

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CNC KAM MİLİ TAŞLAMA İŞLEMİNDE TAŞ YÖRÜNGESİNİN
BELİRLENMESİ, KİNEMATİK DEĞERLERİN OPTİMİZASYONU
VE SİMÜLASYONU**

DOKTORA TEZİ

Cemil KÖZKURT

(2012FED012)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hacı Ali ERTAŞ

SİVAS

Kasım 2017

Cemil KÖZKURT'un hazırladığı ve “CNC kam mili taşlama işleminde taş yörüngesinin belirlenmesi, kinematik değerlerin optimizasyonu ve simülasyonu” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	Yrd. Doç. Dr. Hacı Ali ERTAŞ
	Cumhuriyet Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. İbrahim UZMAY
	Erciyes Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Şahin YILDIRIM
	Erciyes Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Baki KESKİN
	Cumhuriyet Üniversitesi
Jüri Üyesi	Yrd. Doç. Dr. Ahmet Gürkan YÜKSEK
	Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İdris ZORLUTUNA
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



*Bu tez, Bilim, Teknoloji ve Sanayi Bakanlığı tarafından **0402.STZ.2013-2** numaralı proje kapsamında ESTAŞ ve Cumhuriyet Üniversitesi ortaklığı altında desteklenmiştir.*



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Cemil KÖZKURT, 2017



15 Temmuz Şehitlerimize...

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

23 Kasım 2017

İmza

Cemil KÖZKURT

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Beni ve kainattaki tüm canlıları yoktan var eden ve bize nimetler veren Rahman, Rahim ve Latif olan Allah'a sonsuz şükür ve hamd ederim. O'nun kulu ve elçisi Hz. Muhammed'e salat ve selam ederim.

Bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Hacı Ali ERTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Tez süresince bana manevi desteklerini esirgemeyen hayat arkadaşım ve Cumhuriyet Üniversitesi İLİTAM öğrencisi olarak okul arkadaşım Tuba ile oğlum Berat Asaf'a ve tezin tıkanma noktasında dünyaya teşrifiyle umutlarımı coşturan ve çalışmalarımı bereketlendiren oğlum Fatih Emir'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren ve ESTAŞ imkanlarını tez çalışması için açan, veri kaynağı desteği sunan ve ürettiğim verilerin doğruluğunu sahada karşılaştırarak ilerlememde önemli katkıları olan ESTAŞ Üretim Müdürü Makine Mühendisi Seca YAZICILAR'a, bilgi ve deneyimlerini paylaşan, proje süresince bazı aşamalarda önemli çözüm yöntemleri öneren ilgili diğer tezin öğrencisi ve Sivas Orman Bölge Müdürlüğü Makine Mühendisi Serpil YÜCEL'e, Tez İzleme Komitesi üyeleri olan saygıdeğer hocalarım Doç.Dr. Baki KESKİN'e ve Yrd.Doç.Dr. Ahmet Gürkan YÜKSEK'e teşekkür ederim.

ÖZET

CNC KAM MİLİ TAŞLAMA İŞLEMİNDE TAŞ YÖRÜNGESİNİN BELİRLENMESİ, KİNEMATİK DEĞERLERİN OPTİMİZASYONU VE SİMÜLASYONU

Cemil KÖZKURT

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. H.Ali ERTAŞ

2017, 108 sayfa

Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda kullanılan yüksek hızlı düz ve yuvarlak sentrik izleyicili radyal kam millerinin Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (Computer Numeric Control - CNC) taşlama makinelerinde işlenebilmesi için işleme öncesinde gerekli olan matematiksel yöntemler ve sayısal işlemler ortaya koyulmuştur. İzleyici hareketinin ayrık verisinden kam profilinin elde edilmesi, profil koordinat verileri bilinen kamı işleyecek taşın yörünge verisinin elde edilmesi, bu verinin numerik kontrol (NC) eğri interpolasyon komutlarıyla ifade edilmesi konuları matematiksel detaylarıyla ele alınmış ve örnek MATLAB® uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Ele alınan konulardan elde edilen MATLAB® komutları kullanılarak operatör eğitimi için CNC taşlama makinesinin bir simülasyon yazılımı geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kam mili, CNC taşlama, kam profili, kübik spline

ABSTRACT

TRAJECTORY DETERMINATION, OPTIMIZATION OF KINEMATICS AND SIMULATION OF CUTTER, ON CNC CAMSHAFT GRINDING PROCESS

Cemil KÖZKURT

PhD Thesis

Department of Machine Engineering

Supervisor: Asst.Prof.Dr. H.Ali ERTAŞ

2017, 108 pages

In this work, mathematical approaches that required before cam grinding process which for Computer Numeric Control (CNC) processing of flat face and roller centric follower high speed disc cams used in internal combustion engines and numerical operations have been presented. Issues that obtaining cam profile from discrete data of follower motion, obtaining trajectory data of grinder which to process known cam profile coordinates, expression of the trajectory data with numerical control (NC) interpolation commands have been discussed with mathematical details and examples of MATLAB[®] applications have been realized. Using obtained MATLAB[®] codes, a simulation software of CNC grinding machine have been developed for operator training.

Key Words: Camshaft, CNC grinding, cam profile, cubic spline.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK	iv
KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER.....	x
ÇİZELGELER	xi
SİMGELER.....	xii
KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Kam Mekanizmaları ve Kam Milleri	1
1.2 Kam Millerinin Geçmişi.....	2
1.3 Çalışmanın Önemi ve Literatür İncelemesi.....	3
2. MATERYAL VE METOD	10
2.1 Kam Profilinin Tasarımı.....	10
2.1.1 Analitik yaklaşım	11
2.1.1.1 Yuvarlak izleyicili kam mekanizması için kam profili analitik hesabı.....	11
2.1.1.2 Düz izleyicili kam mekanizması için kam profili analitik hesabı	17
2.1.2 Grafik yaklaşım.....	20
2.1.2.1 Yuvarlak izleyicili kam mekanizması için grafik kam profili çizimi.....	21
2.1.2.2 Düz izleyicili kam mekanizması için grafik kam profili çizimi... ..	23
2.1.3 Kam profili tasarımında eğri uydurma ve interpolasyon	26
2.2 Kam Profilinden Hareket Eğrisine Ulaşmak: Ters Dönüşüm	31
2.3 Kam Mekanizmasında Kinematik Analiz ve Optimizasyon	31
2.3.1 Analitik yaklaşım	32
2.3.2 Sayısal yaklaşım.....	34
2.4 CNC Taşlama ile Kam Mili Üretimi	35
2.4.1 Eksene eğri atama	36
2.4.2 İçbükey kamlarda maksimum taş çapı ve hesabı	40
2.5 Üretimde Simülasyon Kavramı	40
3. BULGULAR.....	42
3.1 Profil Hesabında Grafik Yaklaşımın Analizi ve Uygulaması	42
3.1.1 Düz izleyicili kam profili için grafik yaklaşımın analizi	43
3.1.2 Yuvarlak izleyicili kam profili için grafik yaklaşımın analizi	45
3.1.3. Grafik yaklaşım analizinin algoritmaları	47
3.1.4. Doğrulama ve sonuçların karşılaştırılması.....	51
3.1.5 Düz izleyicili kam profili sonuçları.....	52
3.1.7 Yuvarlak izleyicili kam profili sonuçları	55
3.2 Ters dönüşüm Yaklaşımının Geliştirilmesi ve Uygulaması	57
3.2.1 Düz izleyicili mekanizmada ters dönüşüm	58
3.2.2 Yuvarlak izleyicili mekanizmada ters dönüşüm	60
3.3 Taş yörüngesine ait eğrinin NC komutları ile ifadesi.....	65
3.4 Simülasyon Yazılımı ve Çıktıları	70

