan iki çizgi arasındaki açı ile tanımlanır (Denklem (3.6)). Yolun düzgünlüğü, ortalama dönüş açısı hesaplanarak derecelendirilebilir. Bu işlem sonucu iki ardışık çizgi arasındaki açıyı tanımlanır. Bu denklem, açıyı belirlemek için kosinüs kuralını kullanır. Açının kosinüsü, p_{i+1} - p_i ve p_{i+2} ve p_{i+1} vektörlerinin iç çarpımı alınarak ve ardından bu vektörlerin büyüklüklerinin çarpımına bölünerek hesaplanır. Bu hesaplama noktaların geometrik düzeni ile açısal ilişkilerini belirler.

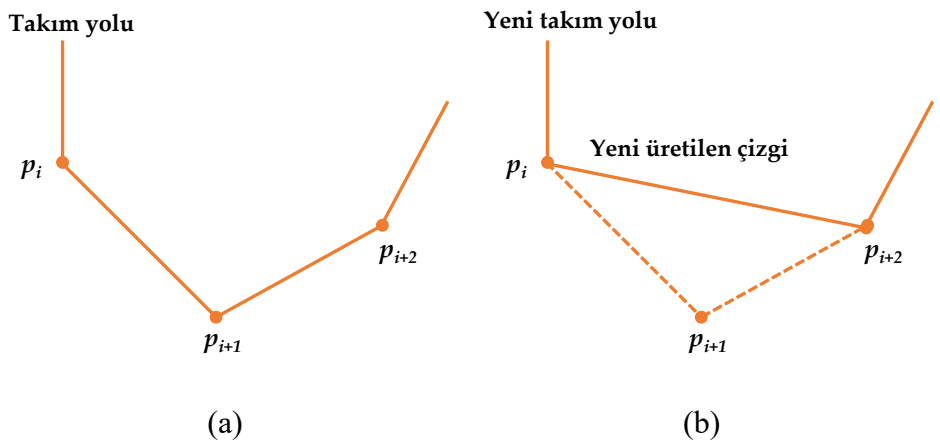
$$A[p_i, p_{i+1}, p_{i+2}] = \pi - \cos^{-1}\left(\frac{(x_{i+1}-x_i)(x_{i+2}-x_{i+1})+(y_{i+1}-y_i)(y_{i+2}-y_{i+1})}{D(p_i, p_{i+1}).D(p_{i+1}, p_{i+2})}\right) \quad (3.6)$$

Bu ifadede $p_i = (x_i, y_i)$ eğrideki i. noktayı temsil eder. $D(p_i, p_{i+1})$ ve $D(p_{i+1}, p_{i+2})$ sırasıyla p_i ile p_{i+1} ve p_{i+1} ile p_{i+2} noktaları arasındaki mesafeyi ifade eder. Ayrıca bu ifade ters kosinüs ($\cos^{-1}$) fonksiyonudur. Dizi genelinin düzgünlüğü bu açılarının ortalaması alınarak hesaplanır: Eğri ne kadar düzgün olursa açı 180°'ye (düz çizgiye) o kadar yakın olur. Burada düzgünlük n sayıda seyahat noktası için açıların aritmetik ortalaması ile 180° arasındaki farkı minimize ederek iyileştirilir. Bu hesaplama Denklem (3.7)'de *Düzgünlük(p)* olarak ifade edilir. Küçük ortalamalı açılar daha keskin dönüşler ve daha az düzgün yollar anlamına gelirken büyük ortalamalı açılar noktalar arasındaki geçişlerin daha düzgün olduğunu gösterir. Bu açı ölçümleri keskin dönüşlerin en aza indirilmesi gereken uygulamalar için yolları optimize etmek amacıyla kullanılabilir. Bu durum CNC tezgâhlara işleme sırasında büyük avantajlar sağlar.

$$Düzgünlük(p) = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}\{A[p_i, p_{i+1}, p_{i+2}]\} \quad (3.7)$$

Daha düzgün bir CNC tezgâh takım yolu, yol düzgünlüğü hedef fonksiyonu ile elde edilebilir. Bu fonksiyonda takım yolundaki iki ardışık çizgi arasındaki en büyük dönüş açısı azaltılır. İki ardışık çizgi yeni bir çizgi oluşturmak için kaldırılır. Böylece yoldaki maksimum açı azaltılır. Şekil 3.2, takım yolu planlamasında yol düzgünlüğü kavramını göstermektedir. Şekil 3.2(a)'da orijinal takım yolu planlaması gösterilirken, Şekil 3.2(b)'de ise yeniden oluşturulan takım

yolu gösterir. En büyük dönüş açısının bulunduğu iki ardışık çizgi kaldırılarak yeni bir çizgi oluşturulmuş. Bu değişim kesikli çizgilerle temsil edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.2 Takım yolu örnek planlama çalışması: a) Orijinal takım yolu, b) yol düzgünlüğü optimizasyonunu dikkate alarak yeniden oluşturulan takım yolu

3.1.4 Engellerden Kaçma Problemi

CNC tezgâhlarda takım yolu engellerden kaçma problemi, takımın iş parçasını işlerken veya makine içinde hareket ederken karşılaşabileceği fiziksel engellerden (örneğin iş parçasının diğer bölümleri, bağlama aparatları, makine parçaları vb.) kaçınmayı amaçlayan bir optimizasyon problemidir. Bu problemin optimizasyonu takımın kesintisiz ve güvenli bir şekilde hareket etmesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Engellerden kaçma takımın çarpışma riskini minimize ederek hem işleme sürecinin güvenliğini artırır hem de makine ve iş parçasında oluşabilecek hasarları önler.

Bu problemi çözmek için genellikle gelişmiş algoritmalar ve simülasyon yazılımları kullanılır. Problem çözümü için takım yolu bu engellerin etrafından dolaşacak şekilde optimize edilirken aynı zamanda işleme süresi ve tanımlanan diğer önemli faktörler de göz önünde bulundurulur. Bu problemin optimizasyonu CNC tezgâhlarının daha verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayarak üretkenliği artırır.

Bu çalışmada ilk olarak güvenli bir aralık tanımlanmıştır. Güvenli aralık bir yolun en yakın engele olan minimum mesafesidir. Bu tanıma göre bir engel kümesi oluşturulur. Engel kümesi ($E = E_1, E_2, ..., E_m$), uzaydaki m tane tanımlanan tüm engelleri içerir. Denklem (3.8)'te belirtilen $MinYol(\overline{p_i p_{i+1}}, E_j)$, ($p_i$, p_{i+1}) doğru parçası ile engel (E_j) arasındaki minimum uzunluktur. Dolayısıyla *Min*

MinYol($\overline{p_i, p_{i+1}}$, E_j), CNC tezgâh takım yolu için tanımlı güvenli bir aralık tanımlanmıştır. Çözümlerde kolaylık sağlamak amacıyla maksimum güvenli aralık problemi bir minimum problemine dönüştürülür. Fonksiyonu negatif bir sayıya dönüştürmek için güvenli mesafeden önce bir negatif işareti eklenir. Yolun güvenlik hedefi Denklem (3.8)'de ifade edildiği gibi tanımlanır.

$$Güvenlik(p) = -\underset{0\le i\le n}{Min}\ \underset{1\le j\le m}{Min}\left\{MinYol\left(\overline{p_i, p_{i+1}}, E_j\right)\right\} \tag{3.8}$$

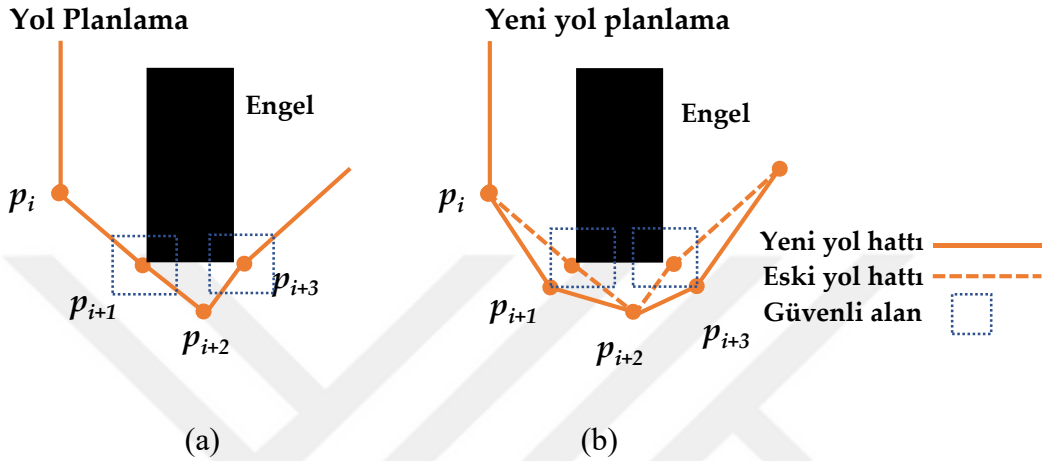
Bu denklem, yolun en yakın engelden minimum mesafesini negatif bir değer olarak hesaplayarak güvenlik ölçütünü sağlar. Bu yaklaşımla güvenli mesafeyi maksimum yapma problemi minimum yapma problemine dönüştürülerek hesaplamaları kolaylaştırılır.

Güvenlik(p), rotanın güvenliğini temsil eden bir ölçüttür. Güvenliğin negatif bir değer olması minimize edilecek bir değeri temsil eder. Elde edilen pozitif değerlerin en küçüğünü bulmayı amaçlar. Bu formül rotanın güvenliğini değerlendirirken her bir parçanın en yakın engelden ne kadar uzakta olduğunu ölçer.

Min(i), 0≤i≤n−1, *r*otanın her bir parçası için minimum değeri bulmayı amaçlar. *Min(j), 1≤j≤m*, her bir parça için tüm engeller arasında minimum değeri bulmayı amaçlar. *MinYol*($\overline{p_i, p_{i+1}}$, E_j), p_i *ve* p_{i+1} noktaları arasındaki çizginin E_j engeline olan minimum mesafesini temsil eder. $\overline{p_i, p_{i+1}}$, yolun i ile i+1 arasındaki çizgiyi ifade eder. E_j ise *j* numaralı engeli temsil eder.

İlk *Min* işlemi rotadaki her i değeri için minimum güvenliğini bulur. İkinci *Min* işlemi ise bu rotanın her *j* değeri için en yakın olduğu engeli bularak minimum değeri hesaplar. Tüm bu değerler arasında en küçük değerler seçilerek rotanın güvenli olmayan kısmı belirlenir. Bu denklemle yolun güvenlik değerlendirilmesi yapılarak takım yolunda güvenli bir hareket alanı sağlamak amaçlanır. Her bir rotanın en yakın engelden uzaklığı minimize edilerek çarpışma riskini en aza indirilmeye çalışılır. Bu modelde kısıtlama tanımı yolun engelle çarpışmamasıdır. Ancak yolun engelin kenarına ulaşmasına izin verilir. Eğer yol engelle kesişirse bu durumda yol uygun değildir. Çalışma alanının kenarı da bir engel olarak kabul edilir. Her doğru parçasında engellere en yakın nokta bulunur. Bu nokta kritik nokta olarak adlandırılır. Sonraki adımda kritik noktanın yakınındaki alan

bölgelere bölünür. Bölgelerin güvenlik mesafeleri karşılaştırılarak en büyük güvenlik mesafesine sahip bölge belirlenir. Bölgenin merkez noktası bir dönüş noktası olarak seçilerek doğru parçasına eklenir. Bu yöntem rota üzerindeki tüm doğru parçaları dikkate alarak tekrarlanır. Bu yöntemle güvenlik operatörü tamamlanmış olur. Şekil 3.3'de takım yolunda güvenlik prosedürünü göstermektedir.



Şekil 3.3 Takım yolu örnek planlama çalışması: a) Orijinal takım yolu, b) yol güvenliği optimizasyonunu dikkate alarak yeniden oluşturulan takım yolu

Şekil 3.3(a)'da yer alan şekil planlanan yolu göstermektedir. Şekil 3.3(b)'de yol planlamada yer alan her doğru parçasının mavi karenin merkezindeki kritik noktasının yakınındaki güvenli mesafeye sahip bir nokta ile değiştirilebileceğini göstererek yeni oluşturulan yolu göstermektedir.

Güvenlik optimizasyonu, yol planlamasında yolun güvenliğini artırmak için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemle yolun en yakın engelden olan mesafesi optimize edilerek güvenli bir rota elde edilir.

3.1.5 Çok Amaçlı Fonksiyonlar ve Ağırlık Faktörleri

Takım yolu optimizasyon problemlerinde birden fazla amaç fonksiyonları farklı hedefler sunabilir. Bu tür optimizasyonlarda bir amacı iyileştirmek için diğer amaç ya da amaçları sınırlamak gerekebilir. Bu sınırlamalar çok amaçlı bir optimizasyon probleminde tek bir optimal çözümünün olmadığını ve çeşitli amaçlar arasında bir çözüm kümesinin bulunduğunu ifade eder. Bu kümelerde tüm çözümler baskın değildir. Bir çözümün bir veya daha fazla amacı diğerinden daha üstünse bunu derecelendirmek gerekir.

CNC yol planlama optimizasyon süreçleri birçok değişken içerir. Bu çalışmada takım engellerden kaçma, yolu uzunluğu ve düzgünlüğünü optimize etmeye odaklanmaktadır. Bu optimizasyon amaç fonksiyonları istenen işleme sonuçlarına ulaşmada önemli bir rol oynar. Bu fonksiyonların optimizasyonu hem enerji kullanımını hem de işleme performansını önemli ölçüde etkileyerek CNC işlemede önemli başarıları elde edilir.

$$\begin{cases} Min\ f_1(p) = Uzunluk(p) \\ Min\ f_2(p) = Düzgünlük(p) \\ Min\ f_3(p) = Güvenlik(p) \end{cases} \tag{3.9}$$

Bazı optimizasyon problemlerinde hedefler birbiri ile çelişkili olabilir. Bu durumda bir veya daha fazla hedefi sağlamaya çalışırken diğer hedeflerin birinden veya daha fazlasından fedakârlık edilmesi gerekebilir. CNC yol planlama problemleri de bu tür çok amaçlı optimizasyon problemidir. Problemde tek en iyi çözüm yoktur. Bir dizi çözüm vardır. Üstelik bu çözümler baskın olmayan çözümlerdir. Başka bir ifadeyle bir çözümün bir veya daha fazla hedefi diğerinden daha iyi olduğunda en az bir veya daha fazla kötü hedef olması gerekir. Son yıllarda yol planlama problemlerini çözmek için NSGA-II, MOGA ve MOEA gibi çok amaçlı evrimsel algoritmalar ortaya çıkmıştır. Bu konunun karmaşıklığı ve çözüme sunduğu pratikliği nedeniyle birçok çalışma alanında bu konuya ilgi gösterilmektedir.

Genel olarak birçok amaçlı optimizasyon çözümleri aşağıdaki gibi bir ağırlıklı toplam fonksiyonu olarak ifade edilebilir:

$$J = \sum_{k=1}^{K} \omega_k f_k(x) \tag{3.10}$$

Burada:

J: Toplam amaç fonksiyonu belirli bir amaca yönelik optimize edilmeye çalışılan bileşik bir fonksiyondur. Bu fonksiyon minimize veya maksimize edilecek çeşitli amaç fonksiyonlarının ağırlıklı toplamı olarak tanımlanır.

K: Amaç fonksiyonlarının sayısı.

$\omega_k, k.$ amaç fonksiyonunun ağırlık faktörü olarak tanımlanır. Ağırlık faktörleri, her bir amaç fonksiyonunun toplam amaç fonksiyonuna ne kadar katkıda

bulunacağını belirler. ω_k değerleri genellikle 0 ile 1 arasında olup tüm ağırlıkların toplamı 1'e eşit olacak şekilde normalleştirilir. Bu faktörler kullanıcı tarafından belirlenir. Her faktör her bir amacın göreceli önemini yansıtır. Örneğin problemde güvenlik daha önemli görülüyorsa güvenlik ile ilgili amaç fonksiyonuna daha yüksek bir ağırlık verilir.

ω_1 ve ω_2 ağırlık faktörleri olup, $\sum_{i=1}^{2} w_i = 1$ olacak şekilde belirlenir.

Birçok amaçlı optimizasyon problemi her bir amacın göreceli önemini yansıtan bir toplam amaç fonksiyonu olarak Denklem (3.11) göre optimize edilebilir.

$$J = \omega_1 \cdot Güvenlik(x) + \omega_2 \cdot IslemeSuresi(x) \tag{3.11}$$

Güvenlik(x): Güvenlik ile ilgili amaç fonksiyonu.

İslemeSüresi(x): İşleme süresi ile ilgili amaç fonksiyonu.

Bu örnekte güvenlik en önemli öncelik ve enerji tüketimi en az önceliğe sahip ise ağırlıklar aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$\omega_1=0.4$, $\omega_2=0.6$

$f_k(x)$, k. amaç fonksiyonu.

x: Karar değişkenlerinin vektörü, optimize edilen fonksiyonların bağımlı olduğu değişkenlerdir. Bu değişkenler çözüm alanındaki olası değerlerdir ve optimizasyon algoritmaları bu değişkenlerin en uygun kombinasyonlarını arar.

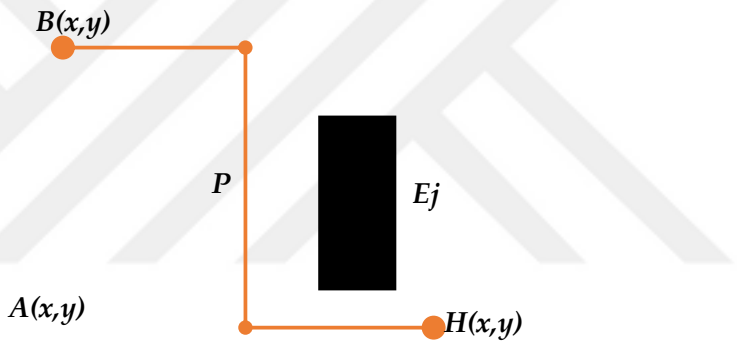
3.2 Evrimsel Algoritmalar ile Yol Planlama Optimizasyon Çalışmaları

Bu çalışmada bir robot düzleminde başlangıç noktasından bitiş noktasına olan yol planlamasını optimize etmek için farklı EA'lar önerilmiştir Ayrıca bu çalışma tezin bir çıktısı olarak JEEIT 2021 konferansında sunulmuştur [103]. Tasarlanan algoritmaların amaç fonksiyonu, seyahat süresini ve yol uzunluğunu minimize eder. Ayrıca algoritmalar, uç işlevci bir pozisyondan diğerine hareket ederken çarpışmalardan kaçınarak noktaları birleştiren optimum yörüngeyi elde edebilir. Bu yol planlamasında takım yolu çalışmaları için noktadan noktaya yörüngeyi optimize etmek amacıyla NSGA-II, GA, ABC ve PSO kullanılmıştır. Her yöntem

için başlangıç noktasından hedef noktaya doğru optimal pozisyon yörüngeleri gösterilmiştir. Tüm algoritmalar için en iyi çözüm grafikleri tanıtılmıştır. Önerilen yörünge planlama optimizasyonunun sonuçları seyahat mesafesi ve hesaplama süresi açısından karşılaştırılmıştır. EA'ların uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonuçlarını karşılaştırılmıştır. Önerilen NSGA-II yöntemi, diğer EA yöntemlerine kıyasla yol planlama problemi üzerindeki performansları açısından daha iyi bir çözüm sergilemiştir. Planlama etkinliğini ölçmek için kullanılan kriterler arasında yol uzunluğu, planlanan yolların düzgünlüğü, hesaplama süresi ve planlama başarısı yer almaktadır.