4. TARTIŞMA VE SONUÇ 72

KAYNAKLAR 74

EKLER 78

Ek-1 Kam profilinde hızın geometrik bir uzunluğa eşit olmasının ispatı	78
Ek-2 Örneklerde kullanılan <i>S</i> fonksiyonu verisi	80
Ek-3 Şekil 2.11'in (C-spline, alt polinomlar ve polinomların sürekli olduğu uç noktalar) oluşturulmasında kullanılan MATLAB® komutları	82
Ek-4 Kam profiline parametrik eğri uydurmak için kullanılan örnek MATLAB® komutları	84
Ek-5 Kinematik analizde analitik yaklaşım yoluyla elde edilen eğrilerin MATLAB® komutları	85
Ek-6 Polinom taşıma fonksiyonu ve örnek uygulama için MATLAB® komutları	87
Ek-7 Şekil 2.17'nin (C-spline eğrisine ait alt polinomların PL ekseninde görünümü) oluşturulmasında kullanılan komutlar	89
Ek-8 Düz izleyicili mekanizmada ters dönüşüm için komut bütünü	90
Ek-9 Yuvarlak izleyicili mekanizmada ters dönüşüm için komut bütünü	91
Ek-10 NC komutlarında kullanılan c-spline polinomlarının karşılaştırma amacıyla çizdirilmesinde kullanılan MATLAB® komut bütünü	92

ŞEKİLLER

Şekil 2.1 Yuvarlak santrik izleyicili kam mekanizması analitik yaklaşım gösterimi	13
Şekil 2.2 Kam profilinde basınç noktasının hesaplanması için çizim	16
Şekil 2.3 Yuvarlak izleyicili kam zarfları a)60° b)30° c)10° d)5° e)1°	17
Şekil 2.4 Düz santrik izleyicili kam mekanizması analitik yaklaşım gösterimi	19
Şekil 2.5 Yuvarlak izleyicili kam zarfları a)60° b)30° c)10° d)5° e)1°	20
Şekil 2.6 Yuvarlak santrik izleyicili kam mekanizması grafik yaklaşım çizimi	22
Şekil 2.7 Yuvarlak izleyicili 1° örnekleme açılı kam mekanizmasının grafik yaklaşım çizimi.....	23
Şekil 2.8 Düz santrik izleyicili kam mekanizması grafik yaklaşım çizimi.....	25
Şekil 2.9 Düz izleyicili 1° örnekleme açılı kam mekanizmasının grafik yaklaşım çizimi	25
Şekil 2.10 Trapez konum ve kinematiklerinin grafiklerinde sonsuz değerlerin oluşumu	27
Şekil 2.11 C-spline, alt polinomlar ve polinomların sürekli olduğu uç noktalar.....	27
Şekil 2.12 S verisine uydurulmuş c-spline ve kinematik grafikleri.....	28
Şekil 2.13 Uydurulmuş profil eğrisi	30
Şekil 2.15 PL ekseninde kübik bir polinom	37
Şekil 2.16 Kübik polinom taşıma	39
Şekil 2.17 C-spline eğrisine ait alt polinomların PL ekseninde görünümü	40
Şekil 3.1 Düz izleyicili kam mekaizması için grafik yaklaşım algoritması	49
Şekil 3.2 Yuvarlak izleyicili kam mekaizması için grafik yaklaşım algoritması	50
Şekil 3.3 Kullanılan hareket verisinin kinematik grafiği.....	52
Şekil 3.4 Analitik ve grafik yaklaşımın örtüşmesi (Düz izleyicili kam profili)	53
Şekil 3.5 Örtüşmenin sol üst bölgesinin yakın görünümü (Düz izleyicili kam profili)..	53
Şekil 3.6 Örtüşmenin sol orta bölgesinin yakın görünümü (Düz izleyicili kam profili)	54
Şekil 3.7 Analitik ve grafik yaklaşımda veri noktaları farkının karşılatırılması (Düz izleyicili kam profili)	54
Şekil 3.8 Analitik ve grafik yaklaşımın örtüşmesi (Yuvarlak izleyicili kam profili)	55
Şekil 3.9 Örtüşmenin sol üst bölgesinin yakın görünümü (Yuvarlak izleyicili kam profili)	56
Şekil 3.10 Örtüşmenin sol orta bölgesinin yakın görünümü (Yuvarlak izleyicili kam profili)	56
Şekil 3.11 Analitik ve grafik yaklaşımda veri noktaları farkının karşılatırılması (Yuvarlak izleyicili kam profili)	57
Şekil 3.12 Ters dönüşüm ile elde edilen S verisi ile referans S verisi çizimi	59
Şekil 3.13 Ters dönüşüm ile elde edilen S verisi ile referans S verisi mutlak hataları...	60
Şekil 3.14 Taşın profile teması	62
Şekil 3.15 İzleyiciye ait S eğrisi ile elde edilen taş yörüngesinin karşılatırılması	64
Şekil 3.16 Ters dönüşümde oluşan mutlak hatalar	65
Şekil 3.17 Taş yörüngesinde ayırık veri ile 5° c-spline verisinin karşılatırılması	69
Şekil 3.18 5° çözünürlükle uydurulmuş c-spline taş yörünge verisinin ayırık veriye göre mutlak hataları	69
Şekil 3.17 Simülasyon yazılımının arayüzüne ait ekran görüntüsü.....	71
Şekil Ek-1 a) Kam mekanizması - dört kol mekanizması eşdeğerliği (Norton, 2002)	
b) İzleyici öteleme hareketinin taşınması.....	78

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1 Sikloid, harmonik ve çift harmonik fonksiyonlarının kinematik analizi.....	33
Çizelge 2.2 Sikloid, harmonik ve çift harmonik fonksiyonlarının kinematik analiz grafikleri	33
Çizelge 2.3 SINUMERİK Spline fonksiyonları	36
Çizelge 3.1 Hareket (S) senaryosu bilgileri.....	51
Çizelge Ek-2 Hareket fonksiyonu verileri.....	80



SİMGELER

S	Konum
v	Çizgisel hız (Açıya göre)
a	İvme
j	Sıçrama
R	Yarıçap
R_c	Kam profiline ait temel dairesi yarıçapı
R_p	İzleyici merkez yörüngesine ait temel dairesi yarıçapı
R_f	İzleyici yarıçapı
R_g	Taş yarıçapı
L	Doğru parçası
x	Apsis
y	Ordinat
θ	Kam dönme açısı
ϕ	Basma açısı
λ	Basma ve dönme açıları tümleyeni
κ	Eğrilik
ρ	Eğrilik yarıçapı
C	Kam profili Kartezyen koordinatları veri seti
m,n	İndis sembolleri
β	Döndürülmüş koordinatlı profilde dönme açısı
$\mathbf{x}_e$	Bir önceki satırda tanımlanan polinomun son değeri
a_n	Poinomun n. Katsayısı
V_f	Çizgisel hız (Zamana göre)
w	Açısal hız

KISALTMALAR

CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol – Computer Numeric Control
NC	Sayısal Kontrol – Numeric Control
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım – Computer Aided Design
POLY	NC polinom tanımlama komutu
PO	NC polinom katsayısı giriş komutu
ASPLINE	NC Akima spline komutu
BSPLINE	NC NURBS eğrisi komutu
CSPLINE	NC kübik spline komutu



1. GİRİŞ

1.1 Kam Mekanizmaları ve Kam Milleri

Kam mekanizması dairesel harekete sahip mile bağlı eksenden kaçık bir kam ile bu kamın profil yüzeyini takip eden fasılalı doğrusal bir harekete ya da sınırlı bir açısal harekete sahip takipçiden oluşan bir mekanik çift çeşididir. Kam milleri ise bir ya da birçok kamın aynı ekseninde dönmesini sağlayan ve krank milinin tersine, ana tahriki mekanik çiftten almayan, milin dönme merkezinden harici tahrik alan makine elemanlarıdır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan kam milleri, motorun ana mili olan krank milinden aldıkları dairesel hareketi, izleyici mekanizmasıyla doğrusal harekete çevirerek silindir kafalarında bulunan emme ve egzoz supaplarının açılıp kapanmasını yani motor çevrimindeki gaz değişimini sağlarlar (Bağırov & Ertaş, 2009). Ayrıca içten yanmalı motorların yakıt pompalarında da kullanılmaktadırlar. Supapların açılma ve kapanma süresince, değişen konum (S), hız (v), ivme (a) ve sıçrama (j) kinematik değerleri motorun performansını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Motordaki adyabatik olayların gerçekleşmesi için silindir hacimlerine uygun hava gaz karışımının silindire alınması şeklindeki emme ve yanma/patlama sonrası atık gazların silindirden uzaklaştırılması şeklindeki egzoz işleminin zamanlama kontrolü kam milleri tarafından gerçekleştirilir. Bu yüzden izleyicilerin kinematik değerleri hassas bir yapıya sahip kam profili ile tayin edilerek silindirdeki emme ve egzoz zamanlama fonksiyonunun motor zamanlarına uygun olarak gerçekleşmesi sağlanır. Kamlar bir turda istenilen geometrik değerleri elde etmek için temel daire ekseninden eksantrik olarak tasarlanır. Motor kam milleri ise silindir sayısı ile orantılı supapların tamamını tek mil veya eş çalışan iki mil üzerine yerleştirilen kamlarla kontrol etmek için mil ya da miller üzerinde kamların farklı açılarda konumlandırılmasıyla oluşturulur. Böylelikle kam milleri her bir silindire farklı zamanlarda hava-yakıt karışımı göndererek ve yanma/patlama sonrasındaki atık gazları silindirden uzaklaştırarak motor çevriminin sürekliliğine destek verirler. Kam profili; mekanizma tekniği, makina dinamiği, içten yanmalı motorlar teorisi, termodinamik, mekanik titreşimler ve tasarı geometri gibi yaklaşımlardan faydalanılarak tasarlanır. Silindir çeliğin ya da kaba mil şekline sahip dövme çeliğin

veya döküm çeliğin talaşlı imalat ile hassas profile indirgenmesi şeklinde veya her kamın ayrı işlenerek geçmeli olarak bir milde toplanması şeklinde üretim yöntemleri bulunmaktadır. Talaşlı imalat sonrası sementasyon yapılarak oksidasyona karşı koruma ve yüzeyde mukavemet artışı da sağlanmaktadır. Ülkemizde kam mili üretimi az sayıdaki kurumsal firmalarla yapılmaktadır (Ertaş, 2016).

1.2 Kam Millerinin Geçmişi

Kamların tarihte ilk defa MÖ 300 civarında su ve hayvan tahrikli tahıl öğütme ve demir dövme amaçlı bir milde çıkıntı olarak kullanıldığı kabul edilmektedir (Wilson, 2002). Kamların ilk defa mühendislik projesi kabul edilebilecek teknik detaya sahip bir sistem olarak ise el-Cezeri'nin el-Câmi beyn el-İlm ve'l-Amel isimli eserinde Filli Saat'te ve diğer uygulamalarında su seviye kontrolü ve mekanik hareketlerin tesisi için kullanıldığı görülmektedir (Sezgin, 2008; Meneghetti & Maggiore, 2011). Günümüzde kam millerinin saatlerden kapı kilitlerine, çamaşır makinelerinden müzik kutularına, pilli ya da kurmalı oyuncaklardan dikiş makinelerine kadar küçük mekanik otomatlarda kullanımının yaygınlaşmasının temelleri Ortaçağ Avrupası'nda atılmıştır (Yücel, 2015). Günümüz teknolojisinde kullanılan izleyici yükselme değerlerinin matematiksel bir eğri ile tayin edildiği kam millerinin ilk uygulamaları 19. yüzyılda içten yanmalı motorların icadına denk geldiği görülmektedir. 19. ve 20. yüzyılda dünyada endüstrilerin hızla gelişmesi elektrik ve içten yanmalı motorlara bağlı gerçekleşmiştir. Bu hızlı gelişimde enerji, ulaşım, tarım, üretim gibi temel sektörlerde içten yanmalı motorların ve dolayısıyla kam millerinin ihtiyacı da artmıştır. Verimliliğin önem arz ettiği gelişmiş endüstrilerde daha hassas ve daha hızlı üretimlerin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Makine endüstrisinde üretim teknolojilerinin gelişmesi kam millerinin çok daha hassas ve hızlı üretimine imkan tanımıştır. Eskiden kam milleri frezelerle üretilirken şimdi daha çok silindirik taşlama ile üretilmektedir. Silindirik taşlamadaki yüksek devir ve silindir taşın büyük çapında elde edilen yüksek çevresel hız avantajları üretimde düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmesini sağlamaktadır. Kam profilinin üretim tezgahında oluşturulması önceleri kopyalama yoluyla, sonraları Sayısal Kontrollü (NC - Numeric Control) tezgahlarla ve nihayetinde Bilgisayar Destekli NC (CNC - Computer Numeric Control) tezgahlarla gerçekleştirildiği bilinmektedir.