3.2.1 Problem Formülasyonu

Robot uç işlevcinin hareketi için bir engel E_j $(j = 1, ..., N)$ ve anlık pozisyonu koordinatı $A(x, y)$ ile temsil edilen iki boyutta bir yörünge planı düşünülmüştür.



Şekil 3.4 Takım yolu engellerden kaçma örnek planlama çalışması

Şekil 3.4'te gösterilen örnekteki amaç, başlangıç pozisyonu $B(x,y)$'den hedef pozisyonu $H(x,y)$'ye yol planı için komutları dizisi P'yi oluşturmaktır. Bu yaklaşımdaki pozisyon, döndürme ve ilerleme hareket tiplerinden oluşur.

Bu yol planlama problemi için PSO, ABC, GA ve NSGA-II evrimsel algoritmalar kullanılarak çalışmalar yapılıştır. Çalışmalarda sadece tek amaçlı fonksiyonlara dayanan bir yöntem kullanmanın optimizasyon kriterlerini karşılayan yollar bulmakta zorluk çekildiği görülmüştür. Bununla birlikte tek amaçlı fonksiyonlu yaklaşımlar optimal olmasa da uygulanabilir yollar bulmuştur. Bu yaklaşım, robot yolunda çarpışmaları önlemekte sorunlar yaşamış ancak uygulanabilir bir yolla başladığında yolu iyileştirebilmiştir.

İleri ve döndürme hareketlerine sahip bir yörünge oluşturmak için çok amaçlı fonksiyonlar sunmak başarı yüzdelerini artırmıştır. Çalışmanın uygulama adımların aşağıda belirtildiği gibi gerçekleştirilmektedir.

- İlk olarak, başlangıç pozisyonundan hedef pozisyonuna serbest konfigürasyonları bağlayarak çarpışmasız uygulanabilir bir yol oluşturulur.
- Yol rotaları arasındaki bağlantılar, evrimsel algoritması tarafından yönlendirilen yerel arama prosedürleri ile bulunur.
- İkinci olarak, başlangıç yolunu uzunluk ve düzgünlük açısından küresel bir şekilde optimize etmek için çok amaçlı fonksiyonlar kullanılır.

Önerilen uygunluk fonksiyonları engellere çarpmadan kısa mesafeli yolların oluşturulmasını destekler.

3.2.2 Yol Planlama Stratejisi

Bu bölümde yol planlamasının temelini oluşturmak için EA'lar sunulmuş ve çalışma adımları açıklanmıştır. EA'lar bu çalışmada CNC tezgâhlarda yol planlama problemi için optimum çözümü bulmak amacıyla kullanılmıştır. Algoritmaların uygulanmasından önce problemin boyutu, amaç fonksiyonları ve parametreleri belirlenmiştir. Bu algoritmaların performansları, hedefe ulaşma, engellerden kaçma ve hızlı işlem açısından sağlanır. Başlangıç ve hedef noktaları kullanıcıya sunulan arayüz üzerinden belirlenir. Ara noktaları bulmak için EA'lar kullanılmıştır. Optimizasyon algoritmaları, verilen popülasyon için ara noktaları üreterek başlar. Noktalar, yine EA'lar ile optimize edilir. Başlangıç ve hedef noktalar arasında çeşitli ara noktalar olabileceği unutulmamalıdır. Noktadan noktaya yol planlaması için istenen durdurma kriterlerine ulaşılana kadar uygunluk fonksiyonu hesaplanır. Tanımlanan noktadan noktaya yol planlama ara noktalarla birbirine bağlanır. Ara noktalar, geçilmesi gereken belirli noktalar olarak verilir.

Önerilen EA'ların amaç fonksiyonları, seyahat süresi ve yol uzunluğu minimize ederek engel çarpışma önleme yeteneğiyle yol planlama sürecini gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Bu yol planlama çalışmalarında noktadan noktaya hareket planlamasını optimize etmek için ABC, GA, NSGA-II ve PSO yöntemleri

incelenmiştir. Amaç fonksiyonu, çalışma alanında herhangi bir engelle çarpmadan seyahat süresi ve yol aralığını minimize etmektir.

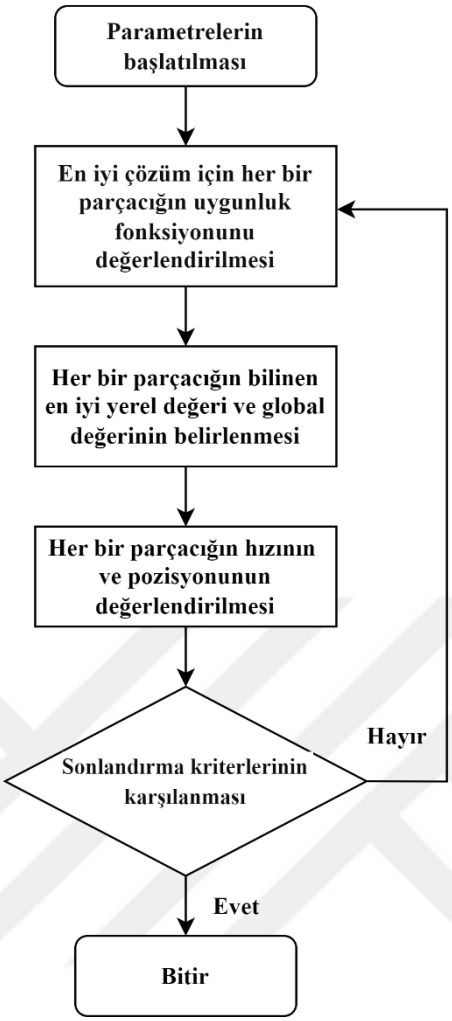
Bu çalışmanın amacı, EA'ları kullanarak kısa ve engellerden korunan bir yol oluşturmaktır. Bu yol, senaryonun serbest alanı içindeki geometrik olarak rastgele konfigürasyonlardan türetilen bir dizi düğüm belirleyerek sistematik olarak oluşturulur.

3.2.3 PSO Algoritmasının Uygulanması

PSO, birçok çözüm veya bireysellik kullanarak bir grup oluşturur. Tüm bireysellikler arasındaki bilgi etkileşimi aracılığıyla optimizasyonu tamamlar [84], [85]. Yöntemin sadeliği, az sayıda parametreye sahip olması ve hızlı çözüm sağlaması algoritmanın avantajları olarak sıralanabilir.

Her çözüm adayı bir parçacık olarak adlandırılır. Parçacığın başlangıç pozisyonu rastgele seçilir. Güncelleme denklemlerine göre her parçacığın pozisyonu ve hızı güncellenerek amaç fonksiyonunun değeri hesaplanır. Bu değere göre parçacığın bilinen en iyi yerel pozisyonu ve parçacık setinin bilinen en iyi global pozisyonu belirlenir. İterasyonlar ilerledikçe minimizasyon veya uygulamanın hedefine bağlı olarak maksimizasyon gerçekleştirilir.

Bu çalışmada PSO algoritması ile tanımlanan maliyet fonksiyonunu en aza indirmeyi amaçlamaktadır. PSO'nun akış şeması Şekil 3.5'te verilmiştir. Bu diyagrama göre ilk olarak popülasyon başlatılmaktadır. Her birey için başlangıç pozisyonu ve hızı atanarak maliyet fonksiyonu değerlendirilir ve en iyi çözümler güncellenir. Sonrasında ana döngüye geçilir. Her iterasyonda parçacıkların hızı ve pozisyonu güncellenir. Maliyetler değerlendirilerek en iyi çözümler güncellenir. Buradaki maliyet fonksiyonu yol uzunluklarının kısaltmayı hedefler. Ayrıca belirli bir noktanın haritadaki bir engelin içinde olup olmadığını kontrol eder ya da haritadaki engellerin sınırlarına göre noktanın kurallara uygun olup olmadığını belirlenir. Böylelikle PSO algoritmalarını kullanarak bir maliyet fonksiyonunu minimize etmeye çalışılır ve engel kontrolü yapılır.

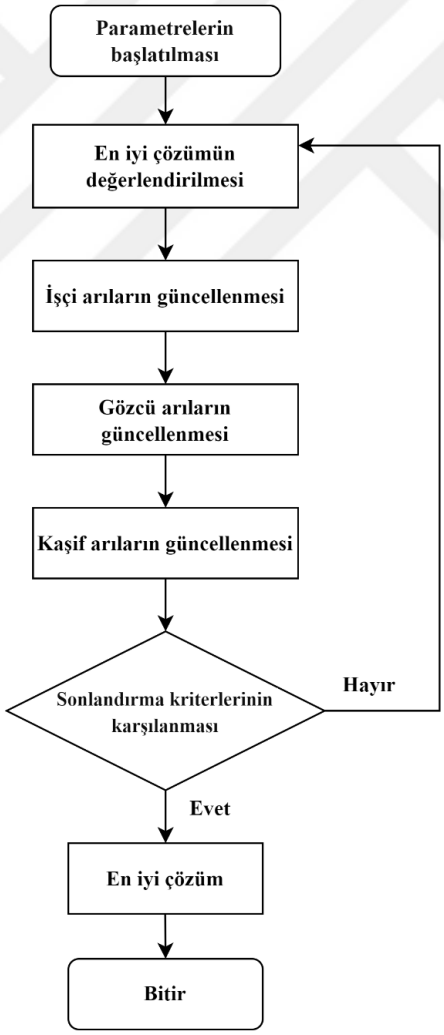


Şekil 3.5 PSO algoritmasının akış şeması

3.2.4 ABC Algoritmasının Uygulanması

ABC algoritması, arıların doğadaki yiyecek arama davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır. Arılar, arama alanında en yüksek nektar bulunan gıda kaynaklarının yerini keşfetmeyi amaçlar. İşçi ve gözlemci arılar, deneyimlerine bağlı olarak gıda kaynaklarını seçerek konumlarını ayarlar. Kâşif arılar ise rastgele uçup gıda kaynaklarını seçerek deneyimlerini kullanmazlar. Eğer yeni kaynağın nektar miktarı hafızalarındaki önceki kaynaktan yüksekse yeni konumu kaydederek önceki kaynağı silerler. Böylece ABC yöntemini, işçi ve gözlemci arılar tarafından gerçekleştirilen yerel arama yöntemlerini gözlemci ve kâşif arılar tarafından yönetilen küresel arama yöntemleriyle birleştirir.

ABC'nin akış şeması Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu akış diyagramına göre ABC algoritması kullanarak bir yol planlama optimizasyon problemi çözmeyi amaçlanır. Burada belirli bir harita üzerinde başlangıç noktaları ve bitiş noktaları üzerinde en düşük maliyetli çözümü bulmayı amaçlamaktadır. Algoritman oluşturulurken temel bileşenler arasında ABC ana fonksiyonu, maliyet fonksiyonu, yiyecek noktaları oluşturma fonksiyonu ve çeşitli operatör fonksiyonları bulunur. Her işçi arı hafızasındaki gıda kaynağına giderek en yakın kaynağı ve nektar miktarını belirler. Ardından her gözlemci arı kaynaklarından birini seçerek o kaynağa gider ve nektar miktarını değerlendirir. Her kâşif arı terk edilmiş gıda kaynaklarını belirleyerek bunları yeni keşfedilen gıda kaynaklarıyla değiştirir. Sonuç olarak güncelleme prosedürlerine göre en iyi gıda kaynağı elde edilir.

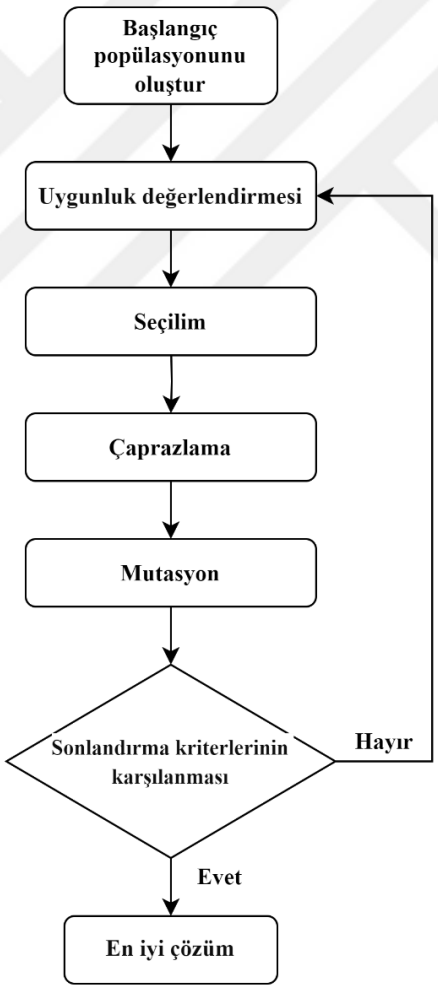


Şekil 3.6 ABC algoritmasının akış şeması

ABC algoritması, arıların çeşitli rastgele ve deterministik operatörler kullanarak yolları iyileştirmesi üzerine kuruludur. Yollar, silme, yumuşatma ve güncelleme açısından optimize edilir. Çarpışma kontrolleri ve kesişim noktası hesaplamaları yolların engellerle çarpmasını önler. Engellerin bulunduğu bir harita üzerinde minimum maliyetli bir yol bulmayı hedefler. Algoritmanın her tekrarında maliyet fonksiyonunu minimize etmeye çalışır.

3.2.5 GA Algoritmasının Uygulanması

GA'lar, yol planlama optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla çalışılmış EA'lardan biridir. Mutasyon, çaprazlama ve seçilim gibi biyolojik olarak ilham alınan operatörleri kullanarak optimizasyon ve arama problemlerine çözüm üretirler.



Şekil 3.7 GA algoritmasının akış şeması

Bu çalışmada başlangıç popülasyonu çözüm alanında rastgele olarak oluşturulur. Popülasyonun boyutu probleme bağlıdır. Her bireyin pozisyonu ve maliyeti

hesaplanır. Her iterasyonda aday çözümlerin değerlerine göre amaç fonksiyonları değerlendirilerek en iyi çözüm başlangıçta en yüksek maliyet olarak ayarlanır ve popülasyondaki en iyi çözümle güncellenir. Daha iyi bir nesil üretmek için seçilim, çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanır. İterasyonlar sonlandırma kriteri karşılanana kadar devam eder. GA'nın akış şeması Şekil 3.7'te verilmiştir. Bu optimizasyon GA parametreleri kullanarak verilen yol kısaltma maliyet fonksiyonunu minimize etmeyi amaçlar. Ayrıca harita üzerinde engellerin içinde olup olmadığını kontrol eden bir fonksiyon da içerir. Tekrarlar boyunca popülasyon güncellenir ve en iyi çözüm bulunur.

3.2.6 NSGA-II Algoritmasının Uygulanması

NSGA-II, çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan popüler bir evrimsel algoritmadır. NSGA-II, uygulanması karmaşık olmayan ve problemlere hızlı bir şekilde optimal çözümler üretebilen bir algoritmadır. NSGA-II algoritmasının temel özellikleri ve çalışma prensiplerini aşağıdaki şekilde belirtilebilir:

- Baskın olmayan sıralama: NSGA-II, çözümleri baskın olmayan (Pareto-etkin) çözümler olarak sıralar. Bir çözüm diğer çözümlerden daha iyi ya da daha kötü değilse baskın olmayan bir çözümdür. Algoritma tüm çözümleri baskınlık derecelerine göre gruplar.
- Kalabalıklaşma mesafesi (Crowding Distance): Çözümlerin çeşitliliğini korumak için kalabalıklaşma mesafesini kullanılır. Bu yöntem çözümlerin kümeye ne kadar yakın olduğunu ölçerek daha geniş bir çözüm yelpazesini korumayı amaçlar.
- Hızlı baskın olmayan sıralama (Fast Non-dominated Sorting): Çözümleri hızlı bir şekilde sıralamak için verimli bir algoritma kullanılır. Bu sıralama çözümleri baskınlık derecelerine göre ayırarak her bir çözüm seti için kalabalıklaşma mesafesini hesaplar.
- Seçim operatörü: Yeni popülasyonları oluşturmak için bu çalışmada turnuva seçimi kullanmıştır. Bu seçim yöntemiyle popülasyondan rastgele çözümler seçilirken baskınlık derecesi ve kalabalıklaşma mesafesi açısından iyi olanlar yeni nesil olarak tercih edilir.
- Çaprazlama ve mutasyon: Yeni çözümler oluşturmak için GA'larda yaygın olarak kullanılan çaprazlama ve mutasyon operatörleri burada da

uygulanır. Çaprazlama, iki ebeveyn çözümden yeni çözümler üretirken mutasyon mevcut çözümler üzerinde belirlenen katsayısına göre değişiklikler yapar.

- Elitizm: Önceki nesillerdeki en iyi çözümleri koruyarak elit seçim uygulanır. Bu yöntem en iyi çözümlerin kaybolmamasını ve nesiller boyunca iyileşmeye devam etmesini sağlar.

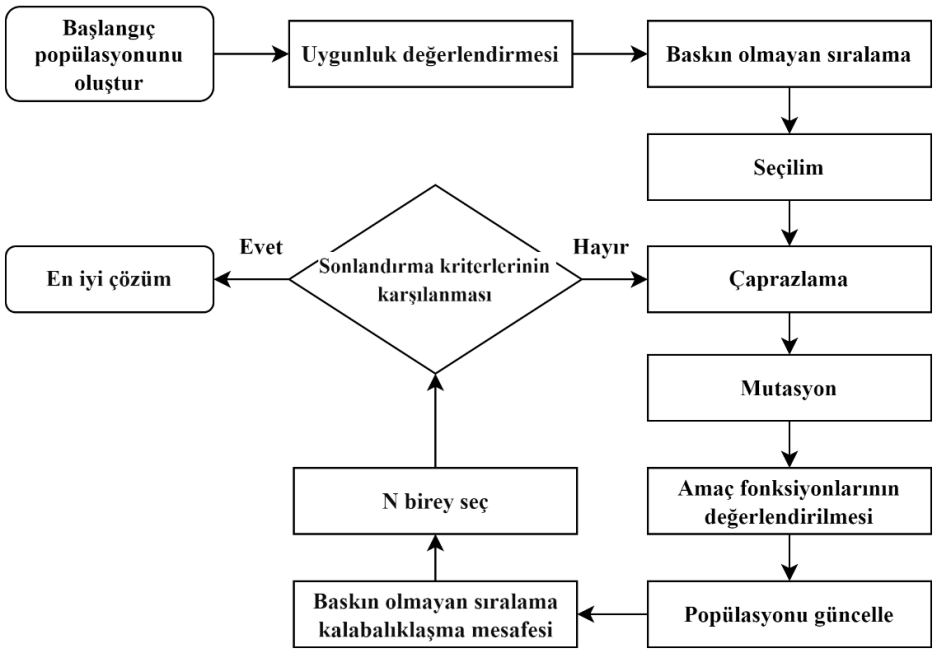
NSGA-II'nin temel amacı, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde Pareto etkin çözümler elde etmek ve bu çözümlerin çeşitliliğini korumaktır. Bu algoritma mühendislik, ekonomi, lojistik ve diğer birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu algoritmalar uygulandığı problemlerde hem çözümlerin kalitesini artırır hem de hesaplama maliyetini düşük tutar. NSGA-II, güçlü optimizasyon yetenekleriyle tanınır ve çeşitli optimizasyon problemlerini başarılı bir şekilde ele alır [104], [105].