1.3 Çalışmanın Önemi ve Literatür İncelemesi

Kam millerinin hassas, seri ve doğru üretimi, sanayilerin ayakta kalması için bir enerji bileşeni olarak vazgeçilmez gereksinimlerden biridir. Kam milleri otomobiller, jeneratörler, gemiler, trenler, tarım makineleri, iş makineleri ve sulama sistemleri gibi lojistik, enerji, inşaat ve tarım olmak üzere en temel endüstrilerde kullanılan taşıt ve makinelerin verim, güç ve hızlarını sağlayan içten yanmalı motorların kalbi niteliğindeki bileşenleridir. Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda kullanılan yüksek hızlı kam millerinin izleyicilerine ait hız, ivme ve sıçrama gibi kinematik değerlerinin analizi, kam millerinin hassas, doğru ve seri talaşlı üretimi için gerekli olan kesici silindirik taşın izlemesi gereken yörünge hesaplarının yapılması amaçlanmıştır. Bu hesaplardan yola çıkarak üretimde operatör kaynaklı hataların engellenmesi ve operatörleri eğitmek amacıyla bir simülasyon programının geliştirilmesi de amaçlanmıştır. Kam milleri makine sanayisinde makinelerin otomasyonu için de kullanılmakta olup bu kam milleri içten yanmalı kam millerine göre çok daha yavaş hızlarda çalıştığından a ve j parametreleri tasarımıda yüksek önem taşımaz. Ayrıca içten yanmalı motorlarda kullanılan ve kaymalı mil olarak bilinen iki farklı profile sahip, bu iki farklı profille motorda farklı güç performanslarının üretilmesini sağlayan, literatürdeki değişken valf zamanlama (Hong, Parvate-Patil, & Gordon, 2004) için kullanılan multi fonksiyonlu kamlar da son yılların çalışmalarıdır (Lancefield, 2002). Tez çalışması düşük hızlı makine otomasyon kam millerini ve kaymalı kam millerini dışarıda tutmak kaydıyla içten yanmalı motorlarda kullanılan yüksek hızlı radyal kam millerini kapsamaktadır.

Kam profilinin tasarımı izleyicide elde edilen s , v , a ve j değerlerine göre ele alınmaktadır (Söylemez, 2008). Bu değerlerden v , a ve j 'nin kinematik parametreler olarak adlandırıldığı görülmektedir. Kinematik parametrelerin analizi matematiksel olarak ifade edilebilen sürekli eğrilerin kullanımıyla gerçekleştirildiği görülmektedir (Chen F. Y., 1982; Norton, 2002; Rothbart, 2004; Söylemez, 2008). Yüksek hızlı kamların tasarımıda kullanılan s eğrilerinin kinematik analizinde sırasıyla s 'nin katlı türevleri olan v 'nin, a 'nın ve j 'nin sonsuza ya da yüksek değerlere ulaşmasının önüne geçilmeye, sürekliliğinin sağlanmaya çalışıldığı görülmektedir (Norton, 2002; Chen F. Y., 1982; Rothbart, 2004; Söylemez, 2008). Kam mekanizması eşdeğer olarak bir dört kol mekanizması şeklinde ele alınmaktadır (Wu, Wu, & Yan, 1999). Kam mekanizmalarında izleyicide kullanılan yay baskısı mekanizmada oluşan kinematik çiftin kuvvet kapalı olduğunu göstermesine rağmen dört kol mekanizmasındaki

kinematik çiftler şekil kapalı olmaktadır. CNC kam taşlama mekanizmasına ilk bakışta kam mekanizmasından tek farkının taş çapının büyük olduğu düşünülmektedir. Ancak temel ve önemli olan fark kam taşlama mekanizmasında kaldırılan talaştan dolayı uzuv boyu sürekli değişmesi dolayısıyla bir dört kol mekanizması eşdeğerliği var sayılamamasıdır. Yani CNC kam taşlama mekanizmasında kinematik çiftler şekil kapalı değil kuvvet kapalıdır. Ayrıca, kam mekanizmasında kamın dönme hareketinden izleyicinin öteleme hareketi elde ediliyorken taşlama mekanizmasında kamın dönme tahriki ve taşın öteleme tahriki birbirinden ayrı verilmektedir. İki ayrı tahrikin uyumunun sağlanması CNC kam taşlamadaki kontrol problemini zorlaştırmaktadır. Bunun yanında taşlama mekanizmasının çalışma hızı da kam mekanizmasına göre oldukça düşüktür. Dört zamanlı bir içten yanmalı motor 5000 dev/dk hızla dönüyorken bu motorun emme ya da egzoz süpaplarını kontrol eden bir kam mili, krank milinin iki turunda bir emme zamanı ya da bir egzoz zamanı bulunduğu için motor devrinin yarısında yani 2500 dev/dk hızla dönmektedir (Yardım, 2015). Oysa ki kam milinin üretiminde, CNC’de mil eksenini olan C ekseninin hızları pasoya göre 5 ila 50 dev/dk arasında değişmektedir. Bunca farklılıklara rağmen üretilen kam mili izleyici ile çalışacağından, izleyiciye uygun kinematik parametreler göz önünde bulundurularak üretim gerçekleştirilmelidir. Örneğin içbükey kamlarda minimum eğrilik yarıçapına sahip noktalarda düzeltmeler gerekebilir. Bu düzeltmeler yapılırken kinematik toleranslara da dikkat edilmelidir. CNC’deki ve izleyicideki s eğrilerinin eşit olmayışı kam mili tasarımı ile kam mili üretimini birbirinden ayıran başka bir sebeptir. Bu eşitsizlik kesicinin temas noktalarının izleyicinininkilere eşit olmayışı, içbükey kamlarda azami kesici çapı hesabı gibi kam mili tasarımından farklı konular da doğurmaktadır.

CNC Kam Mili Taşlama İşleminde Taş Yörüngesinin Belirlenmesi, Kinematik Değerlerin Optimizasyonu ve Simülasyonu isimli bu doktora tez çalışmasının amacı, kam izleyicisinin kamın temel dairesine göre yükselme değerlerinden, gerekli kinematik hesaplarla, üretimde kullanılmak üzere en uygun kam profili koordinat değerlerinin elde edilebildiği ve yine gerekli kinematik hesaplarla üretim tezgahındaki taşın hareket yörüngesinin ve hızının analiz edilebildiği bir yöntem ortaya koymak ve bu yöntemi gerçekleştirebilmek için bir yazılım geliştirmektir. Ayrıca bu yazılımdan elde edilen bilgilerle CNC kam taşlama operatörlerinin eğitilmesine yönelik görsel bir simülasyon yazılımının gerçekleştirilmesi de amaçlanmaktadır. Bu bağlamda tez konusu başlığı ile doğrudan ilgili literatür çalışmasının da oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Tez

konusuyla dolaylı olarak ilgili olan kam profili tasarımı, CNC taşlama, eğri uydurma gibi konularda yapılan literatürdeki çalışmaların proje ile ilintili özetleri bu bölümde paylaşılmaktadır.

Chen'in (1973) çalışmasında izleyiciye ait ön tanımlı ivme verisi numerik formda verildiğinde kam profilinin sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilmesi ele alınmıştır. Bu yöntemde öncelikle ivmeden hareket verisine oradan da profile ulaşıldığı görülmektedir. İvme ve hareket arasındaki yüksek seviyeli numerik türev işleminin daha hassas olması için Stirling veya Gregory-Newton interpolasyon formülleri kullanılarak bir örnek ile sunulduğu görülmektedir (Chen F. , 1973). Chen'in çalışması tezde numerik verilerin kullanılması açısından önemlidir.

Biswas ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada bir ortalama teğet yaklaşımı geliştirerek bu yaklaşımı ve eğrilik merkezi yaklaşımını analitik yaklaşımla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucu elde edilen değerler mutlak hata farkları olarak görselleştirilmektedir. Oluşan farklar max. % 0,4 civarında olup eğrilik merkezi ve ortalama teğet yaklaşımı sonuçları örtüşmektedir. (Biswas, Stevens, & Kinzel, 2004)

Liang ve Quinn (1991) yaptıkları çalışmada önerdikleri bir grafik yaklaşımın CAD sistem üzerindeki uygulamasının sonuçlarını analitik yaklaşımla karşılaştırmaktadırlar. Yapılan karşılaştırmada oluşan farkların max. % 0,4 olarak paylaşıldığı görülmektedir. Ayrıca analitik yaklaşımda tespit ettikleri bazı problemlere de çözüm yolu olarak geliştirdikleri grafik yaklaşımı önerdikleri görülmektedir. (Liang & Quinn, 1991)

Tutak ve Söylemez (1986) yaptıkları çalışmada profil koordinatları bilinen bir kamın uydu (izleyici) hareketini elde etmek amacıyla tersine bir dönüşüm yaklaşımı önermektedirler. Önerdikleri dönüşümün sikloid eğriye sahip bir kamın profilinde uygulanmasını açıklamaktadırlar. Elde ettikleri sonuçlar ile referans veriyi karşılaştırarak aralarındaki % hata değerlerini max. 0.28 olarak 5° çözünürlükte, min. ise 0.02 olarak 1° çözünürlükte tespit ettikleri görülmektedir (Tutak & Söylemez, 1986). Ayrıca Kiper, Huang ve Söylemez yapılan bu çalışma üzerine Excel kullanarak uyguladıkları numerik yaklaşım ile izleyicinin profile temas noktalarını hesaplamaktadırlar. Çeşitli mekanizma tiplerini ele alırken kinematik analizde s , v , a analizi yaptıkları görülmektedir (Kiper, Huang, & Söylemez, 2012). Oysa ki j analizinin yüksek devirli kamlar için kaçınılmaz olduğu bilinmektedir.

Hong-Sen ve Wen-Teng (1999) yaptıkları çalışmada yuvarlak izleyicili disk kam mekanizmalarında eğrilik analizini ele almaktadırlar. Eğrilik analizi için gerekli dönüşüm matrislerinin, cebir denklemlerinin elde edildiği ve bunlar üzerinden üç adet örnek ile çalışmanın tamamlandığı görülmektedir (Hong-Sen & Wen-Teng, Curvature Analysis of Roller-Follower Cam Mechanism, 1999).

Hong-Sen ve Wen-Teng (1999) yaptıkları diğer bir çalışmada dönel yüzeyli, hiperboloid yüzeyli ve globoid yüzeyli yuvarlak izleyicili uzaysal kamlarda eğrilik analizini ele almaktadırlar. Sunulan denklemlerde limit fonksiyonunu ele alarak üç boyutlu ve iki boyutlu kamların numerik uygulamalarını karşılaştırmaktadırlar (Hong-Sen & Wen-Teng, Curvature analysis of spatial cam-follower mechanisms, 1999).

Klasik CNC tezgahlarında lineer ve dairesel interpolasyon kullanılırken kam profillerinin elde edilebileceği veya izleyici konum ceğrisine yaklaşılabilecek eğri uydurma ve interpolasyon yöntemleri üst düzey CNC tezgahları tarafından desteklenmektedir. Vavruška (2012) yaptığı çalışmada bu eğri uydurma ve interpolasyon yöntemlerinin farklı CNC kontrolör markalarındaki fonksiyonlarını ve bu fonksiyonların kullanımını ele almaktadır. Çalışmada B-Spline, Akima Spline, Cubic Spline ve NURBS gibi Spline türlerinin Mazak, Heidenhein ve Siemens gibi piyasanın bilinen en güçlü CNC kontrolör markalarında kullanımlarına değinilmekte ve bir kısmı için örnekler verilmektedir (Vavruška, 2012).

Wang ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada CNC taşlamada kontür hatasını azaltmak için eksen hızlarının kontrolünü senkronize ederek bağımsız açılal hız yöntemine göre daha başarılı sonuçlar elde ettiklerini iki örnek üzerinden öne sürmüşlerdir. Uyguladıkları örneklerden elde ettikleri sonuçlarda max. 0.01 mm hata sonuçlarının klasik yönteme göre daha başarılı olduğu görülmektedir. (Wang, Sui, Tian, Wang, & Fang, 2015)

Wu ve ark. (1999) analitik yaklaşımda önemli bir yer tutan eğrilik yarıçapı değerinin hesaplanması için kam mekanizmasını dört kol mekanizması şeklinde tanımlayarak bir grafik yaklaşım önermektedir. Önerdikleri yaklaşımla eğrilik yarıçapının eşdeğer mekanizmada basit bir şekilde belirtilen uzunluğa eşit olduğunu iki örnek üzerinden hesapladıkları görülmektedir (Wu, Wu, & Yan, 1999).

Ting ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada kam mili taşlama makinelerinin arızalarını radyal taban fonksiyonu yapay sinir ağı (RBFNN) kullanarak tahmin etmişlerdir.

Arızalar arası zaman parametresi verileri ile kestirimci yaklaşım yöntemi önerilerek arıza olmadan önce bakım yapmak hedeflenmektedir. Endüstriyel bir örnek ile de gerçek veriye göre hata aralığının düşük olduğu bir arıza kestirim grafiği elde edildiği görülmektedir (Ting, Hongjun, & Lei, 2012).