NSGA-II, çeşitli gerçek ve benzetilmiş problemler üzerinde test edilmiş çok amaçlı evrimsel algoritma yaklaşımıdır [60], [106]. Yol planlama problemlerinde NSGA-II ve GA arasındaki yol düzgünlüğünü karşılaştıran araştırmalara yer verilmiştir [107]. Farklı bir çalışmada bir yol üzerindeki yol planlama problemini analiz ederek yol uzunluğu ve yol zorluk derecesi olmak üzere iki farklı hedefe odaklanılmıştır [108]. Bir diğer çalışmada ise NSGA-II'yi kullanarak yol problemlerine kullanıcı tanımlı bir ağırlık uygulamıştır. Farklı bir çalışmada da NSGA-II ve GA optimizasyon yöntemleri yol planlama üzerinde gerçekleştirilmiştir [109].

NSGA-II, çok amaçlı bir optimizasyon algoritma olarak baskın olmayan sıralama yaklaşımı ve kalabalık mesafesi operatörü gibi özel operatörlere sahiptir. Bu özellikler GA'nın operatörlerinden daha farklı ve gelişmiş çözümler sunar. İterasyon işlemlerinde tekrarlanmayan baskın olmayan çözümleri ve sınır kümeleri bulunur. Bu çözümler optimal sonuçları korumak için kullanılır. NSGA-II, çözümlerin kalitesini artırma kapasitesi ile bilinen en popüler çok amaçlı EA'lardan biridir. Bu nedenle NSGA-II, bu çalışmada kullanılan yol planlamasını oluşturmak için verimli bir yöntemdir. Baskın olmayan çözümler her amacı yalnızca kendisiyle karşılaştırarak baskınlık amacını optimize eder. Bu özelliği amaçların standartlaştırılması durumunu ortadan kaldırır. Bu çalışmada NSGA-II aşağıdaki adımlar şeklinde detaylandırılabilir:

- Popülasyon, aralık ve kısıtlamalara göre başlatılır. Her birey için başlangıç pozisyonları ve maliyet hesaplanır. En iyi çözüm tutulur.
- Sıralama operatörü, popülasyonun baskın olmama kriterlerine göre kullanılır.
- Sıralama tamamlandıktan sonra kalabalık mesafesi değeri atanır.
- Popülasyondaki bireyler bu değer ve sıraya göre seçilir.
- Bireylerin seçimi, turnuva seçimi kullanılarak gerçekleştirilir.
- Çaprazlama ve mutasyon, genetik operatörler olarak kullanılır.
- Popülasyon güncellenir. En iyi çözümler belirlenir. Yeni neslin bireyleri seçilir ve birleştirilir.
- Yeni nesil sonlandırma kriteri karşılanana kadar her cephe tarafından sırasıyla güncellenir

NSGA-II algoritması ile belirlenen en iyi çözümleri tutarak yol kısaltma maliyet fonksiyonunu minimize etmeyi amaçlar. Ayrıca bir noktanın haritadaki engellere çarpıp çarpmadığını kontrol eder. Tekrarlar boyunca popülasyon güncellenir ve en iyi çözüm bulunur. Çalışmanın gerçekleştiği adımların akış diyagramı Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 NSGA-II algoritmasının akış şeması

3.3 Elitist-NSGA-II Algoritması ile Yol Planlama Optimizasyon Çalışması

Bu bölümde yapılan çalışmaların bir çıktısı olarak MDPI Applied Sciences dergisinde 2024 yılında bir makale yayınlanmıştır [110]. Yapılan çalışmada takım yolu optimizasyonu olarak adlandırılan ve bir dizi noktayı içeren çok amaçlı optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Bu çok amaçlı fonksiyonlar minimize edilmelidir. Örnek olarak takım yolu optimizasyonu formülasyonu Denklem (3.12)'de ifade edilebilir:

$$p = \left[p_0, p_1, p_2, \ldots, p_n, p_{n+1} \right] \tag{3.12}$$

Takım yolu optimizasyon uzunluğu *Uzunluk(p)*, Denklem (3.13)'te verildiği gibi minimize edilir. *Uzunluk(p)*, çözüm kümesindeki ardışık noktalar arasındaki toplam mesafeyi veya yol uzunluğunu minimize etmeyi içerir. Takım yol düzgünlüğü, *Düzgünlük(p)*, minimize edilerek Denklem (3.13)'te gösterildiği gibi iyileştirilir. Yol düzgünlüğü, üç ardışık noktanın oluşturduğu açıların ortalaması olarak hesaplanır.

$$F\left(p\right) = Min\left(\omega_1 .Uzunluk\left(p\right) + \omega_2 .Düzgünlük\left(p\right)\right) \tag{3.13}$$

Bu denklemde ω_1 ve ω_2 hedef fonksiyonların göreceli önemini belirleyen ağırlık faktörleridir. Bu ağırlıkların spesifik değerleri, optimizasyon probleminin belirli hedeflerine ve önceliklerine bağlı olarak değişecektir. Ağırlıklı toplam yaklaşımı tüm çok amaçlı fonksiyonları ağırlıklı toplamı kullanarak tek bir bileşik hedef fonksiyonuna dönüştürür [111], [112].

Tablo 3.1 Her bir ağırlık fonksiyonu için oluşturulan ağırlık faktörleri

ω ağırlık faktörleri	**İlgili Fonksiyonlar**
ω_1	Takım Yolu Kısaltma
ω_2	Takım Yolu Düzgünleştirme

Bu çalışmada NSGA-II kullanılarak çok amaçlı modelin çözülmesi için farklı hedef ağırlık faktör kullanılmıştır. Bu iki ağırlık faktörü hedef belirleme sürecinde

farklı çözümler yaratabilir. Ağırlık faktörleri, optimizasyon hedeflerinin ve değişkenlerinin ilişkisi dikkate alınarak belirlenir. İlgili hedef fonksiyonlar için ağırlık faktörlerinin değerleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Bu tercihler optimizasyon probleminin belirli ihtiyaçları ve hedeflerine göre belirlenmektedir.

Optimizasyon sürecinde ağırlık faktörleri her bir hedefin diğerlerine göre önemini belirlemede kritik rol oynar. Bu durumda ω_1 ve ω_2 sırasıyla yol uzunluğu ve yol düzgünlüğüne atanan ağırlık faktörleridir. ω_1'in değeri 0.9 olup optimizasyon sürecinde yol uzunluğunun önemli ölçüde önceliklendirildiğini göstermektedir. Bu değer, takım yolunun toplam mesafesini minimize etmeye güçlü bir vurgu yapar. Böylelikle işleme süresinin ve potansiyel olarak makine üzerindeki takım aşınmasının azalmasına sağlar. Diğer yandan, ω_2'nin değeri 0.1 olup yol düzgünlüğünün daha az önceliklendirildiğini ancak yine de dikkate alındığını gösterir. Daha düzgün yollar kesme aracının ömrünü uzatırken bir yandan da yüzey formunun kalitesini artırarak keskin dönüşlerin veya düzensiz hareketlerin oluşumunu azaltabilir. Bu faktörlerin dengelenmesi verimliliğe odaklanan ancak nihai çıktıda kabul edilebilir bir kalite düzeyini koruyan bir optimizasyon sağlar.

3.3.1 Çalışma Koşulları ve Modellerin Uygulanması

Bu çalışmanın takım yolu planlaması üzerindeki koşulları yol uzunluğu ve yol düzgünlüğünü optimize etmeye odaklanmaktadır. Ana hedefler kesici takımın toplam yolculuk mesafesini minimize etmek, enerji tüketimini azaltmak ve takım aşınmasına veya hasarına yol açabilecek keskin dönüşlerden kaçınmak için düzgün bir yol sağlamaktır.

Bu çalışma aşağıdaki koşulları ve adımları varsayar:

- Çalışma alanı her noktanın kartezyen koordinatları (x_i, y_i) ile temsil edildiği iki boyutlu bir düzlemdir.
- Kesici takımın geçmesi gereken noktalar dizisi (p_i) belirlenir.
- Kesici takımın belirli bir sırayla önceden tanımlanmış bir dizi noktadan geçmesi gerekmektedir.
- Yol uzunluğunu ölçmek için her ardışık nokta çifti arasındaki mesafe Denklem (3.4)'te tanımlandığı gibi Öklid mesafesi hesaplaması kullanılarak yapılır.

- Bu mesafelerin toplamı Denklem (3.5)'te tanımlandığı gibi toplam yolu elde etmek için kullanılır.
- Yol düzgünlüğünden ödün vermeden işleme süresini ve enerji tüketimini azaltmak için toplam yol uzunluğu minimize edilmelidir.
- Ardışık üç nokta (pi, p_{i+1}, ve p_{i+2}) kullanılarak, kosinüs kuralı ile noktalar arasındaki açı θ hesaplanır. Denklem (3.6)'da verilen ifadeye göre yol düzgünlüğü bu noktalar tarafından oluşturulan ardışık noktalar arasındaki açılara göre değerlendirilir.
- Düzgünlüğü hesaplamak için Denklem (3.7)'ye göre açıların aritmetik ortalaması ile 180° arasındaki farkı minimize ederek iyileştirilir. Daha düzgün bir yol açıların 180°'ye yaklaşmasıyla elde edilebilir.
- Yol uzunluğu ve yol düzgünlüğü için sırasıyla ω_1 ve ω_2 ağırlık faktörleri optimizasyon sürecinde önem değerlerine göre belirlenerek amaç fonksiyonu ile Denklem (3.9)'da gösterildiği gibi ifade edilir (9).
- ω_1 ve ω_2'nin değerleri uygulamanın özel gereksinimlerine göre ayarlanır. Örneğin yol mesafesini minimize etmek daha kritikse ω_1'e daha yüksek bir değer atanabilir. Aksine daha düzgün bir yol öncelikli ise, ω_2 artırılabilir.
- Noktaların sırası ayarlanarak amaç fonksiyonunu minimize etmek için yol yeniden hesaplanır.
- Seçilen ağırlık faktörlerine dayanarak en kısa yol ve en düzgün yol arasında optimal bir denge bulmak için süreç tekrarlanır.
- Optimize edilmiş takım yolunu CNC makinesinin kontrol yazılımına uygulanır.
- Yolun istenen minimal mesafesi ve düzgünlük kriterleri karşılandığını doğrulamak için örnek iş parçası üzerinde testler gerçekleştirilir.

Bu adımları izlenerek model işleme süresini, enerji tüketimini ve takım aşınmasını azaltılır. Böylece işleme sürecinin verimliliğini ve kalitesini artıran optimal bir takım yolu elde etmeye yardımcı olur. Ağırlık faktörleri, uygulamanın özel ihtiyaçlarına göre yol uzunluğu ve düzgünlük arasındaki dengeyi sağlamak için esneklik sağlar.

3.3.2 Elitist-NSGA-II ile CNC Tezgâh Yol Planlama için Uygulama Adımları

Bu çalışmada CNC tezgâh yol planlama problemi NSGA-II kullanılarak uzunluk ve düzgünlük açısından optimize edilmektedir. Optimizasyon sırasında kullanılan uygunluk fonksiyonları kısa ve düzgün yolların oluşturulmasını önceliklendirir.

CNC tezgâh yol planlama için Elitist-NSGA-II'nin uygulanmasıyla ilgili olarak teorideki optimizasyon hedefi üretim koşulları belirlendiğinde iki ana faktör olan yol uzunluğu ve yol düzgünlüğü tarafından belirlenir. Bu iki unsurun doğru seçimi CNC tezgâhta enerji tüketimi ve işleme kalitesini önemli ölçüde etkiler. Bu seçim üretim koşullarının ağırlığına göre belirlenir ve ağırlığı fazla olan faktörü birincil optimizasyon değişkeni olarak tanımlanır.

NSGA-II, çeşitli çözümleri koruma ve diğer çok amaçlı optimizasyon modellerine göre daha etkili bir şekilde optimizasyon sağlama yeteneğini göstermiştir [113], [114]. NSGA-II, iyi yapılandırılmış bir optimizasyon modeli olup popülerliği ve olgunluğuyla tanınan bir algoritmadır [115], [116]. NSGA-II, yaygın olarak kullanılan çok amaçlı bir genetik algoritma olarak öne çıkar. Yol planlama problemlerinde karmaşıklığı azaltılmış bir yapıya, hızlı yürütme hızına ve etkili çözüm sürecine sahiptir [117], [101].

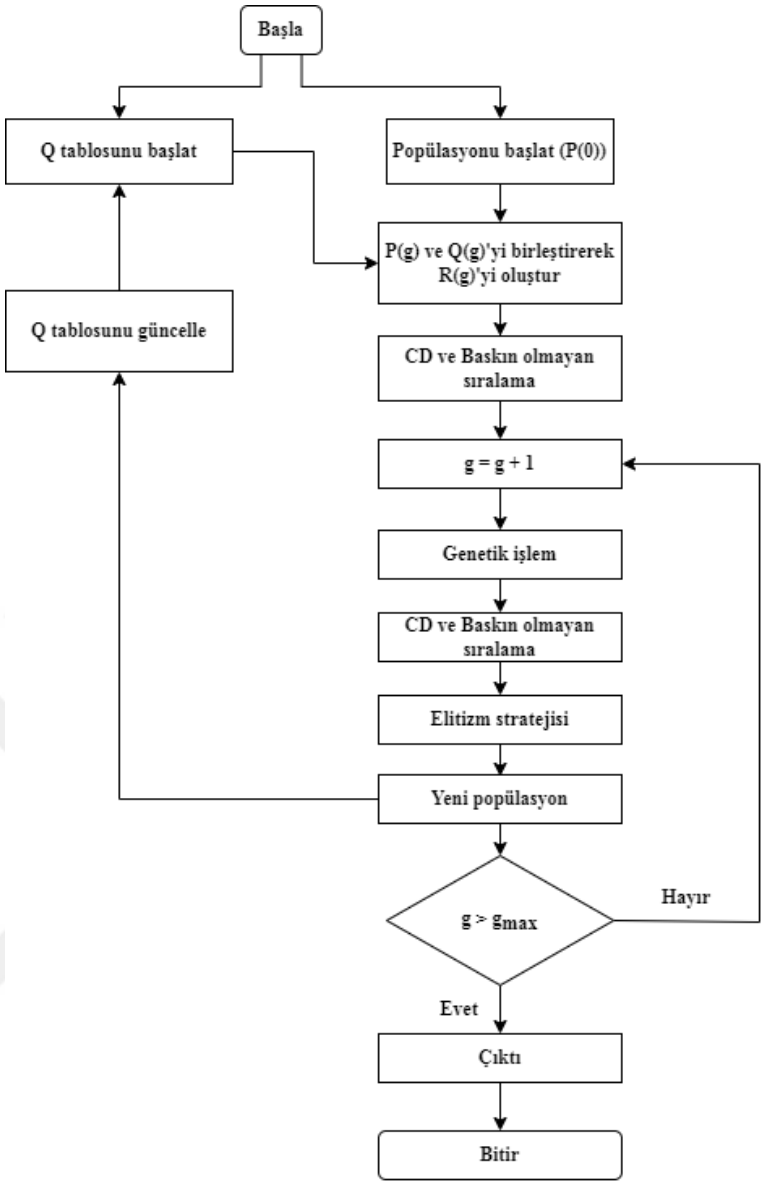
CNC tezgâh yol planlama çalışması için NSGA-II algoritması aşağıdaki adımları izler:

1. Başlangıç popülasyonu *P(0)*, rastgele olarak oluşturulur. Daha sonra çocuk popülasyonu *Q(0)* ile baskın olmayan sıralama elde edilir ve g=0 olarak başlatılır.
2. İki jenerasyon *P(g)* ve *Q(g)* yeni bir popülasyon *R(g)* oluşturmak için birleştirilir.
3. Bireylerin kalabalıklaşma mesafesi (CD) belirlenir ve popülasyon *R(g)*'nin baskın olmayan sıralaması yapılır. En uygun birey, sıralama değeri ve CD'ye göre seçilir ve yeni ebeveyn seti *P*(g+1*)* oluşturulur.
4. Yeni ebeveyn seti *P*(g+1*)* seçilir ve yeni bir çocuk popülasyonu *Q*(g+1*)* oluşturmak için mutasyona uğratılır.

5. Algoritma durdurma kriterinin karşılanıp karşılanmadığını kontrol eder. Eğer durdurma kriteri karşılanmadıysa *g*, 1 adım artırılır ve süreç tekrar adım 2'ye döner.

Başlangıç adımları 1'den 2'ye kadar başlangıç popülasyonunun *P(*0*)* oluşturulması ve değerlendirilmesini içerir. Ayrıca algoritma yürütülürken bulunan baskın olmayan çözümleri korumak için yeni bir popülasyon seti *R(g)* oluşturulur. Adım 4, algoritmanın ana iterasyonunu temsil eder ve durdurma kriteri karşılanana kadar devam eder. İterasyon sırasında, *P(g)* ve *Q(g)* olmak üzere iki yeni popülasyon oluşturulur. *P(g)*, başlangıç popülasyonundan *P(*0*)* seçilen bireyleri tutarken *Q(g)*, yavru bireyleri tutar. Seçim adımı *P(*0*)* popülasyonundan bireyleri belirlemek için kullanılır. Seçilen bireyler *P(g)*'de saklanır. Bu bireyler *P(g)*'de eşleştirilir ve çaprazlama yöntemiyle yavru bireyler oluşturulur. Ardından çocuk popülasyonu *Q(g)*'ye dahil edilir. *P(g)* içindeki her birey için çeşitli genetik yöntemler uygulanarak *Q(g)*'de yeni bireyler oluşturulur. Genetik adımlar *P(g)*'deki bireylere uygulandıktan sonra çocuk popülasyonu *Q(g)* hesaplanarak uygun bireyler *R(g)*'ye eklenir. Daha sonra *R(g)* popülasyon setlerindeki bireyler güncellenir. Baskın olmayan çözümler korunurken diğerleri hariç tutulur.

Bu işlemlerin sonunda Elitist-NSGA-II yaklaşımı uygulanır. Bireysel setleri uygulanabilirlik temelinde uygulanabilir ve uygulanamaz çözümler olarak kategorize etmek için *P(*0*)* ve *Q(g*+1*)* popülasyonları birleştirilir. Bu setlere baskın olmayan sıralama ve CD uygulanarak yeni bir *P(*0*)* oluşturmak için bireyler seçilir. Uygulanamaz bireyler bu aşamada tamamen göz ardı edilmez. Bunun yerine üstün bireyler korunur. *P(*0*)*'in boyutu değişmez ve algoritmadaki döngünün sayacı bir artırılır. Adım 4 ve 5, durdurma kriteri karşılanana kadar tekrarlanır. Böylece tüm algoritma tamamlanır. Bu noktada *Q(g*+1*)* seti çıktı olarak belirlenir. Ayrıca operatörlerin detaylı bir tanıtımı sağlanır. Geleneksel yöntemlerin ötesinde yol uzunluğunu ve düzgünlüğünü optimize etmek için tasarlanan bu evrimsel operatörler ve bu süreçlerin akış şemasıyla Şekil 3.9'da sunulmuştur.