Karabulut ve Sarıdemir (2009) yaptıkları çalışmada kam profili tasarımı pistonlardaki volumetrik verim çerçevesinde değerlendirerek Spline yöntemi ile gerçekleştirdikleri görülmektedir. Üç farklı açık kalma süresi ve üç farklı kurs boyu ile toplam dokuz farklı kamın tasarımı ve analizi yapılarak volumetrik verim açısından, mantar tipli izleyicinin kam yüzeyine temas miktarı açısından ve izleyici yayının mekanik etkileri açısından değerlendirilerek en uygun kamın seçiminin yapıldığı görülmektedir (Karabulut & Sarıdemir, 2009).

Ottaviano ve ark. (2008) ön tanımlı harekete göre tasarlanmış dairesel olmayan dişli mekanizmasını ve kam mekanizmasını cerrahi harici dahili kan pompalama cihazında kullanabilmek üzere numerik ve deneysel olarak karşılaştırdıkları görülmektedir. Tasarımların ikisinin de kullanılabilir ancak kam mekanizmasının sistem basitliği, tork stabilitesi gibi yönlerden avantajlı olduğunu buldukları görülmektedir (Ottaviano, Mundo, Danieli, & Ceccarelli, 2008).

Farouki ve Manjunathaiah (1998) yaptıkları çalışmada Pythagorean-Hodograph (PH) eğrileri kullanarak kam profili tasarımı göstermektedirler. Elde ettikleri sonuçlar ışığında bu eğrilerin kam profili tasarımında kullanılabileceği ancak ele alınmayan diğer kam mekanizması türlerinde de ele alınması gerektiği ve hız ile ivme eğrilerinin sürekliliğinin yanında sıçrama sürekliliğinin de analiz edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. (Farouki, Manjunathaiah, & Jee, 1998)

Farouki ve ark. (1999) PH eğrileri için gerçek zamanlı CNC ara değer hesaplayıcılarını serbest yüzeyli kontür işlemede iki farklı strateji ile ele almaktadırlar. İlk strateji düz uçlu kesici kullanarak dışbükey yüzeylere 5. derece yüzeysel PH eğrileri ile yaklaşmayı içerirken, ikinci strateji bu yaklaşımı küre uçlu kesici ile açıklamaktadır. Her iki plan da doğrusal ya da dairesel çok satırlı G kodları yerine yüzeylerin açık form kesici takım ofsetlerine gerek kalmadan az satırda yazılan analitik yörünge segmentleri ortaya koyulmaktadır. Yazılan G kodları açık mimari bir CNC frezede uygulanarak teorik plan doğrulanmaktadır. (Farouki, Tsai, & Yuan, 1999)

Takazakura ve ark. (2016) önerdikleri yeni bir manyetik kam mekanizması sisteminde kinematik çiftteki mekanik teması manyetik elemanlar kullanarak ortadan kaldırmaktadırlar. Çalışmada izleyici hareketi için hazırlanan analitik modelin numerik verisi üzerinden bir uygulama yapıp, sonuçlar analiz edilerek manyetik kam mekanizmasının uygulanabilirliği ortaya konulmaktadır. (Takazakura, Morita, & Sugiura, 2016)

Zhou ve ark. (2012) yaptığı çalışmada üniform olmayan kalıp işlemede yüksek hızlı kontrol için Bezier Spline (NURBS) eğrilerinin doğru ve yay parçalarının uygulanmasından daha kolay olduğunu göstermektedirler. Çalışmada kesici konumların ayırık verisinin CAD modelden NURBS eğrisine dönüştürülmesi ve kısa bir hesap zamanı içinde hız dalgalanmasının NURBS enterpolasyonu ile engellenmesi olmak üzere iki sorun üzerinde durulmaktadır. Nihai olarak CNC takım yolu için önerilen NURBS enterpolasyon yaklaşımının NC kodlarını istenen sapma aralığında %6 azalttığı gösterilmektedir. (Zhou, Wu, Tang, & Chen, 2012)

Krajnik ve ark. (2014) verimlilik artışı için kam çıkıntısı taşlamada çevrim optimizasyonu çalışmasını sunmaktadırlar. Çalışmada anlık geometri, kinematik ve sıcaklık model parametreleri altında sabit talaş kaldırma hızı, sabit güç ve sabit sıcaklık süreç kontrol stratejileri uygulanmaktadır. Önerilen yöntem maksimum hız, ivme ve sıçrama gibi kinematik makine kısıtları altında aktif bir üretim hattında taşlama testleriyle doğrulanmaktadır. (Krajnik, Drazumeric, Badger, & Hashimoto , 2014)

Su-zhen ve Yu-xi yaptıkları çalışmada taşlama eğrisindeki matematiksel modeli ve NC program yöntemleri ile uygulama yapısını ele almaktadırlar. Siemens 840D CNC için ele alınan yöntemde iyi bir uygulama yöntemi ortaya koyulduğu belirtilmektedir. (Su-zhen & Yu-xi, 2011)

Sui ve ark. (2011) Siemens 840D tabanlı bir NC sistemde, sabit mıknatıslı senkron motorun konum döngüsü, hız döngüsü ve akım döngüsü senkronunu sağlamak amacıyla elde ettikleri matematiksel eşitlikleri model tabanlı sistem olan SIMULINK üzerinde simule etmektedirler. Sonraki çalışmalarda kam profili hatalarının hız optimizasyonu kullanılarak ortadan kaldırılabilceği ortaya koyulmaktadır. (Sui, Guo , Liu, & Tian, 2011)

Timehenko ve ark. (1999) yaptıkları çalışmada kam milinin dairesel bir taşlama makinesinde mekanik kopyalama ile hassas üretimi için matematiksel denklemleri ortaya koymaktadırlar. (Timehenko, Skomorokhov, & Skhirtladze, 1999)

Chen ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada CNC taşlamada teğet noktası takibi şeklinde önerdikleri bir yöntemi ele almaktadırlar. Kam milleri ve krank milleri üretimi için kullanılabilir olduğu savunulan yöntemde temel strateji olarak taş merkezi hareketi ve mil açısal hareketini senkron kontrol ederek taşlama hızını sabit tutmak olarak önerilmektedir. Bu bağlamda bir örnek üzerinden yapılan çalışmada C eksen açısal hızlarının optimize edildiği görülmektedir. (Chen, Mei, & Zheng, 2009)



2. MATERYAL VE METOD

2.1 Kam Profilinin Tasarımı

Bir kam mekanizmasında asıl hedef izleyicinin hareketini kontrol etmek olduğundan kam profili tasarımından önce izleyicinin hareket eğrisi tasarlanır. İzleyicinin hareket eğrisi tasarımında çeşitli eğri fonksiyonu yaklaşımları kullanılmaktadır. Bunlar, basit harmonik, parabolik, sikloid, trapezoid ivme, üçüncü derece, çift harmonik ve polinom hareket eğri fonksiyonları olarak sıralanabilir (Söylemez, 2008). Bu eğrilerin bütünleri ya da parçaları bir izleyicinin öncelikle konum yani S grafiğini, S'nin türevleri ise hız, ivme ve sıçrama grafiklerini oluşturur. Hareket eğrisi olarak adlandırılan S eğrisi yukarıda bahsi geçen sürekli fonksiyonlardan elde edildiğinden ayırıştırılması gerekir. Ayırıştırma, sürekli fonksiyonun açı parametresine üretim için gerekli olan çözünürlükte açı değerlerinin tek tek verilmesi yoluyla ya da MATLAB®, Mathcad, Excel gibi bir yazılımda fonksiyonun yazılıp açığa ait istenen çözünürlükteki veri kümesinin girdi olarak kullanılmasıyla elde edilir. Fonksiyonu seçilip ayırıştırılan S'nin verileri kam profilinin elde edilmesinde kullanılır. Kam profilinin elde edilmesinde kullanılan iki farklı yöntem vardır. Bunlardan en bilineni ve en çok kullanılanı analitik yaklaşım, daha az bilineni ve kullanımına az rastlanırsa ise grafik yaklaşım, başka bir deyişle geometrik yaklaşımdır. Grafik yaklaşım, izleyicinin hareket grafiği üzerinden aşamalı olarak her örnekleme açısındaki izleyicinin kam profiline temas noktaları bulunarak gerçekleştirildiğinden daha külfetli bir yoldur. Ancak görsel aşamaları açıkladığından analitik yaklaşıma göre anlaşılması daha kolay bir yöntemdir. Analitik yaklaşımda ise izleyici konumu, temas açısı, gibi değişkenler kullanılarak bir model elde edilir ve bu tek modelden kam profiline ait kartezyen ya da kutupsal koordinatların elde edilmesi sağlanır. Analitik yaklaşımda kullanılan basınç açısı izleyicinin konumunun türevine yani hızına bağlı bir fonksiyondur. İzleyicinin hareket fonksiyonunun bilinmediği, bunun yerine bir veri kümesinin bulunduğu durumlarda sayısal türev yaklaşımlarıyla hız tahmini yapılarak profil hesabı yapılabilir. Grafik yaklaşımın türevli değişkenleri içermemesi analitik yaklaşıma göre avantajlı olmasını sağlayan sebeplerden bir başkasıdır. Bu bölümde analitik ve grafik yaklaşımlar denklemleri ve çizim aşamaları verilerek anlatılmaktadır. CNC taşlamada üretilen kam

milleri genellikle yüksek hızlı radyal kam milleri olduğu ve bu kam millerinin de ötelemeli ve çoğunlukla düz ile yuvarlak izleyiciye sahip olduğu göz önünde bulundurularak salınan izleyicili kam millerinin hesapları konu dışında bırakılmak kaydıyla sadece ötelemeli kam millerinin hesapları ele alınmaktadır.

2.1.1 Analitik yaklaşım

Kam profilinin kutupsal ya da Kartezyen koordinatlarını elde etmek için büyük sıklıkla kullanılan analitik yaklaşımda tersleme varsayımı uygulanır. Tersleme varsayımında kam profili sabit, izleyici ise dönme ve öteleme hareketlerinin ikisini de yapıyor olarak kabul edilir. İzleyicinin dönme yönü kamın dönme yönünün tersine alınır. Bu kabul ile, süreç görsel olarak ele alındığında profil zarfının oluşumu rahatlıkla anlaşılmış olur. Öyle ki ilk başta profil olmadığından profilin döndürülmesi de zaten söz konusu olamaz. Yani tersleme yaklaşımı ile sadece izleyici hareketi yaparak zarf oluşturma yöntemi açıklanır. Düz izleyicide kam profili ile izleyicinin temas noktalarının koordinatları elde edilir, yuvarlak izleyicide ise hem temas noktalarının hem de izleyicinin merkez noktalarından oluşan saha eğrisinin (pitch curve) koordinatları elde edilir. Özellikle yuvarlak izleyicili kamlarda konumun türevi olan hızın bir fonksiyonu olan basınç açısı da değişim göstermektedir. Bu durum en temel ve önemli kam profili hesabı kavramlarından biridir. Ayrıca düz izleyicili kamların da yuvarlak taş kullanan CNC taşlama makinelerinde üretiliyor olması, yuvarlak izleyicili kam mekanizmasının analitiğinin kavranmasında önemli ve zorunlu bir yer tutar. Bu çalışmada ele alınan kam profili tasarımı üretime yani CNC taşlamaya yönelik olduğundan ve CNC taşlamada santrik izleyicili bir mekanizma yaklaşımı uygulandığından eksantrik yani izleyicinin öteleme ekseninin kamın dönme ekseninden geçmediği durumlar ele alınmamıştır.