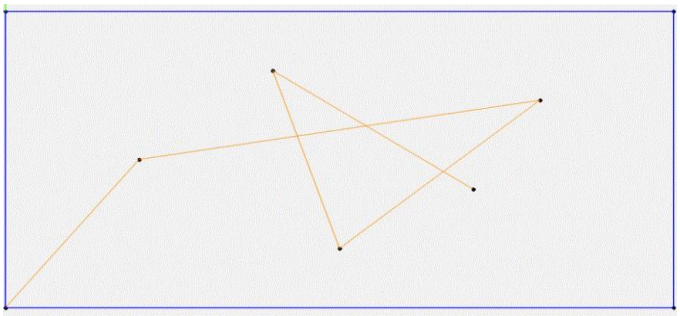


Şekil 3.9 Elitist-NSGA-II algoritmasının akış şeması

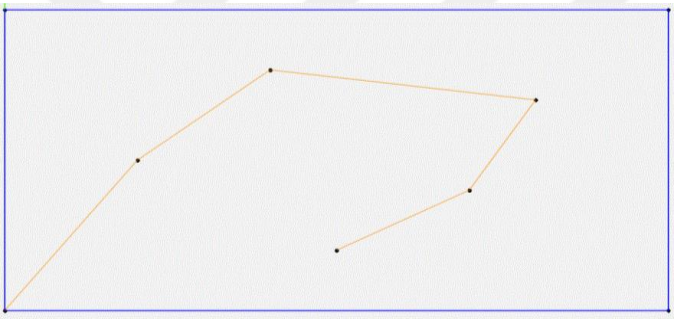
3.3.3 Dikdörtgen Bir İş Parçası Üzerinde Yol Planlama Çalışması

Bu çalışmada CNC tezgâh yol planlama problemi üzerinde yapılan yol kısaltma ve yol pürüzlüğü azaltma optimizasyonlarını daha iyi ifade edebilmek için basit bir dikdörtgen levha üzerine delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir. EK-B'de bu çalışmanın örnek G-kod parçası sunulmuştur. Bu komutlara göre CNC üzerinde işlenen bir dikdörtgen parçaya beş adet delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Frezeleme ve delme işlemleri sırasında belirtilen X ve Y koordinatlarına göre hareket edilir. Ardından Z ekseni boyunca malzemeye doğru inilerek delme işlemi gerçekleştirilir. Deliklerin derinliği ve çapı delikler arasında eşit kabul edilmektedir. Bu nedenle deliklerin oluşturulmasındaki Z hareket mesafesi benzer

olup hesaplamadan çıkarılabilir. Ayrıca bu işlem sırasında herhangi bir takım değişikliği gerekmemektedir. Bu problemde delme yolu satıcı olarak ve deliklerin konumları şehirler olarak TSP'de tasvir edilebilir. En kısa mesafe için iki şehir arasındaki Öklid hesabı dikkate alınmaktadır. Tasarlanan bu G-koda göre elde edilen üretim görseli Şekil 3.10'da sunulmaktadır.



Şekil 3.10 Bir dikdörtgen parçada delik açma problemi için orijinal takım yolu



Şekil 3.11 Bir dikdörtgen parçada delik açma problemi için optimize edilmiş takım yolu

Bu G-kod üzerinde Elitist-NSGA-II algoritması ile bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. CNC üzerinde işlenen örnek dikdörtgen parçanın G-kodunun optimize edilmiş elde edilen yeni versiyonu detayı EK-B'de sunulmuştur.

Optimize edilen G-kod komutları ile Şekil 3.11'de dikdörtgen bir iş parçasının kesilerek üzerine delik açma çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada açılan delikler Ek-B'de yer alan G-kodlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. G-kod, CNC makinelerinde işlem yapılacak yolu belirleyerek bir iş parçasının işlenmesi sırasında takım yolunu yönetir. Verilen iki G-kod örneği karşılaştırılırmıştır. NSGA-II algoritması kullanılarak yol optimizasyonu yapılan Şekil 3.11'deki görsel incelendiğinde deliklerin sıralı işlemler halinde açılarak yolların kısaldığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada yol optimizasyon ile işleme süresini kısaltmak, aşınmayı azaltmak ve enerji kullanımını optimize etmek amaçlanmıştır. Sunulan

G-kod optimizasyonun iyileştirilmesi ile aşağıdaki hedefler doğrudan ya da dolaylı yoldan gerçekleştirilmiştir.

- Yol kısaltma: İlk örnekte deliklerin sırası ve konumlandırılması daha karmaşık ve rastgele gibi görünürken ikinci kodda deliklere gitmek için kullanılan yollar optimize edilmiştir. Bu çözüm takımın gereksiz hareketler yapmasını önler ve işleme süresini azaltır.
- Daha düzenli yol adımları: İkinci kodda deliklerin sırası daha düzenli sunulmuştur. Bu çözüm CNC makinesinin daha az zorlanmasına ve daha az durup başlamasına neden olur. Böylece takım yolu daha verimli hale gelir.
- Güvenlik ve erişilebilirlik: İkinci kodda takımın çarpışma riskini azaltacak şekilde yolların düzenlenmesi makine güvenliğini artırır ve potansiyel arızaların önüne geçer.
- Tekrarlı kod kullanımının azaltılması: İkinci kodda benzer hareketlerin gruplandırılması veya gereksiz kod tekrarlarının azaltılması ile program daha sade ve etkili hale getirilebilir.

Bu iyileştirmeler genel olarak CNC işleme süreçlerinin hızını, verimliliğini ve güvenliğini artırırken maliyetleri de düşürmeyi hedefler. Her iki kodun karşılaştırılması işleme stratejileri ve takım yollarının nasıl optimize edildiğini daha iyi anlamaya yardımcı olur. NSGA-II gibi çok amaçlı optimizasyon algoritmaları kritik kararların verilmesinde önemli bir rol oynar. Birden fazla hedefi eş zamanlı olarak dikkate alınarak en iyi genel çözümü bulmaya çalışır.

Çalışma sonunda dikdörtgen parçanın ilk yol uzunluğuna göre daha kısa ve düzgün bir yol elde edilmiştir. NSGA-II algoritması gerekli delik koordinatlarına olan mesafeyi kısaltarak yolu güncellemiştir. Ayrıca mümkün oldukça keskin köşelerden kaçınarak düzgün bir yol çizmeye çalışmıştır.

Optimizasyon sonunda önemli iyileştirmeler elde edilmiştir. Orijinal takım yolu uzunluğu 272.4 mm'den 188.7 mm'ye düşürülmüştür. Bu takım yolu uzunluğu üzerinde yaklaşık %30'luk bir azalmayı temsil etmektedir. Bu optimizasyon çalışması NSGA-II'nin takım yollarının hareketini ve yörüngesini optimize ederek işleme süreçlerinin verimliliğini artırmadaki etkinliğini göstermektedir.

4
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

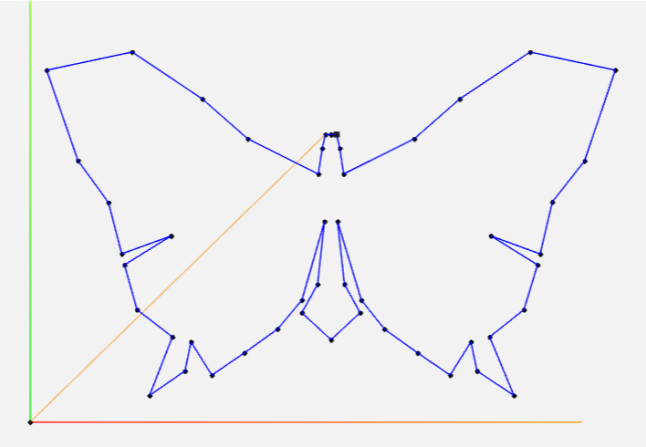
Bu tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmaları üç ana bölümde sunulmuştur. CNC tezgâh işlemlerinde karşılaşılan çeşitli optimizasyon problemlerine yönelik geliştirilen eğri uydurma yöntemi ile interpolasyon hesabı, evrimsel algoritmalar ile yol planlama optimizasyonu ve Elitist-NSGA-II ile kesme yapmayan takım yolu için çok amaçlı optimizasyon çalışmaları yapılarak deneysel sonuçları elde edilmiştir. Ele alınan yöntemlerin amacı mevcut literatürdeki eksiklikleri gidermek ve CNC işlemlerinin verimliliğini artırmaktır. Literatürde genellikle tek bir probleme odaklanan çalışmaların aksine bu çalışmada birden fazla optimizasyon kriteri aynı anda ele alınmış ve gerçek CNC takım yolu uygulamaları üzerinde test edilmiştir. Böylece CNC tezgâhlarında işleme doğruluğunu, yüzey kalitesini ve işlem hızını optimize etmek için kapsamlı ve bütünleşik çözümler sunulmuştur. Bu yaklaşımlar, CNC işleme süreçlerinin daha verimli, güvenilir ve ekonomik hale getirilmesine katkı sağlamaktadır.

4.1 Kelebek Şeklinin Eğri Uydurma Yöntemi ile İnterpolasyonu

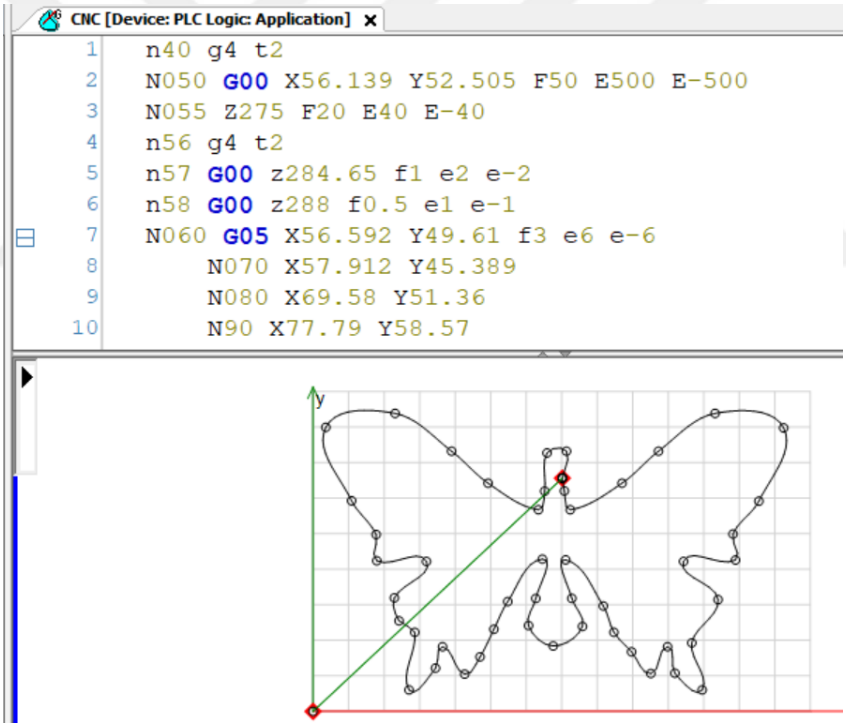
Bu çalışmada CNC makinelerinin standart donanım ve yazılım özellikleri kullanılarak Spline eğrileri üretilmiştir. Önerilen çözüm endüstriyel otomasyon sistemlerinde kullanılan bir geliştirme ortamı olan CODESYS üzerinde SMB Technics MAT-LC-C07 hareket kontrolörü kullanılarak geliştirilmiştir. Bu platformda oluşturulan yazılımla B-Spline ve NURBS gibi karmaşık eğrilerin tanımlanması için G5 komutu ile Spline çalışmaları yapılmıştır. G5 komutu, G-kodda eğri uydurmak için yeni yol kodunu üretebilen bir interpolasyon fonksiyonu özelliğine olanak sağlamıştır. Böylelikle kelebek parçası işleme sürecinde kullanılarak dikkate değer sonuçlar elde edilmiştir. Örnek çalışma veri noktalarının en iyi şekilde temsil edilmesini sağlayan B-Spline yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.1'de örnek bir G-kod dosyasındaki kelebek şeklindeki nokta bulutlarını NC Viewer programında simülasyonu gösterilmiştir. Bu noktalar bulutu CODESYS yazılımı ile *X*-*Y* düzleminde eğrilerine dönüştürülerek B-Spline eğri

uydurma çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın G-kod yazılım örneği ve kelebeğin noktalar kümesinin görüntü simülasyonu Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.1 B-Spline eğri uydurma çalışmasında işlenecek kelebek noktalar kümesinin G-kod görüntü simülasyonu



Şekil 4.2 CODESYS G5 eğri uydurma yöntemi ile kelebeğin düzenlenmesi

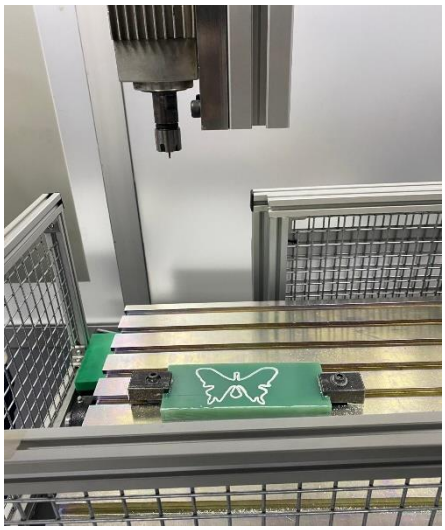
Geliştirilen G-kod yazılımı makine yönetimi için komutların en uygun şekilde yapılandırılmasının yanı sıra eğrilerin tanımlanması ve istenen işleme operasyonunun gerçekleştirilmesi için kaynak G-koda yeni bir yazılım eklenerek sağlanmıştır. Bu sonuçlar B-Spline odaklı eğri uydurma yöntemi ile elde edilmiştir. Bu yöntem, kesici takımın hız, ivme ve sarsınım profilleri ile işlenecek yörüngenin bilgilerini kullanır. Sistemin kartezyen düzlemde kesici takım

yörüngesi belirlendikten sonra CNC tezgâhında ürünü işlemek için eksen motorlarına uygun yörüngelerin gönderilmesi gerekmektedir. Bu yörüngelere interpolasyon işlemi tamamlandığında ulaşılır. CNC tezgâhında planlanan hız profilinin doğru bir şekilde gerçekleşebilmesi için interpolasyon işlemi dikkatli yapılmalıdır. Çünkü hız profilinin doğru planlanması kesici takımın bu profil ile uyumlu hareket etmesini sağlar. Bu parametreler kullanarak *X* ve *Y* eksenindeki motorlarına yörüngeleri gönderilerek *X*-*Y* düzleminde Şekil 4.3'te gösterilen uygulama gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada CODESYS üzerinden yazılım, *X*-*Y* düzlemi üzerinde B-Spline ve NURBS gibi karmaşık eğrilerin işlenebilmesi için üç eksenli bir CNC makinesine özelleştirilmiştir. Böylelikle CNC makine için yazılımı en uygun şekilde yapılandırmakla kalmayıp aynı zamanda eğrilerin tanımlanması ve istenilen işleme işleminin gerçekleştirilmesi için yeni bir fonksiyon ekleyerek kaynak kod üzerinde değişiklik yapma olanağı sunmuştur. Böylelikle Şekil 4.4'te kinematik modeli tasarlanan CNC tezgâh üzerinde nokta bulutlarını gerçek zamanlı olarak hassas bir şekilde işlemişlerdir. Önerilen yöntem aşağıdaki avantajları sağlamıştır.

- NURBS ve B-Spline gibi karmaşık eğriler içeren parça programının daha iyi bir şekli ve yönetilebilirliği
- Takım yolunun değiştirilmesini mümkün kılan daha yüksek okuma kolaylığı
- İnterpolasyon yönteminin daha kolay uygulanması, karmaşık hesaplamalar gerektirmemesi ve her CNC'de bulunan dairesel interpolasyon fonksiyonlarından yararlanılması
- Daha yüksek besleme hızına ulaşma imkânı sayesinde klasik interpolasyon yöntemlerine göre daha kısa işleme süresi ve daha iyi hareket akıcılığı
- CAM yazılımları için CODESYS ara yüzünün doğrudan kullanımı

Sonuç olarak bu yöntem deneysel testlerle doğrulanmış ve gerçek işlevselliği gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Kelebek şeklinin CNC tezgâhta X-Y düzleminde işlenmesi



Şekil 4.4 Kinematik modeli tasarlanan CNC tezgâhında işleme çalışmaları

Bu çalışmada kelebek şeklini CNC işleme için optimize etmek amacıyla B-Spline eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. B-Spline eğrileri, nokta dizilerini pürüzsüz ve sürekli bir şekilde birleştirerek, yüksek doğruluk ve yüzey kalitesi elde etmeyi sağlar. G-kodları ve elde edilen sonuçlar görsellerle sunulmuştur. Şekil 4.1'de sunulan görselde ham verilerden elde edilen nokta dizisinin keskin köşelere ve düzensizliklere sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.2'de sunulan ikinci görselde ise B-Spline yöntemiyle optimize edilen takım yolu sunulmuştur. Bu yöntem eğrinin keskin köşelerini yumuşatarak, daha pürüzsüz ve akıcı bir takım yolu oluşturmuştur. İşlem sonunda iş parçasının yüzey kalitesini artırırken takım

aşınmasını ve makine titreşimlerini de azalmış olur. Sonuç olarak B-Spline eğri uydurma yöntemi CNC işleme süreçlerinde kalite sağlayan etkili bir araç olduğunu kanıtlamıştır.

4.2 Evrimsel Algoritmalar ile Yol Planlama Optimizasyonu

4.2.1 Evrimsel Algoritmaların Uygulanması

Bu bölümde EA'lar kullanılarak gerçekleştirilen yol planlama çalışmalarının sonuçları detaylı olarak sunulmuştur. MATLAB programında kullanıcı tarafından belirlenen bir başlangıç noktasından bir hedef noktaya bir yol optimizasyon çalışması yapılmıştır. Başlangıç ve hedef noktalarının eklem hızları ve ivmeleri sıfır olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.1 NSGA-II parametre değerleri

Tanım	Sembol	Değeri
Popülasyon sayısı	N	100
Tekrarlama sayısı	G	100
Çaprazlama oranı	p_c	0.8
Mutasyon yüzdesi	p_m	0.4
Çaprazlama indeksi	n_c	40
Mutasyon indeksi	n_m	20

Tablo 4.1'de NSGA-II için optimizasyon100 iterasyon için yürütülmüştür. NSGA-II algoritma parametreleri, sırasıyla çaprazlama yüzdesi (p_c), mutasyon yüzdesi (p_m), çaprazlama sayısı (n_c) ve mutasyon sayısı (n_m) ara noktalar için 100 elemanlı bir popülasyon olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.2'de GA algoritma parametreleri, çaprazlama yüzdesi (p_c), çaprazlama için ekstra aralık faktörü (γ), mutasyon yüzdesi (p_m), mutasyon oranı (m_u)

mutasyon katsayısı, uniform mutasyon aralığı (δ), simülasyon yazılımındaki benzer değişken parametreler için seçim baskısı (β) olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.2 GA parametre değerleri

Tanım	Sembol	Değeri
Popülasyon sayısı	N	500
Tekrarlama sayısı	G	100
Çaprazlama oranı	p_c	0.7
Mutasyon yüzdesi	p_m	0.3
Mutasyon aralığı	γ	0.4
Mutasyon oranı	m_u	0.1
Seçim baskısı	β	8

ABC algoritma parametrelerinin gözlemci (O) ve kâşif arıları (S) tanımlanmış ve popülasyon büyüklüğü 500 eleman olarak belirlenmiştir. Detaylı parametreler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 ABC parametre değerleri

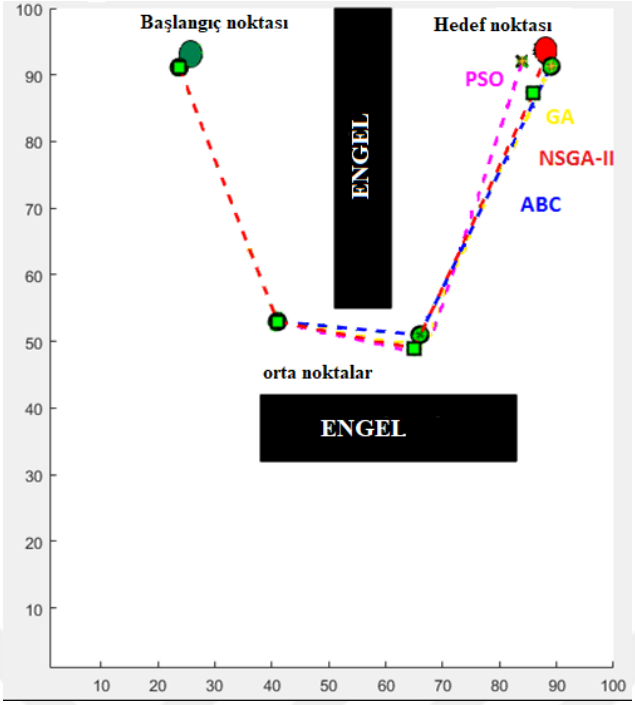
Tanım	Sembol	Değeri
Popülasyon sayısı	N	500
Tekrarlama sayısı	G	100
Kâşif arı sayısı	S	600
Gözlemci arı sayısı	O	500

Bu bölümde PSO algoritması için kullanılan parametreler tanımlanmaktadır. Eylemsizlik ağırlığı (w), popülasyon büyüklüğü ve iterasyon sayısı Tablo 4.4'de sağlanmıştır. PSO algoritma parametrelerinin kişisel ve küresel öğrenme katsayıları sırasıyla C_1 ve C_2 olarak tanımlanmıştır. Ek olarak eylemsizlik ağırlığı sönüm oranı (w_{damp}) tanımlanmıştır.

Tablo 4.4 PSO parametre değerleri

Tanım	**Sembol**	**Değeri**
Popülasyon sayısı	N	500
Tekrarlama sayısı	G	100
Eylemsizlik ağırlığı	w	1
Sönüm oranı	w_{damp}	0.99
Kişisel öğrenme kat sayısı	C_1	1.5
Küresel öğrenme kat sayısı	C_2	2

EA'lar ile yol planlamasının başarı kriteri kullanıcı tarafından belirlenen başlangıç noktasından hedef noktaya en kısa yolu belirleyip engellere çarpmadan güvenli yörüngesini kısa sürede tamamlamasıdır. NSGA-II, GA, ABC ve PSO algoritmaları 100 iterasyon sayısı ile çalıştırılmıştır. Tüm yöntemler için tek bir uzayda aynı başlangıç ve hedef noktaları seçilmiş ve aynı engelleri aşması istenmiştir. Bu dört EA'nın hedef konuma doğru optimal pozisyon planlaması Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



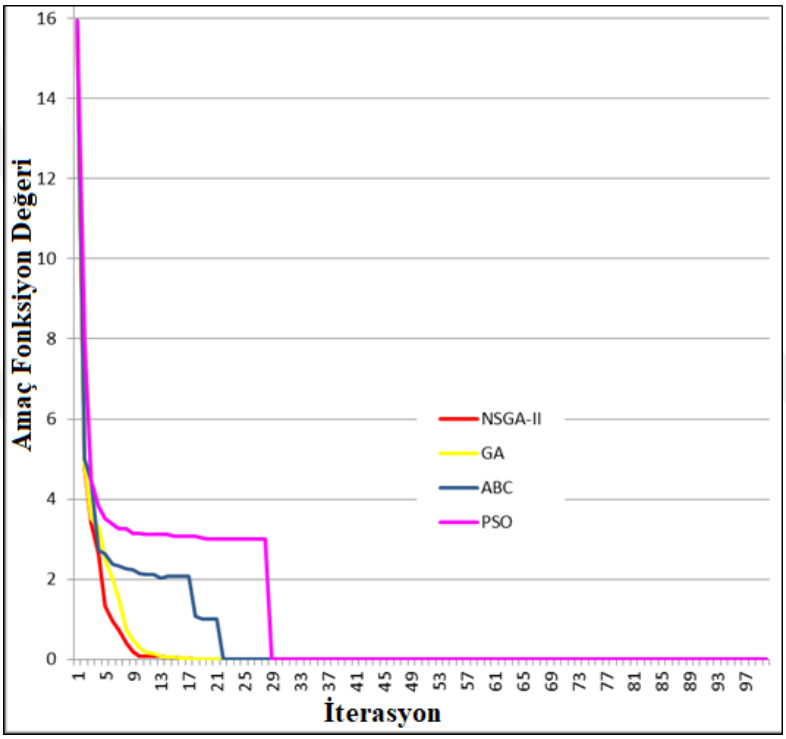
Şekil 4.5 Dört algoritmanın hedef konuma doğru optimal pozisyon yörüngesi

Tablo 4.5 Optimizasyonların gerçekleşme süresi

Optimizasyon Yöntemi	Geçen Süre (sn)
NSGA-II	100.9
GA	108.82
ABC	112.63
PSO	187.78

Şekil 4.5'te, NSGA-II, GA, ABC ve PSO algoritma simülasyon sonuçlarının yol planlama karşılaştırmaları gösterilmektedir. Tüm algoritmaların neredeyse aynı yol güzergahını takip etmiştir. Ancak NSGA-II'nin diğerler algoritmalardan daha önce hedefe ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.5'de yer alan simülasyon sonucu incelendiğinde GA, ABC ve PSO'nın engel varlığı durumunda toplam yörünge uzunluğunun NSGA-II sonuçlardan daha fazla olduğu görülmektedir. Tablo 4.5'te NSGA-II algoritmasının toplam seyahat süresinin en kısa değerde olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 4.6'te amaç fonksiyonu değerinin iterasyona bağlı değişimi sunulmuştur. NSGA-II ve GA'nın optimal pozisyon yörüngesini sağladığı görülebilir. Bu iki algoritma, hedef noktaya kısa sürede ve daha az iterasyon sayısıyla ulaşabilmektedir. Ayrıca ABC ve PSO algoritmalarına göre daha başarılıdır. Bu grafiğe göre NSGA-II (9 iterasyon) ve GA (13 iterasyon) en iyi maliyetlerini, ABC (23 iterasyon) ve PSO (29 iterasyon) ile karşılaştırıldığında daha hızlı elde edildiğini göstermektedir. Robot manipülatörün EA'lar ile yörünge planlamasının performansı, algoritma parametreleri ile de ölçülmüştür. Bu ölçütler optimal yörüngeler, engellerden kaçınma ve hedefe ulaşma gibi performans parametreleridir.

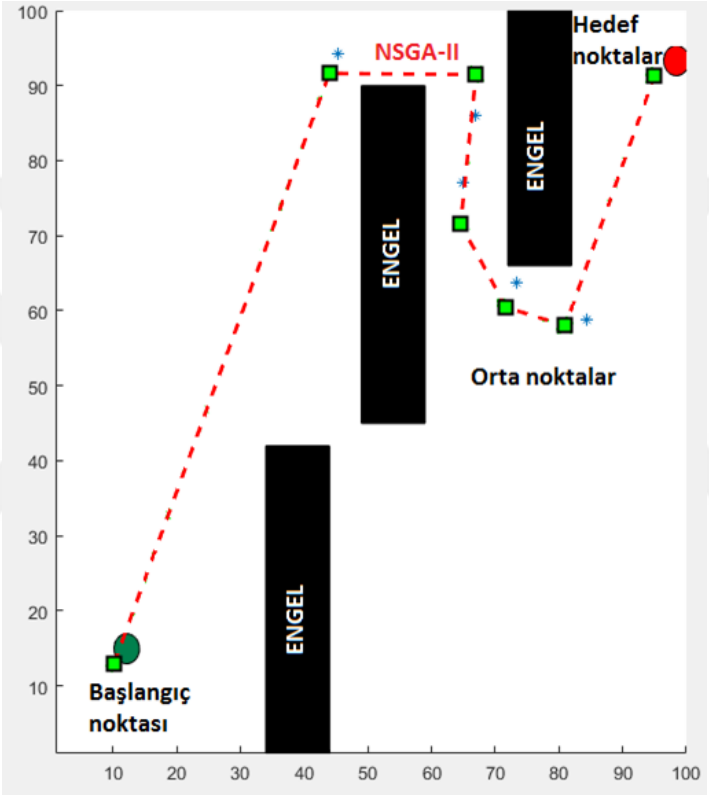


Şekil 4.6 Evrimsel algoritmanın iterasyon sayısına göre optimizasyon sonuçları

Önerilen yöntem yol planlama problemlerini iki ardışık adımda çözer. İlk olarak yöntem, mobil robotun başlangıç ve hedef konumlarını bağlayan çarpışmasız bir yol oluşturmak için ABC, GA ve PSO gibi tek amaçlı fonksiyonlu algoritmaları kullanarak uygulanabilir bir yol üretir. İkinci olarak elde edilen uygulanabilir yolu evrimsel algoritma ile geliştirir. Bir dizi mutasyon operatörü, çarpışmasız, kısa ve pürüzsüz yollar elde etmek için yolu iyileştirir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için MATLAB ortamında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonunda bu yöntemi CNC yol planlama

problemini kapsayacak şekilde genişleterek gelecek çalışmalara rehber etmesi sağlanmıştır.

İkinci çalışmada, NSGA-II başlangıç noktasından hedef noktaya ulaşmak için uygulanmıştır. Engel sayısı artırılmış ve engellerin yerleşimi değiştirilmiştir. NSGA-II optimizasyon yörünge planlama simülasyon sonucu Şekil 4.7'te gösterilmiştir. Beklendiği gibi NSGA-II yaklaşımı, 133.34 sn gibi bir sürede hedef noktaya ulaşmak için en kısa ve güvenilir yörüngeyi seçmiştir.



Şekil 4.7 NSGA-II optimizasyon yörünge planlama simülasyon sonucu

4.2.2 Simülasyon Sonuçlarının Yorumlanması

Bu çalışmada, EA'ların amaç fonksiyonlarına dayalı bir yol planlama yöntemi sunulmuştur. Önerilen yol planlama optimizasyonunun sonuçları NSGA-II, GA, ABC ve PSO yöntemleri kullanılarak seyahat mesafesi ve geçen süre açısından karşılaştırılmıştır. Seyahat mesafesi ve geçen süredeki genel iyileşmelerin simülasyon sonuçları gösterilmiştir. NSGA-II algoritması, özellikle diğer amaç fonksiyonları ile birlikte engel çarpışmalarından kaçınmak için etkili ve hızlı bir çözüm sunmaktadır. NSGA'nın engel sayısı artsa bile yol planlamasının hala

başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca yol daha karmaşık olsa da seyahat süresinde iyileşme sağlamıştır. Önerilen yörünge planlamasının başarısı, toplam seyahat süresi ve seyahat mesafesine dayanmaktadır. NSGA-II, çok amaçlı optimizasyonu verimli bir şekilde gerçekleştirebildiğini kanıtlamıştır. Sonuç olarak NSGA-II, CNC tezgâhlarda belirtilen amaç fonksiyonlarına göre yol planlama problemleri için başarılı bir yöntemdir. Çalışmadaki simülasyonlar, Intel i5 8. Nesil İşlemci 8 Çekirdekli bir bilgisayar kullanılarak Matlab 2017b programında gerçekleştirilmiştir.

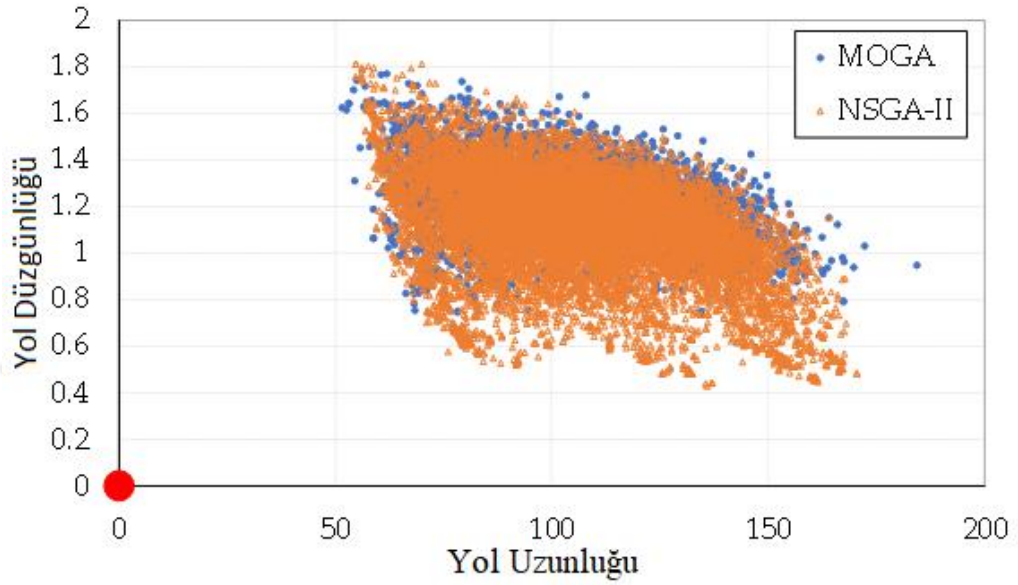
4.3 NSGA-II ile Kesim Yapmayan Takım Yolu için Çok Amaçlı Optimizasyon Çalışması

Bu çalışmada çok amaçlı takım yolu optimizasyonu için NSGA-II kullanılmıştır. NSGA-II, çözüm alanında çeşitliliği sağlamak için CD metriğini entegre eder. Böylece daha verimli kesim yolları elde eder. CD, NSGA-II'nin bir stratejisi olarak Pareto cephesinde çözüm çeşitliliğini sağlamak için kullanılır [78], [83]. Bu yaklaşım her popülasyona yakın çözümlerin dağılımını değerlendirerek elde edilir. CD, her birey ile en yakın iki komşusu arasındaki normalleştirilmiş mesafelerin tüm hedefler üzerinde toplanmasıyla hesaplanır [103]. Bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip iş parçaları için kesim yollarının optimizasyonuna hem kalite hem de verimlilik açısından çözümlerin geliştirilmesini dengeleyerek yardımcı olur. CD'nin kullanımı, çözüm popülasyonunun geniş bir çözüm yelpazesini kapsamasını sağlar. Böylece kesim yollarının hızını ve doğruluğunu artırır. Bu yaklaşım, üretim süreçlerinde maliyet ve zaman tasarrufu sağlarken iş parçasının kalitesini artırır.

4.3.1 MOGA ve NSGA-II Pareto Çalışması

Burada açıklanan Pareto çalışması, takım yolu planlama sürecinde çeşitli çıktılar üretilmesini kolaylaştırarak NSGA-II tabanlı optimal yol planlayıcısının performansının kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Şekil 4.8, yaklaşık Pareto etkinliğini göstermektedir. Kırmızı nokta, optimal referans noktasını temsil eder. Turuncu üçgenler ve mavi noktalar sırasıyla optimize edilmiş NSGA-II ve MOGA tarafından elde edilen çözümleri göstermektedir. Baskın olmayan sonuçlarda köşe noktaları optimal referans noktasına en yakın olan çözüm temsil edilir. Karşılaştırmalı simülasyon sonuçlarına göre NSGA-II ve MOGA aynı

çözüm kümelerini sergilemektedir. Ayrıca NSGA-II tarafından sağlanan baskın olmayan sonuçlar daha yoğun bir dağılım göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi en iyi sonuçlar optimal referans noktasına en yakın olan noktalar tarafından sunulmuştur.



Şekil 4.8 Yol uzunluğu ve yol düzgünlüğü amaç fonksiyonlarının MOGA ve NSGA-II optimal Pareto sınır grafiği

4.3.2 Takım Yolu Planlama için NSGA-II Parametre Değerleri

NSGA-II algoritmasını kullanarak CNC işleme süreçlerinde kesim dışı yollar arasındaki mesafeyi azaltmak için takım yolu optimizasyonunun etkinliği deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Deneyler boyunca NSGA-II için tutarlı parametre ayarları Tablo 4.6'de açıklandığı gibi korunmuştur.

N, algoritmanın yürütülmesi sırasında herhangi bir anda bir popülasyonda tutulan bireysel çözümlerin sayısını ifade eder. G, algoritmanın bir nesilden diğerine popülasyonu evrimleştirmek için gerçekleştirdiği toplam döngü sayısını gösterir. Her nesil optimizasyon sürecini bir iterasyon temsil eder.

Çaprazlama indeksi n_c, yavru bireylerin ebeveyn çözümleri etrafında nasıl yayılacağını etkiler. Yavru bireylerin ebeveynlerin etrafında ne kadar sıkı kümeleneceğini belirler. Çaprazlama oranı p_c, üreme sürecinde çaprazlamanın gerçekleşme olasılığını tanımlar. Mutasyon indeksi n_m, yavru bireylere uygulanan mutasyonların yayılımını kontrol eder. Bir çözümün kromozomu boyunca mutasyonların nasıl dağıtıldığını etkiler. Mutasyon oranı p_m, bir yavru bireyde

mutasyonun gerçekleşme olasılığını tanımlar. Mutasyonlar genetik materyale rastgele varyasyonlar getirilerek çeşitliliği korumaya ve daha iyi çözümler keşfetmeye yardımcı olur.

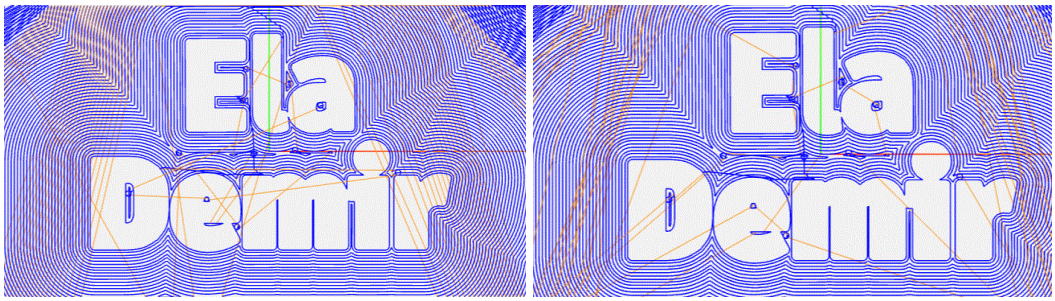
Tablo 4.6 NSGA-II parametre değerleri

Tanım	Sembol	Değeri
Popülasyon sayısı	N	300
Jenerasyon büyüklüğü	G	500
Çaprazlama indeksi	n_c	5
Çaprazlama oranı	p_c	0.9
Mutasyon indeksi	n_m	20
Mutasyon oranı	p_m	0.1

4.3.3 Takım Yolu Optimizasyonu Simülasyon Sonuçları

CNC tezgâh takım yolu için önerilen optimizasyonu yaklaşımının güvenilir karşılaştırmalı analizi ve değerlendirmesi için G-kod üzerine çalışmalar yapılarak sonuç simülasyonları sunulmuştur. Simülasyonlar, Intel i7 13. Nesil İşlemci 20 Çekirdekli bir bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Python simülatöründe 8.72 sn sürmüştür.

Şekil 4.9'da gösterilen örnek bir çalışma parçasında mavi çizgilerle gösterilen yollar işleme yollarıdır. Turuncu çizgilerle gösterilen yollar ise kesim dışı hareketlerdir. Bu çalışmada örnek parçanın G-kodu Elitist-NSGA-II algoritması ile optimize edilerek kesim dışı hareketlerinde şekilden de görüleceği üzere bir azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.9 Örnek bir çalışma parçasının orijinal ve optimize edilen hareket yollarının karşılaştırılması

Bir başka deneysel çalışmada bir CNC tezgâhta İş Parçası 1 ve 2 işlenmiştir. Bu parçalar CNC makinelerinde işlenirken hem kesme olmayan hem de işleme hareketlerini kullanırlar. İşleme yolu mavi çizgilerle, kesim yapılmayan hareketler ise turuncu çizgilerle gösterilmiştir. İş Parçası 1'in orijinal takım yolu Şekil 4.10'da gösterildiği gibi kesme olmayan turuncu çizgi hareketleri oldukça fazladır. Şekil 4.11, İş Parçası 1'in optimize edilmiş takım yolunu göstermektedir. Şekilden görülebileceği gibi kesme yapılmayan turuncu çizgilerde ciddi bir azalma olmuştur. Kesme olmayan mesafelerde %29.29'luk önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Mesafe 5678.4 mm'den 4015.2 mm'ye düşürülmüştür. Yol mesafesinde toplamda 663.2 mm'lik bir kısalma meydana gelmiştir. İş Parçası 1 için kesme olmayan mesafenin deneysel sonuçları Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Tablo 4.7 İş Parçası 1 için optimizasyonların gerçekleşme süresi

İş Parçası Versiyonu	**Kesme Yapılmayan Toplam Yol Uzunluğu (mm)**
Orijinal iş parçası	5678.4
Optimize edilen iş parçası	4015.2



Şekil 4.10 İş Parçası 1 için orijinal işleme programının gösterimi

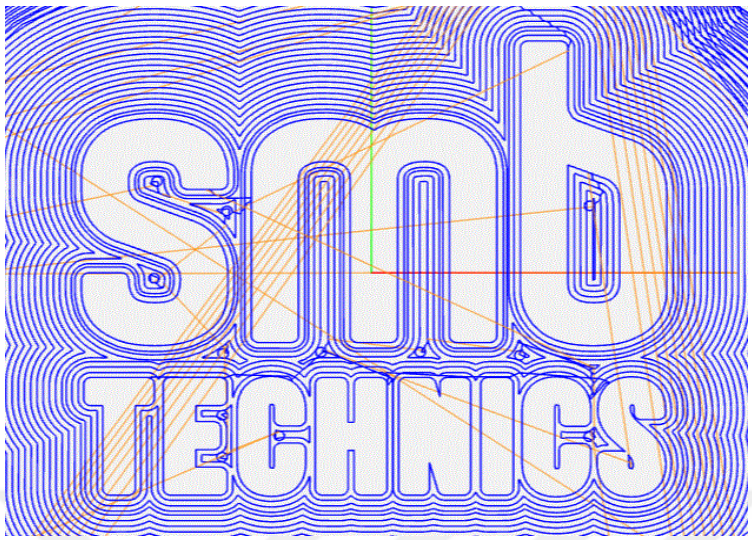


Şekil 4.11 İş Parçası 1 için optimize edilmiş işleme programının gösterimi

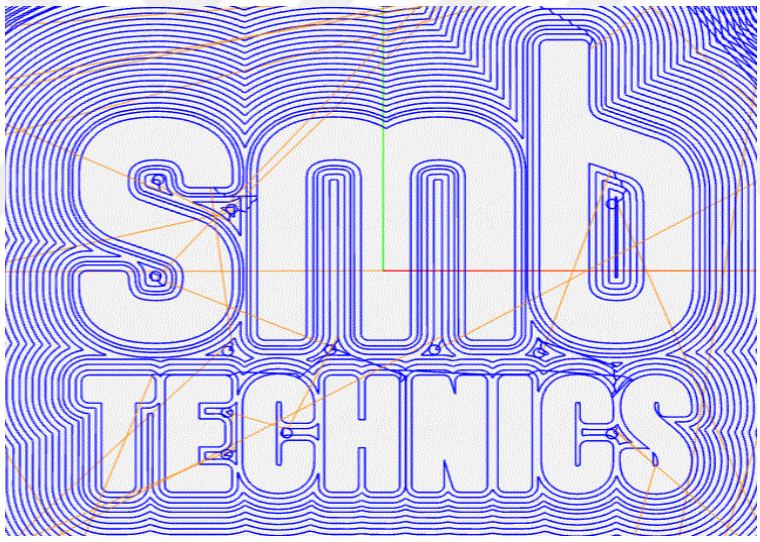
Başka bir çalışmada kullanılan yaklaşımın performansını görmek için Şekil 4.12'de gösterilen yeni ve farklı bir iş parçası (İş Parçası 2) kullanılmıştır. Şekil 4.13'den görülebileceği gibi İş Parçası 2'nin optimize edilmiş takım yolu, kesme olmayan mesafeleri 4703.6 mm'den 3203.2 mm'ye düşürmüştür. Yol mesafesinde toplamda 1500.5 mm'lik bir kısalma olmuştur.

Tablo 4.8'te gösterildiği gibi kesme yapmayan yol mesafesinde %31.9'luk önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Bu optimizasyon çalışmaları sadece işleme süresini azaltmakla kalmaz aynı zamanda CNC işleme operasyonlarının verimliliğini artırarak malzeme israfını azaltmaya da katkıda bulunur. Yapılan bu çalışmalar takım yolu optimizasyon tekniklerinden yararlanarak üretim süreçlerini

iyileştirmenin ve CNC işleme uygulamalarında verimliliği artırmanın potansiyelini vurgulamaktadır.



Şekil 4.12 İş Parçası 2 için orijinal işleme programının gösterimi



Şekil 4.13 İş Parçası 2 için optimize edilmiş işleme programının gösterimi

Tablo 4.8 İş Parçası 2 optimizasyonların gerçekleşme süresi

İş Parçası Versiyonu	**Kesme Yapılmayan Toplam Yol Uzunluğu (mm)**
Orijinal iş parçası	4703.6
Optimize edilen iş parçası	3203.2

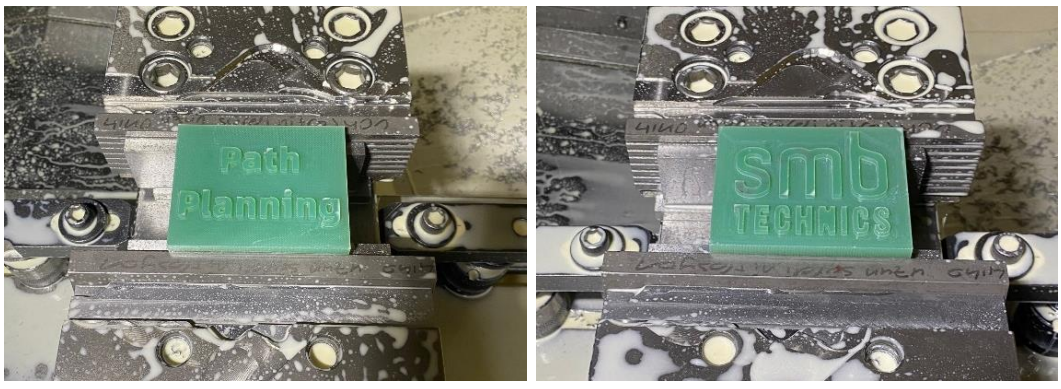
4.3.4 Takım Yolu Optimizasyonu Deneysel Sonuçları

Takım yolları optimize edilen iş parçalarının CNC makinesinde üretim sırasında elde edilen fotoğrafları Şekil 4.14'da gösterilmiştir. Üretim sırasındaki işleme çevrim süreleri Tablo 4.9'da karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.9 CNC makine işleme süreleri

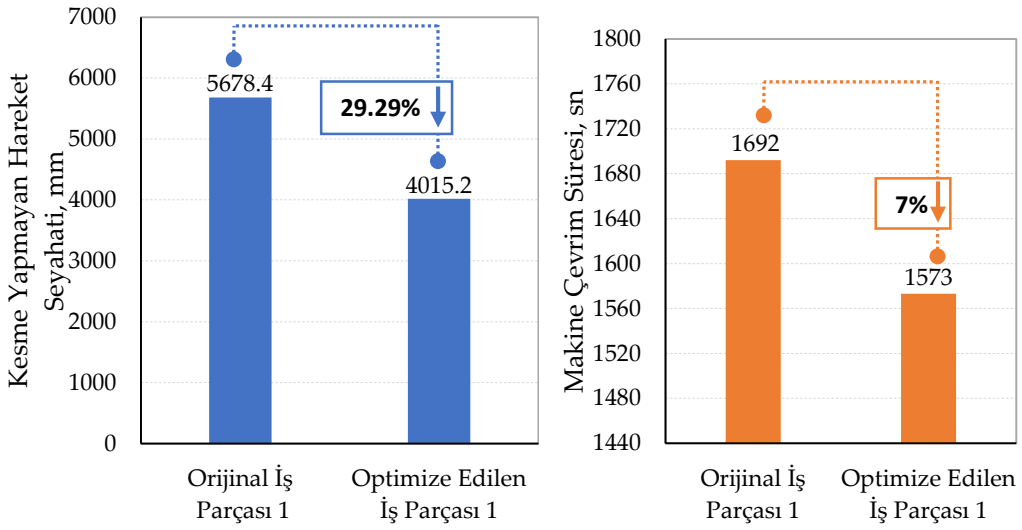
İş Parçası Versiyonu	Makine İşleme Süresi (sn)
Orijinal iş parçası 1	1692
Optimize edilen iş parçası 1	1573
Orijinal iş parçası 2	1518
Optimize edilen iş parçası 2	1416

Tablo 4.9'a göre İş Parçası 1 için çevrim süresinin 1692 sn'den 1573 sn'ye düşürüldüğü ve yaklaşık 119 sn iyileştirme sağlandığı gözlenmiştir. Bu durum Şekil 4.15'te gösterildiği gibi makine çevrim süresinde yaklaşık %7'lik önemli bir iyileşmeyi temsil etmektedir. Aynı prosedürler İş Parçası 2'ye de uygulanmış ve makine çevrim süresi iyileştirilmiştir. Optimize edilmiş İş Parçası 2 için azalma 102 sn'dir. Bu durum Şekil 4.16'de gösterildiği gibi, makine çevrim süresinde yaklaşık %6.72'lik önemli bir iyileşmeyi temsil etmektedir.



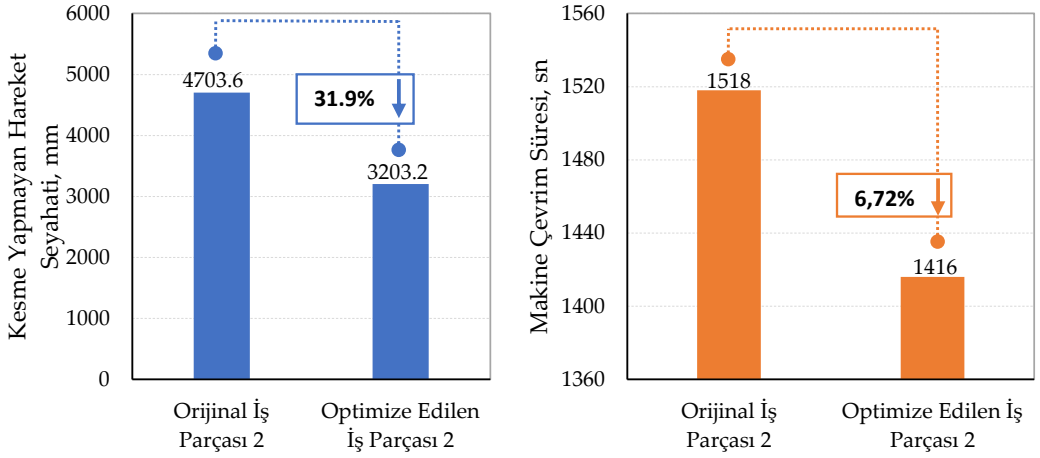
(a) (b)

Şekil 4.14 CNC makinesinde işlenen parçalar a) İş Parçası 1 ve (b) İş Parçası 2



(a) (b)

Şekil 4.15 Orijinal İş Parçası 1 ve optimize edilmiş İş Parçası 1'in (a) kesim dışı toplam hareket seyahati ve (b) çevrim süresi karşılaştırma grafiği



(a) (b)

Şekil 4.16 Orijinal İş Parçası 2 ve optimize edilmiş İş Parçası 2'in (a) kesim dışı toplam hareket seyahati ve (b) çevrim süresi karşılaştırma grafiği

Bu çalışmanın deneysel sonuçlarına göre başlangıçta takım yolları gereksiz dönüşler ve uzun mesafeler içermektedir. Bu yolları daha verimli hale getirmek için elit stratejiye sahip NSGA-II uygulanmıştır. Elitist-NSGA-II, yolculuk mesafelerini azaltarak ve yolu basitleştirerek güzergâhı optimize eder. Sonuç olarak optimize edilmiş takım yollarında gösterildiği gibi daha düzgün ve daha doğrudan bir rota elde edilmiştir. Optimizasyon süreci, yolu mümkün olan en verimli şekilde bağlanması gereken bir dizi nokta olarak tanımlar. Bir yandan işlevsel kısıtlamalara uyarken bir yandan da toplam yol mesafesini en aza

indirmeyi hedefler. Bu optimizasyon için kullanılan amaç fonksiyonu ardışık noktalar arasındaki Öklid mesafesi ve her noktadaki açısal sapma gibi faktörleri içermektedir. Bu yaklaşım doğru noktalar arasında daha düzgün bir geçişi kolaylaştırmıştır. Çalışmanın sonuçları, optimizasyondan önce ve sonra toplam yol uzunluklarını karşılaştırarak ve açısal değişimlerde önemli bir azalma gözlemlenerek değerlendirilmiştir. Bu optimizasyon yöntemi CNC uç işlevcinin noktalar arasında daha verimli hareket etmesini sağlayarak yol karmaşıklığını azaltmıştır.

5
SONUÇ

Günümüzde endüstriyel üretimde CNC tezgâhlarda yörünge planlama, tezgâhların işleme performansını artırmak amacıyla pek çok akademik çalışmada yer almıştır. Literatürde yer alan çalışmalar CNC tezgâhlarda yol planlama algoritmaları, kinematik modelleme, eğri uydurma, köşe yumuşatma ve interpolasyon hesaplamaları olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmaların temel amacı takım yol uzunluğu azaltılarak titreşimi en az, yüksek hızda ve yüksek hassasiyette CNC tezgâh yörünge planını sağlamaktır. Bu hedeflere ulaşmak için yörünge planlaması, kinematik analizler, uygun hız, ivme ve sarsınım profillerinin tanımlanması ve de bu profillere uygun yörünge interpolasyonunun doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekir. Bu doğrultuda geliştirilen CNC yörünge planlama ve hareket kontrol yöntemlerinin akademik çalışmalarda detaylı bir şekilde karşılaştırılması yapılmıştır. CNC tezgâhlarının endüstriyel uygulamalarda daha etkili ve verimli kullanılmasına olanak tanımıştır. Geleneksel ve yeni nesil yöntemleri yazılım çalışmaları ile bir araya getirerek yörünge planlama tasarımları gerçekleştirilmiştir Sonuç olarak yapılan çalışma literatürdeki eksiklikleri görerek CNC tezgâhlarının işleme performansını artıran yen bir yaklaşım sunmuştur.

Bu tezde gerçekleşen çalışmaların ana hedefi CNC tezgâhlarda yörünge planlama optimizasyonunu sağlamaktır. CNC tezgâhlarında bu optimizasyon çalışmaları yüksek hassasiyet ve verimlilik gerektiren süreçlerdir. Geleneksel takım yolu planlama yöntemleri, keskin köşeler ve düzensizlikler nedeniyle iş parçasının yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir. Bu problemleri aşmak için EA'lar ile takım yolu optimizasyonların yanı sıra B-Spline eğri uydurma yöntemi kullanılarak takım yolu optimize edilmiştir.

Tezin yenilikçi konularından biri CNC parça işleme süreçlerinde takım yolu uzunluğunu azaltırken ve yol pürüzlülüğünü iyileştirirken aynı zamanda da engellerden çarpmamayı hedefleyen çok amaçlı optimizasyon problemleri için EA yöntemlerini konu almaktadır. Çalışma sonuçları, NSGA-II tarafından oluşturulan baskın olmayan çözümlerin etkili sonuçlarını ortaya koymaktadır. Geliştirilen Elitist-NSGA-II, CNC makinesinin kesme yapmayan hareketleri sırasında yol

uzunluğunu ve maksimum dönüş açısını azaltarak takım yolunu tamamlamaktadır. Böylece daha kısa ve daha düzgün yolların oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır. Algoritmanın performansını artırmak amacıyla parametreler sistematik olarak incelenmiştir. Takım yolu planlaması, simülasyonlar ve deneysel çalışmalarla analiz edilmiştir. Bu sonuçlar elit özellik eklenmesiyle Elitist-NSGA-II tarafından oluşturulan baskın olmayan çözümlerin avantajlı parametrelerle tanımlandığını ve hem daha kısa hem de daha düzgün yollar için seçenekler sunduğunu göstermektedir.

Ayrıca yol uzunluğu ve yol pürüzlülüğü gibi hedefler NSGA-II ve MOGA'nın Pareto etkinliği içinde karşılaştırılmıştır. NSGA-II algoritması, MOGA ile uyumlu sonuçlar göstermiştir. Bu durum her iki algoritmanın da takım yolu planlama problemi için etkili olduğunu göstermektedir. Ancak burada tartışılan yöntem bireylerin incelenmesini içermektedir. MOGA yaklaşımı hesaplama maliyetlerini azaltabilirken çözümler genellikle inceleme adımı sırasında belirli bir noktaya doğru yakınsar. Bu durum MOGA için birey çeşitliliğinin kaybolmasına neden olabilir.

Bu tez üç aşamalı bir çalışma ile gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada kinematik yapılandırma çalışmaları oluşturulan bir CNC tezgâhta B-Spline ve NURBS gibi karmaşık eğrilerin işlenmesi için yazılım geliştirilerek başarılı sonuçlar elde etmiştir. CODESYS geliştirme ortamında SMB Technics MAT-LC-C07 hareket kontrolöründe Spline eğri uydurma yöntemi için yazılım gerçekleştirilmiş ve parçanın istenilen eğri interpolasyonu sağlanmıştır. Örnek kelebek parçası işleme sürecinde optimize edilen ve edilmeyen G-kod karşılaştırıldığında optimize edilen G-kodun B-Spline eğri uydurma yöntemi ile kesim çizgileri doğruluk sağlamıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen G-kod yazılımı, makine için komutları uygun şekilde yapılandırarak karmaşık eğrilerin tanımlanmasını ve istenilen işleme işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Ayrıca sistemin kartezyen düzlemde kesici takım yörüngesini belirlemesi ve doğru interpolasyon işlemi ile hareket profillerinin uyumlu hale getirilmesi CNC tezgâhın planlanan hareket profilini doğru bir şekilde gerçekleştirmesine olanak tanımıştır. Bu yöntemle NURBS ve B-Spline gibi karmaşık eğriler içeren parça programlarının daha iyi yönetilebilirliği sağlanmıştır. Ayrıca bu yöntemle daha yüksek besleme hızı ile kısa işleme süresi ve daha iyi hareket akıcılığı sağlanmıştır. Spline eğrileri, nokta

dizilerini pürüzsüz ve sürekli bir şekilde birleştiren yöntemleridir. Böylece takımın hareketleri daha akıcı ve yumuşak hale gelir. CNC tezgâhlarının yüksek hızlarda bile hassas ve kaliteli işlemler gerçekleştirmesini sağlar. Ayrıca B-Spline eğrileri, takım aşınmasını azaltarak makine bakım maliyetlerini düşürür ve işlem süresini kısaltır. Dolayısıyla B-Spline eğri uydurma yöntemi CNC tezgâh yörünge planlama ve takım yolu optimizasyonu süreçlerinde önemli bir rol oynayarak genel işleme performansını önemli ölçüde artırır. Özellikle kompleks geometrilere sahip parçaların işlenmesinde büyük avantaj sağlar. Ayrıca CODESYS ara yüzü ile G-kod yazılımlarına doğrudan müdahale edilebilmesi önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak önerilen yöntem deneysel testlerle doğrulanmış ve gerçek işlevselliği kanıtlanmıştır. Bu çalışmayla CNC işleme süreçlerinde önemli iyileştirmeler ve verimlilik artışı sağlanmıştır.

İkinci çalışma NSGA-II algoritmasının farklı EA algoritmaları uygulanmış yol planlama probleminde engellerden kaçınma yeteneği ile birlikte seyahat mesafesi ve seyahat süresinde önemli iyileştirmeler sağladığını ortaya koymuştur. Simülasyon sonuçları engel sayısı artsa bile yol planlamasının doğruluğunu koruduğunu ve yolun daha karmaşık hale gelmesine rağmen seyahat süresinde belirgin bir iyileşme elde edildiğini göstermiştir. NSGA-II'nin yol planlamadaki bu başarısı toplam seyahat süresini ve yol mesafesini kısalttığı simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır.

Son çalışmadaki simülasyon sonuçları ise NSGA-II'nin Pareto etkinlik durumuna dayalı olarak MOGA ile doğrulanarak iki farklı iş parçası için takım yolu planlamasını başarıyla optimize ettiğini göstermiştir. Optimizasyon çalışması hem yol uzunluğunu hem de çevrim süresini azaltmıştır. Deneysel sonuçlara göre Elitist-NSGA-II farklı iş parçaları üzerinde tutarlı performans sergilemiş ve çok amaçlı takım yolu problemi için iyi bir performans elde etmiştir. G-kod manipülasyonu ve takım yolu optimizasyonu kullanılarak yapılan analizler ve makine işleme çevrim süresinde önemli iyileşmeler ortaya koymuştur. Elitist-NSGA-II ile gerçekleştirilen CNC takım yolu optimizasyonu üzerine yapılan bu çalışma gerçek bir G-kod üzerinde uygulanan literatürdeki sayılı çalışmalardan biridir. Bu çalışma Elitist-NSGA-II algoritmasının CNC takım yolu optimizasyonunda sağladığı avantajları ve performansını göstermektedir. Algoritmanın hızlı çalışması, iyi çözümlere yakınsaması ve popülasyon

çeşitliliğini koruma yeteneğini sürdürmesi CNC süreçlerinin verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamıştır. Elde edilen sonuçlar, Elitist-NSGA-II'nin CNC takım yolu optimizasyonunda etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu kanıtlamaktadır. Bu çalışma ayrıca literatüre önemli bir katkı sağlayarak CNC takım yolu optimizasyonu alanında yeni ufuklar açmakta ve endüstriyel uygulamalarda CNC makinelerinin performansını iyileştirmek için yeni yöntemler sunmaktadır.

Deneysel çalışmaların sonuçları, NSGA-II kullanılarak yapılan yol optimizasyonunun daha kısa ve daha düzgün yollar sağladığını; optimal yolun yol uzunluğunda yaklaşık %30 ve işleme çevrim süresinde %7 azalma sağladığını göstermektedir.

Geliştirilen optimizasyon yöntemlerinde EA'ların çevrimdışı yol planlama ile sınırlı olduğu vurgulanabilir. Bu nedenle gelecekteki araştırmalarda NSGA-II'nin çevrimiçi optimizasyonunu ve kesim yapılan takım yolu iyileştirmeleri için yenilikçi yöntemlerin araştırılması düşünülebilir. Ayrıca yol planlama çalışmalarında robotun kinematiğini dikkate alınmamaktadır. Bu çalışma CNC işleme süreçlerinde takım yolu planlama tekniklerinin önemini ortaya koymakta ve gelecekteki araştırmalar için bir yol haritası sunmaktadır. İleriye dönük olarak çalışmada yapılan eğri uydurma yöntemleri ve çevrimdışı yol planlama algoritmaları birleştirilip kinematik hesaplar dikkate alınarak geliştirilebilir. Böylece gerçek zamanlı yol planlama problemleri ve uyarlamalı kontrol sistemleri kullanılarak daha fazla iyileştirme ve verimlilik artışı sağlanabilir.

KAYNAKÇA

[1] A. S. Ullah, "Modeling and simulation of complex manufacturing phenomena using sensor signals from the perspective of industry 4.0", Adv. Eng. Informat., vol. 39, 2019, pp. 1-13.

[2] M. Safaieh, A. Nassehi, S. T. Newman, "A novel methodology for cross-technology interoperability in CNC machining," Robot. Comput. Integr. Manuf., vol. 29, no. 3, pp. 79–87, 2013.

[3] Y. Zhang, X. Xu, Y. Liu, "Numerical control machining simulation: a comprehensive survey," Int. J. Comput. Integr. Manuf., vol. 24, no. 7, pp. 593–609, 2011.

[4] S. Russel, P. Norvig, Artificial intelligence: a modern approach, Pearson Education Limited, 2013.

[5] Y. Altintas, Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, 1st ed.; Cambridge University Press: Cambridge, 2000.

[6] F. F. Liou. Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, 2019.

[7] S. C. Park, B. K. Choi, "Tool-path planning for direction-parallel area milling," Comput. Aided Des, vol. 32, pp. 17–25, 2000.

[8] K. Castelino, R. D'Souza, P. K. Wright, "Tool path optimization for minimizing airtime during machining,". J. Manuf. Syst., vol. 22, pp. 173–180, 2003.

[9] A. K. Gupta, P. Chandna, P. Tandon, "Hybrid genetic algorithm for minimizing non-productive machining time during 2.5 D milling," Int. J. Eng. Sci. Technol., vol. 3, pp. 183–190, 2011.

[10] R. M. Aciu, H. Ciocharlie, "G-Code Optimization Algorithm and its application on Printed Circuit Board Drilling," in Pro-ceedings of the 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania, May 2014, pp.15–17.

[11] M. Mia, G. Królczyk, R. Maruda, S. Wojciechowski, "Intelligent Optimization of Hard-Turning Parameters Using Evolutionary Algorithms for Smart Manufacturing." Materials, vol. 12(6)879, 2019.

[12] I. Lazoglu, A. C. Manav, Y. Murtezaoglu, "Tool path optimization for free form surface machining," CIRP Ann., vol. 58, pp. 101–104, 2019.

[13] R. Sato, K. Shirase, A. Hayashi, "Energy Consumption of Feed Drive Systems Based on Workpiece Setting Position in Five-Axis Machining Center," J. Manuf. Sci. Eng., vol. 140(2), 2018.

[14] L. Zhou, J. Li, L., Fangyi, Q. Meng, J. Li, X. Xu, "Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review," J. Clean. Prod., vol. 112, pp. 3721–3734, 2016.

[15] Y. Gao, S. Mi, H. Zheng, Q. Wang, Z. Wei, "An Energy Efficiency Tool Path Optimization Method Using a Discrete Energy Consumption Path Model," Machines, vol. 10(5) 348, 2022.

[16] Y. Zhang, X. Xu, Y. Liu, "Numerical control machining simulation: A comprehensive survey," Int. J. Comput. Integr. Manuf., vol. 24, pp. 593–609, 2011.

[17] N. H. Alseedi, Y. Yusof, A. Kadir, "Abedlhafd, M.M. A Review of Tool Path Optimization in CNC Machines: Methods and Its Applications Based

on Artificial Intelligence," Int. J. Adv. Sci. Technol, vol. 29, pp. 3368–3380, 2020.
[18] S. M. Zahraee, M. K. Assadi, R. Saidur, "Application of Artificial Intelligence Methods for Hybrid Energy System Optimization." Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 66, pp. 617–630, 2016.
[19] S. A. Kalogirou, "Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 29, pp. 515-566, 2003.
[20] Y. Xin, S. Yang, F. Wu, R. Evans, F. Wu, "A tool path optimization approach based on blend feature simplification for multi-cavity machining of complex parts," Sci. Prog, vol. 103(1), 2020.
[21] K. S. Sangwan, S. Saxena, G. Kant, "Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using Integrated ANN-GA Approach," Procedia CIRP, vol. 29, pp. 305-310, 2015.
[22] G. Ghosh, P. Mandal, S. C. Mondal, "Modeling and optimization of surface roughness in keyway milling using ANN, genetic algorithm, and particle swarm optimization," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 100, pp. 1223–1242, 2019.
[23] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," in IEEE International Conference Robotics and Automation, ICRA, 1985, pp. 500–505.
[24] Y. Suzuki, A. Matsubara, Y. Kakino, S. Ibaraki, K. Lee, "Astudy on the tuning of CNC parameters to improve contour precision for NC machine tools," J. Jpn. Soc. Precis. Eng., vol. 69, pp. 1119-1123, 2003.
[25] N. K. Al-Sahib, H. F. Abdulrazzaq, "Tool Path Optimization of Drilling Sequence in CNC Machine Using Genetic Algorithm," Innovative Systems Design and Engineering, vol.5, no.1, 2014.
[26] N. M. Rodríguez, O. M. Ross, R. Sepúlveda, O. Castillo, "Tool Path Optimization for Computer Numerical Control Machines based on Parallel ACO," Engineering letters, vol. 20, 2011.
[27] G. Han, Z. Zhou, T. Zhang, H. Wang, L. Liu, Y. Peng, M. Guizani, "Ant-colony-based complete-coverage path-planning algorithm for under-water gliders in ocean areas with thermoclines," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 69, pp. 8959-8971, 2020.
[28] L. Xie, S. Xue, J. Zhang, M. Zhang, W. Tian, S. Haugen, "A path planning approach based on multi-direction algorithm for ships navigating within wind farm waters," Ocean Eng., vol. 184, pp. 311-322, 2019.
[29] D. Zhao, H. Yu, X. Fang, L. Tian, P. Han, "A path planning method based on multi-objective cauchy mutation cat swarm optimization algorithm for navigation system of intelligent patrol car," IEEE Access, vol. 8, pp. 151788-151803, 2020.
[30] F.L. Lewis, K. Liu, A. Yesildirek, "An Neural net robot controller with guaranteed tracking performance," IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 6, pp. 703–715, 1995.
[31] K. C. Chiou, S. J. Huang, "An adaptive fuzzy controller for robot manipulators," Mechatronics, vol. 15, pp. 151–177, 2005.
[32] J. Aguilar, L. Aguilar, O. Castillo, "Intelligent Control of Robotic Autonomous Systems using a Neuro-Fuzzy-Genetic Approach," Soft Computing and Industry, pp. 157-166, 2002.

[33] M. C. Tsai, M. Y. Cheng, K. F. Lin, N. C. Tsai, “On acceleration/deceleration before interpolation for CNC motion control,” in Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics, ICM, 2005, pp. 382-387.
[34] R. Dewil, I. Kucukoglu, C. Luteyn, D. Cattryse, “A critical review of multi-hole drilling path optimization,” Arch. Comput. Methods Eng., vol. 26, pp. 449–459, 2019.
[35] A. Nassehi, W. Essink, J. Barclay, “Evolutionary algorithms for generation and optimization of tool paths,” CIRP Ann., vol. 64, pp. 455–458, 2015.
[36] W. C. E. Lim, G. Kanagaraj, S. G. Ponnambalam, “A hybrid cuckoo search-genetic algorithm for hole-making sequence optimization,” J. Intell. Manuf., vol. 27, pp. 417–429, 2014.
[37] K. Erkorkmaz, Y. Altıntaş, “High speed CNC system design. Part I: Jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation,” Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 41, pp. 1323-1345, 2001.
[38] N. Uchiyama, K. Mori, “Terashima, K.; Saeki, T. Optimal Motion Trajectory Generation and Real-Time Trajectory Modification for an Industrial Robot Working in a Rectangular Space”, J. Syst. Des. Dyn., vol. 7, pp. 278–292, 2013.
[39] J. Dong, P. M. Ferreira, J. A. Stori, “Feed-rate optimization with jerk constraints for generating minimum time trajectories,” Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 47, pp. 1941–1955, 2007.
[40] M. Heng, K. Erkorkmaz, “Design of a NURBS interpolator with minimal feed fluctuation and continuous feed modulation capability,” Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 50, pp. 281–293, 2010.
[41] Y. Suzuki, A. Matsubara, Y. Kakino, S. Ibaraki, K. Lee, “A study on the tuning of CNC parameters to improve contour precision for NC machine tools,” J. Jpn. Soc. Precis. Eng., vol. 69, pp. 1119-1123, 2003.
[42] Q. Zhang, S. Li, J. Guo, “Smooth time-optimal tool trajectory generation for CNC manufacturing systems,”, J. Manuf. Syst., vol. 31, pp. 280–287, 2012.
[43] R. Ramesh, M. Mannan, A. Poo, “Tracking and contour error control in cnc servo systems,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45, pp. 301–326, 2005.
[44] D. E. Whitney, “Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses,” IEEE Transactions on Man-Machine Systems, vol. 10, pp. 47–53, 1969.
[45] A. Liegeois, “Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 7, pp. 868–871, 1977.
[46] Y. Nakamura, H. Hanafusa, “Optimal Redundancy Control of Robot Manipulators,” The International Journal of Robotics Research, vol. 6, pp. 32–42, 1987.
[47] L. Sciavicco, B. Siciliano, “A solution algorithm to the inverse kinematic problem for redundant manipulators,” IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 4, pp. 403–410, 1988.
[48] C. H. Yeung, Y. Altintas, K. Erkorkmaz, “Virtual CNC system. Part I. System architecture,” Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 46, pp. 1107-1123, 2006.
[49] I. Maher, M. E. H. Eltaib, A. A. D. Sarhan, R. M. El-Zahry, “Cutting force-based adaptive neuro-fuzzy approach for accurate surface roughness

prediction in end milling operation for intelligent machining," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 76, pp. 1459-1467, 2015.
[50] S. B. Raja, N. Baskar, "Particle swarm optimization technique for determining optimal machining parameters of different work piece materials in turning operation," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 54, pp. 445-463, 2011.
[51] M. C. Tsai, M. Y. Cheng, K. F. Lin, N. C. Tsai, "On acceleration/deceleration before interpolation for CNC motion control," in Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics, ICM, 2005, pp. 382-387.
[52] J. Dong, P. M. Ferreira, J. A. Stori, "Feed-rate optimization with jerk constraints for generating minimum-time trajectories," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, pp. 1941–1955, 2007.
[53] X. Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier, "Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 57, pp. 73–82, 2012.
[54] Y. Altintas, K. Erkorkmaz, "Feedrate optimization for spline interpolation in high speed machine tools," CIRP Annals, vol. 52, pp. 297–302, 2003.
[55] K. L. Li, Q. Hu, J. Li, "Path Planning of Mobile Robot Based on Improved Multiobjective Genetic Algorithm," Wirel. Commun. Mob. Comput., 2021.
[56] S. N. Karuppusamy, B. Y. Karuppusamy, "Minimizing airtime by optimizing tool path in computer numerical control machine tools with application of A* and genetic algorithms," Adv. Mech. Eng., 9(12), 2017.
[57] Z. Khodabakhshi, A. Hosseini, A. M. A. Ghandehariun, "Novel Method for Achieving Minimum Distance Collision-free Tool Path for Drilling," in Proceedings of the CSME Congress, Charlottetown, PE, Canada, 2020, pp. 21–24.
[58] Q. Tang, L. Ma, D. Zhao, Y. Sun, Q. Wang, "A Dual-Robot Cooperative Arc Welding Path Planning Algorithm based on Multi-Objective Optimization," IFAC-Pap., vol. 56, pp. 3048–3053, 2023.
[59] P. J. Fonseca, C. M. Fleming, "Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization," in Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms, Urbana-Champaign, IL, USA, July 1993, pp. 17–21.
[60] E. Zitzler, M. Laumanns, L. Lothar, "SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multi-objective optimization," Evol. Methods Des. Optim. Control Appl. Ind. Probl., vol. 103, pp. 95–100, 2001.
[61] Y. Koren, Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-Hill, NY. 1983.
[62] M. Mattson, CNC programming: principles and applications, Cengage Learning, 2009.
[63] L. N. Lopez De Lacalle, A. Lamikiz, J. A. Sanchez, and M. A. Salgado, "Toolpath selection based on the minimum deflection cutting forces in the programming of complex surfaces milling," Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 47, no. 2, pp. 388–400, 2007.
[64] H. Zhao, H. Zhang, S. Xin, Y. Deng, C. Tu, W. Wang, D. Cohen-Or, B. Chen, "DSCarver: Decompose-and-spiral-carve for subtractive manufacturing," ACM Transactions on Graphics, vol. 37, pp. 1-14, 2018.
[65] M. Gavas, CNC Tekniği ve Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, 2019.

[66] Fanuc Ltd., Oshino, Japan. *Fanuc Series O-MC Programing Guide Book*. (2004). Erişim tarihi: 8 Haziran, 2024. [Online]. Link: https://cncmanual.com/fanuc/fanuc-0i-mc/#google_vignette/

[67] Rapiddirect, "Difference Between Feed Rate and Cutting Speed in CNC Machining." rapiddirect.com. Erişim tarihi: 9 Haziran, 2024. [Online]. Link: https://www.rapiddirect.com/blog/difference-between-feed-rate-and-cutting-speed/

[68] H. T. Yau, J. B. Wang, "Fast Bezier interpolator with real-time lookahead function for high-accuracy machining," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, pp. 1518-1529, 2007.

[69] H. Ni, J. Yuan, S. Ji, C. Zhang, and T. Hu, "Feedrate scheduling of NURBS interpolation based on a novel jerk-continuous ACC/DEC algorithm," IEEE Access, vol. 6, pp. 66403-66417, 2018.

[70] K. Erwinski, M. Paprocki, and G. Karasek, "Comparison of NURBS trajectory interpolation algorithms for high-speed motion control systems," in Proc. IEEE 19th Int. Power Electron. Motion Control Conf., PEMC, Apr. 2021, pp. 527533.

[71] K. Erkorkmaz, Q.-G. Chen, M.-Y. Zhao, X. Beudaert, and X.-S. Gao, "Linear programming and windowing based feedrate optimization for spline toolpaths," CIRP Ann., vol. 66, no. 1, pp. 393396, 2017.

[72] S. Tulsyan, Y. Altintas, "Local toolpath smoothing for five-axis machine tools," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 96, pp. 15-26, 2015.

[73] W. Fan, C. H. Lee, J. H. Chen, "A realtime curvature-smooth interpolation scheme and motion planning for CNC machining of short line segments," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 96, pp. 27-46, 2015.

[74] X. Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier, "Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 57, pp. 73-82, 2012.

[75] B. Sencer, "Trajectory Generation for CNC Machine Tools," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 79, pp. 631-638, 2013.

[76] N. Alseedi, Y. Yusof, A. Kadir, M. Abedlhafd, "A Review of Tool Path Optimization in CNC Machines," Methods and Its Applications Based on Artificial Intelligence, vol. 29, pp. 3368-3380, 2020.

[77] H. El-Mounayri, H. Kishawy, V. Tandon, "Optimized CNC end-milling: A practical approach," Int. J. Comput. Integr. Manuf., vol. 15, no. 5, pp. 453–470, 2002.

[78] D.E. Goldberg, K. A Deb, "Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms," in Foundations of Genetic Algorithms; Rawlins, G., Ed.; Morgan, Kaufmann: San Mateo, CA, USA, 1991, pp. 69–93.

[79] F. T. S. Chan, T. C. Wong, L. Y. Chan, "A genetic algorithm-based approach to machine assignment problem," Int. J. Prod. Res., vol. 43, no. 12, pp. 2451–2472, 2005.

[80] G. Demir, R. A. Vural, "Speed Control Method Using Genetic Algorithm for Permanent Magnet Synchronous Motors," in 6th International Conference on Control Engineering and Information Technologies, CEIT, 2018, pp.1009-1014.

[81] F. Cus and J. Balic, “Optimization of cutting process by GA approach,” Robot. Comput. Integr. Manuf., vol. 19, no. 1–2, pp. 113–121, 2003.
[82] M. Dorigo, C. Blum, “Ant colony optimization theory: A survey,” Theor. Comput. Sci., vol. 344, no. 2–3, pp. 243–278, 2005.
[83] B. C. Mohan, R. Baskaran, “A survey: Ant Colony Optimization based recent research and implementation on several engineering domain,” Expert Syst. Appl., vol. 39, no. 4, pp. 4618–4627, 2012.
[84] J. Kennedy, R. Eberhart, “Particle swarm optimization (PSO),” in Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995, pp. 1942–1948.
[85] X. H. Shi, Y. C. Liang, H. P. Lee, C. Lu, Q. X. Wang, “Particle swarm optimization-based algorithms for TSP and generalized TSP,” Inf. Process. Lett., vol. 103, no. 5, pp. 169–176, 2007.
[86] E. Ülker, M. E. Turanalp, H. S. Halkaci, “An artificial immune system approach to CNC tool path generation,” J. Intell. Manuf., vol. 20, no. 1, pp. 67–77, 2009.
[87] P. Liang, N. K. Bose, Neural network fundamentals with graphs, algorithms and applications, Mac Graw-Hill, 1996.
[88] J. H. Holland, Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press, 1992.
[89] D. Karayel, “Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network,” J. Mater. Process. Technol., vol. 209, no. 7, pp. 3125–3137, 2009.
[90] K. C. Gupta, Solution Manual for Mechanics and Control of Robots: Springer, Mechanical Engineering Series, 1997.
[91] Z. Bingül, S. Küçük, Robot Kinematiği, 3. Baskı, Birsen Yayın evi, Ağustos 2019.
[92] J. Craig, Introduction to Robotics mechanics and Control, 3rd Edition, Pearson, 2004.
[93] J. Yang, R. Mayer, Y. Altintas, “A Position Independent Geometric Errors Identification and Correction Method for Five–Axis Serial Machines based on Screw Theory,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 95, pp. 52-66, 2015.
[94] M. T. Lin, M. S. Tsai, H. T. Yau, “Development of a dynamics-based NURBS interpolator with real-time look-ahead algorithm,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol 47/15, pp. 2246-2262, 2007.
[95] M. Y. Cheng, M. . Tsai, J. C. Kuo, “Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol 42/7, pp. 801-813, 2002.
[96] W. T. Lei, M. P. Sung, L. Y. Lin, J. J. Huang, “Fast real-time NURBS path interpolation for CNC machine tools,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol 47/10, pp. 2246- 2262, 2007.
[97] H. T. Yau, M. T. Lin, M. S. Tsai, “Real-time NURBS interpolation using FPGA for high speed motion control,” CAD Computer Aided Design, vol 38/10, pp. 1123-1133, 2006.
[98] C. De Boor, “On calculating with B-splines,” Journal of Aproximate Theory, vol 10, pp. 50-62, 1972.

[99] Codesys Ltd., Kempten, Germany. Codesys Online Help. (2024). Erişim tarihi: 8 Haziran, 2024. [Online]. Link: https://content.helpme-codesys.com/en/CODESYS%20SoftMotion/_sm_cnc_din66025_spline.html

[100] C. Oysu, Z. Bingül, "Application of heuristic and hybrid-GASA algorithms to tool-path optimization problem for minimizing airtime during machining," Engineering Applications of Artificial intelligence, vol. 22, pp. 389–396, 2009.

[101] Y. Xue, "Mobile Robot Path Planning with a Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm," Appl. Sci., vol. 8(11), 2253, 2018.

[102] C. Lucas, D. H. Sosa, R. M. A. Caldeira, "Multi-Objective Four-Dimensional Glider Path Planning using NSGA-II," in Proceedings of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop, AUV, Porto, Portugal, November 2018, pp. 6–9.

[103] G. Demir, R. A. Vural, "Heuristic Trajectory Planning of Robot Manipulator," in 2021 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology, JEEIT, Amman, Jordan, 2021, pp. 222-226.

[104] F. Ahmed, K. Deb, "Multi-objective Optimal Path Planning Using Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms," Soft Comput., vol. 17, pp. 1283–1299, 2013.

[105] Y. Huang, M. Fei, "Motion Planning of Robot Manipulator Based on Improved NSGA-II,". Int. J. Control Autom. Syst, vol. 16, pp. 1878–1886, 2018.

[106] K. Deb, S. Agrawal, A, Pratap, "Meyarivan, T. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective: NSGA-II," in Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference, 2000; pp. 846–858.

[107] K. T. Hung, J. S. Liu, Y. Z. Chang, "A comparative study of smooth path planning for a mobile robot by evolutionary multi-objective optimization," in Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Jacksonville, FL, USA, June 2007, pp. 20–23.

[108] O. Castillo, L. Trujillo, P. Melin, "Multiple objective genetic algorithms for path-planning optimization in autonomous mobile robots," Soft Comput., vol. 11, pp. 269–279, 2007.

[109] M. Davoodi, F. Panahi, A. Mohades, S. N. Hashemi, "Multi-objective path planning in discrete space," Appl. Soft Comput., vol. 13, pp. 709–720, 2013.

[110] G. Demir, R. A. Vural, "Non-Cutting Moving Toolpath Optimization with Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II," Applied Sciences, 14(11), 2024.

[111] X.S. Yang, "Chapter 14—Multi-Objective Optimization. In Nature-Inspired Optimization Algorithms," Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 197–211, 2014.

[112] Z. I. E. Cicek, Z. K. Ozturk, "A Comparative Study of Scalarization Techniques on the Multi-Objective Single Ma-chine-Scheduling Problem Under Sequence-Dependent Setup Time, Release Date and Due Date Constraints," Gazi Univ. J. Sci, vol. 33, pp. 429–444, 2020.

[113] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, T. Meyarivan, “A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II,” IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 6, pp. 182–197, 2002.
[114] G. Xu, J. Chen, H. Zhou, J. Yang, P. Hu, W. Dai, “Multi-objective feed rate optimization method of end milling using the internal data of the CNC system,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 101, pp. 715–731, 2019.
[115] S. Jia, S. Wang, N. Zhang, W. Cai, Y. Liu, J. Hao, Z. Zhang, Y. Yang, Y Sui, “Multi-objective parameter optimization of CNC plane milling for sustainable manufacturing,”. Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 1, pp. 1–22. 2022.
[116] R. Jiang, S. Ci, D. Liu, X. Cheng, Z. Pan, “A Hybrid Multi-Objective Optimization Method Based on NSGA-II Algorithm and Entropy Weighted TOPSIS for Lightweight Design of Dump Truck Carriage,” Machines, 9(8), 156, 2021.
[117] M. S. Halinga, E. W. Nshama, T. R. Schafle, N. Uchiyama, “Time and energy optimal trajectory generation for coverage motion in industrial machines,”. ISA Trans., vol. 138, pp. 735–745, 2023

A
G-KOD GENEL AÇIKLAMA LİSTESİ

;CNC Programlama G Kodları (Hazırlık Fonksiyonları)

G00: Kesici takımın talaş almaksızın boştaki hızlı hareketidir.

G01: Kesici takımın talaş kaldırarak yaptığı doğrusal interpolasyon hareketidir.

G02: Saat yönünde interpolasyon (CW)

G03: Saat yönünün tersinde interpolasyon (CCW)

G04: Geçici Bekleme (Dwell)

G17: X-Y çalışma düzlemi seçimi

G18: X-Z çalışma düzlemi seçimi

G19: Y-Z çalışma düzlemi seçimi

G20: inç birimi seçimi

G21: metrik birimi seçimi

G22: Serbest profil yan yüzeylerinin işlenmesi

G23: Serbest profil cep boşaltma

G24: Dikdörtgen cep boşaltma

G25: Dairesel cep boşaltma

G28: Referans noktasına gönderme

G34: Eşit aralıklarla çember delik delme

G35: Doğru boyunca delik delme

G36: Çember üzerine belirli açılarda delik delme

G40: Kesici takım yarı çap telafisi iptali

G41: Kesici takım yarı çap telafisi iptali, soldan

G42: Kesici takım yarı çap telafisi iptali, sağdan

G43: Kesici takım boyu telafisi, + yönde

G44: Kesici takım boyu telafisi, – yönde

G49: Kesici takım boyu telafisi iptali

G50: Ölçeklendirme, aynalama, döndürme iptali G51: Ölçeklendirme

G51.1: Aynalama

G52: Referans kaydırma ve iptali

G53: Tezgâh koordinat sistemi seçimi

G54 G59: İş parçası sıfır noktası

G68: Döndürme

G73: Derin delik delme

G74: Ters diş (sol kılavuz) çekme çevirimi

G76: İnce delik büyütme çevirim

G80: Delik delme çevirimi iptali

G81: Delik delme, puta açma, silindirik havşa çevrimi

G82: Delik sonunda beklemeli delik delme çevrimi

G83: Z ekseninde kademeli delik delme çevrimi

G84: Diş çekme (sağ kılavuz) çevrimi

G85: Yavaş delik büyütme çevrimi

G86: Hızlı delik büyütme çevrimi

G88: Delik büyütme çevrimi delik sonunda bekler, iş mili durur, takım elle çıkartılır.

G90: Mutlak programlama

G91: Eklemeli (arttırmalı) programlama

G91: İş parçası koordinat kaydırma

G94: İlerleme mm/dak

G95: İlerleme mm/dev

G96: Sabit kesme hız kontrolü

G97: Sabit kesme hız kontrolü iptali ve sabit devir sayısı

G98: Engeli delik çevrimlerinde bir önceki z noktasına gönder

G99: Delik çevrimlerinde R emniyet noktasına dönüş

B
DİKDÖTGEN PARÇA VE DELİK DELME ÖRNEK ÇALIŞMA G-KOD KOMUTLARI

CNC üzerinde işlenen bir dikdörtgen parça ve parçaya dört adet delik delmek için kullanılan G-kodu aşağıda sunulmuştur.

%

; CNC üzerinde işlenen örnek dikdörtgen parçanın G-kodunun versiyonu

O1000……..(CNC programlama dilinde program numarası)

T1 M06 (Alet değişimi, matkap ucu)

G90 G21 (Mutlak konumlandırma, milimetre cinsinden)

G17 (XY düzlem seçimi)

; Başlangıç pozisyonuna git

G00 Z5.000 (Güvenli yükseklik Z 5.000'e hızlı hareket)

G00 X0.000 Y0.000 (Başlangıç noktasına hızlı hareket)

; Dikdörtgen frezeleme

G01 Z-1.000 F100 (Doğrusal interpolasyon, 100 besleme hızında frezelemeye başla)

G01 X100.000 Y0.000 F200 (X 100.000'e 200 besleme hızında frezeleme)

G01 X100.000 Y50.000 (Y 50.000'e frezeleme)

G01 X0.000 Y50.000 (X 0.000'a geri frezeleme)

G01 X0.000 Y0.000 (Başlangıç noktasına geri frezeleme)

G00 Z5.000 (Güvenli yüksekliğe geri dön)

```
; "Rastgele" konumlarda delik delme ile karmaşık rota
; Delik 1
G00 X20 Y25          (Delik 1 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 1'i del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
; Delik 3'e Git
G00 X80 Y35          (Delik 3 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 3'ü del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
; Delik 2'ye Git
G00 X50 Y10          (Delik 2 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 2'yi del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
; Delik 4'e Git
G00 X40 Y40          (Delik 4 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 4'ü del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
; Delik 5'e Git
G00 X70 Y20          (Delik 5 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 5'ü del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
M30                  (Programın sonu)
```

%

Elitist-NSGA-II ile optimize edilen ve CNC üzerinde işlenen bir dikdörtgen parça ve parçaya dört adet delik delmek için kullanılan G-kodu aşağıda sunulmuştur.

%

;CNC üzerinde işlenen örnek dikdörtgen parçanın G-kodunun optimize edilmiş versiyonu

O1000

T1 M06 (Alet değişimi, matkap ucu)

G90 G21 (Mutlak konumlandırma, milimetre cinsinden)

G17 (XY düzlem seçimi)

; Başlangıç pozisyonuna git

G00 Z5.000 (Güvenli yükseklik Z 5.000'e hızlı hareket)

G00 X0.000 Y0.000 (Başlangıç noktasına hızlı hareket)

; Dikdörtgen frezeleme

G01 Z-1.000 F100 (Doğrusal interpolasyon, 100 besleme hızında frezelemeye başla)

G01 X100.000 Y0.000 F200 (X 100.000'e 200 besleme hızında frezeleme)

G01 X100.000 Y50.000 (Y 50.000'e frezeleme)

G01 X0.000 Y50.000 (X 0.000'a geri frezeleme)

G01 X0.000 Y0.000 (Başlangıç noktasına geri frezeleme)

G00 Z5.000 (Güvenli yüksekliğe geri dön)

; "Rastgele" konumlarda delik delme ile karmaşık rota

; Delik 1

```
G00 X20 Y25          (Delik 1 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 1'i del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
; Delik 4'e Git
G00 X40 Y40          (Delik 4 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 4'ü del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
; Delik 3'e Git
G00 X80 Y35          (Delik 3 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 3'ü del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
; Delik 5'e Git
G00 X70 Y20          (Delik 5 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 5'ü del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
; Delik 2'ye Git
G00 X50 Y10          (Delik 2 için pozisyona git)
G01 Z-5.000 F100     (Delik 2'yi del)
G00 Z5.000           (Güvenli yüksekliğe dön)
M05                  (Tüm hareketleri durdur)
M02                  (Programın sonu)
```

C
İLERİ KİNEMATİK D-H KONTROL MATRİSLERİ

```
% CNC Tezgâh sisteminde PPP (XYZ eksen) D-H Kontrol Matrisleri için Matlab Kodları

clear all ; clc;

syms d1 d2 d3

alfa = [0,90,-90,       0];   % 6 tane    alfa(0)...alfa(5),0   parametresi

a = [255,0,0,       0];      % 6 tane    a(0)...a(5),0      parametresi

d = [0      ,d1+102.5,d2+137.5,d3+431.5];      % 6 tane   0,d(1)...d(6)   parametresi

theta = [0     , 0,90,0];  % 6 tane   0,theta(1)...theta(6)    parametresi

% function Ti= T_matrix(i,alfa,a,d,theta)

T01 = T_matrix(1,alfa,a,d,theta);

T12 = T_matrix(2,alfa,a,d,theta);

T23 = T_matrix(3,alfa,a,d,theta);

% function T_trans = Transformasyon(k,l,T)

%T(:,:,1) = eye(4);

%T(:,:,2) = T01;

%T(:,:,3) = T12;

%T(:,:,4) = T23;

% İstenen tüm ilişkiler bulunabilir.

%T03 = Transformasyon(0, 3, T)

T03 = T01*T12*T23;

T_T0 = [0,0,-1,10;

          0,1,0,10;

          1,0,0,665;
```

```
          0,0,0,1];
T_T3 = T_T0*T03
syms r11 r12 r13
syms r21 r22 r23
syms r31 r32 r33
syms px py pz
T_T3_syms = [r11, r12,r13,px;
                    r21,r22,r23,py;
                    r31,r32,r33,pz;
                   0,0,0,1]
inv(T_T0)*T_T3_syms
T01*T12*T23
eqn = inv(T_T0)*T_T3_syms == T01*T12*T23
s_px = solve(eqn(3,4),px)
s_py = solve(eqn(2,4),py)
s_pz = solve(eqn(1,4),pz)
s_QB = solve(eqn(1,4),QB)
```

```
% CNC Tezgâh sisteminde Tabla (b eksen) D-H Kontrol Matrisleri için Matlab Kodları
clear all ; clc;
syms QB
alfa = [0,90,      0];   % 6 tane    alfa(0)...alfa(5),0   parametresi
a = [0,0,      0];      % 6 tane    a(0)...a(5),0      parametresi
d = [0      ,0,53];      % 6 tane   0,d(1)...d(6)   parametresi
theta = [0     , QB,0];  % 6 tane   0,theta(1)...theta(6)    parametresi
```

```
% function Ti= T_matrix(i,alfa,a,d,theta)
T01 = T_matrix(1,alfa,a,d,theta);
T12 = T_matrix(2,alfa,a,d,theta);
% function T_trans = Transformasyon(k,l,T)
%T(:,:,1) = eye(4);
%T(:,:,2) = T01;
%T(:,:,3) = T12;
% İstenen tüm ilişkiler bulunabilir.
%T02 = Transformasyon(0,2,T)
T02 = T01*T12
T_T0 = [0,0,1,-426.5;
        -1,0,0,-260;
        0,-1,0,123.45;
        0,0,0,1]
T_TW = T_T0*T02

syms r11 r12 r13
syms r21 r22 r23
syms r31 r32 r33
syms px py pz

T_TW_syms = [r11,r12,r13,px;
             r21,r22,r23,py;
             r31,r32,r33,pz;
             0,0,0,1]
inv(T_T0)*T_TW_syms
```

```
T01*T12

eqn = inv(T_T0)*T_TW_syms == T01*T12

s_px = solve(eqn(3,4),px)

s_py = solve(eqn(2,4),py)

s_pz = solve(eqn(1,4),pz)
```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. G. Demir, R. A. Vural, "Heuristic Trajectory Planning of Robot Manipulator," 2021 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology, JEEIT, Amman, Jordan, 2021, pp. 222-226.

Makaleler

1. G. Demir, R. A. Vural, "Non-Cutting Moving Toolpath Optimization with Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II," Applied Sciences, 14(11), 2024.