2.1.1.1 Yuvarlak izleyicili kam mekanizması için kam profili analitik hesabı

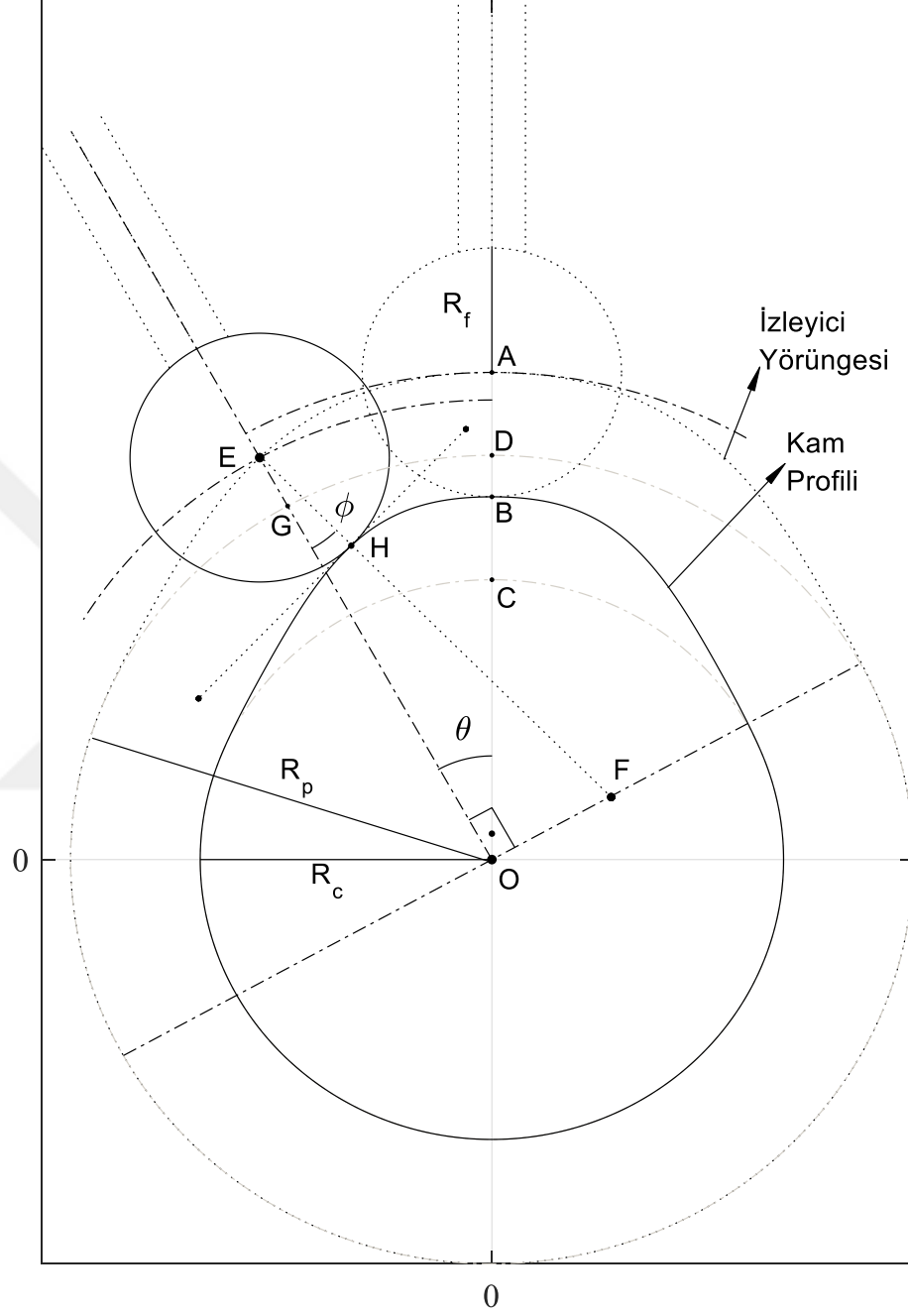
Kam mekanizması çeşidi olarak ele alınan yuvarlak izleyicili ötelemeli tür, aynı zamanda CNC taşlama ya da CNC freze ile üretilen kam millerinde yörünge tayininin temelini oluşturur. Çünkü taşlamada ve frezede kullanılan kesiciler yuvarlak profillidir. Eğer kesici ile izleyicinin çapları aynı olursa yeni bir yörünge tasarımına gerek kalmadan, izleyici yörüngesi yani saha eğrisi kesiciye atanarak profil elde edilebilir. Ancak kesici çapının izleyici ile aynı olması durumu üretimde her zaman sağlanamaz. Taş çapları daha hızlı talaş kaldırmak için büyük seçilir ve freze kesicilerinin çapları da çok değişken skalada olmayıp küçük çaplı matkap ucu şeklinde seçilir. Bu durumda

izleyicinin kam yüzeyine basınç teğetliğine dik olmak kaydıyla izleyicinin yörüngesinden farklı bir yörünge oluşur. Yeni yörüngeyi takip eden kesici ya da taş, değişken bir izleyici eksantrikliğine sahip olur. Bu durum da kesici ya da taşın iki eksende kontrol edilmesini gerektirir. Aksi durumda yani eksantrikliğin söz konusu olmadığı durumda kesicinin ya da taşın temas açısı da değişeceğinden doğru profil elde edilemez. Böyle bir durumda ancak kesicinin ya da taşın izleyici ile aynı temas noktalarına bastığı açılar bulunarak yeni bir açı-konum tabelası oluşturmak kaydıyla üretim yapılabilir.

Kam profilinin elde edilmesi için literatürde kullanılan analitik yaklaşım Şekil 2.1 üzerinden anlatılarak ele alınmaktadır. Şekil 2.1’de kam profilinin temel dairesi, izleyici yörüngesinin temel dairesi, kam profili ve izleyici yörüngesi geometrileri; izleyici konumu, basınç açısı, kam açısı ve yörünge yarıçapı değişkenleri ile izleyici yarıçapı ve temel daire yarıçapı sabitleri görülebilmektedir. Kam profili geometrisini koordinatlar şeklinde elde etmek için izleyiciye ait konum bilgisini içeren S eğrisi kullanılmalıdır. Ancak S eğrisine ait veri kümesi tek başına yeterli değildir. Analitik yaklaşımda S ’nin türevi olan hız yani v eğrisi de hesaplamalarda kullanılmaktadır. v ise ilginç bir şekilde sayısal olarak Şekil 2.1’de görülen $|FO|$ uzunluğuna eşit olmaktadır (Norton, 2002). Bu yüzden S verisinin türevi de elde edilmelidir. Bu ya analitik türev yöntemiyle S eğrisinin sürekli fonksiyonundan ya da sayısal türev yöntemiyle S veri kümesinden elde edilir. Bu çalışmada kullanılan türevli değerler sayısal türev yöntemiyle elde edilmektedir.

Şekil 2.1’de görülen A merkezli, yarıçapı R_f olarak adlandırılan ve $|AB|$ uzunluğunda olan yuvarlak izleyici maksimum S değerindeki ilk konumu göstermektedir ve bu konumda basınç açısı değeri oluşmamaktadır. İzleyicinin dönmesini ifade eden θ açısının sıfıra eşit olduğu bu konumda $S(0)$ S fonksiyonunun maksimum değeri olan $|BC|$ uzunluğundadır. E merkezli izleyici üzerinden değişkenler daha iyi kavranmaktadır. E merkezli izleyici θ açısında, ϕ açısıyla bir basınç oluşturmaktadır. İzleyici bu konumda kam profiline H noktasında teğettir. ϕ açısının bir kolu izleyicinin öteleme eksenine ile çakışık ve O merkezinden geçmekte, diğer kolu ise izleyici öteleme eksenine dik bir eksen üzerindeki F noktasından geçmektedir. $|EO| \perp |FO|$ olmak kaydıyla, $|FO|$ uzunluğu ise $|EG|$ uzunluğu ile gösterilen $S(\theta)$ konumunun sayısal olarak türevine yani $v(\theta)$ hız değerine eşit olmaktadır (Norton, 2002). Bu eşitliği oluşturan ispat Ek-1’de verilmektedir. Burada $v(\theta)$ hız fonksiyonunun birimi uzunluk/radyan alınmalı ve sayısal türev işlemlerinin de radyan birimde yapılması gerektiği

unutulmamalıdır. Kama ait R_c olarak adlandırılan temel daire yarıçapı $|CO|$ uzunluğundadır. İzleyici yörüngesine ait R_p olarak adlandırılan temel daire ise $|DO|$ uzunluğundadır.



Şekil 2.1: Yuvarlak santrik izleyicili kam mekanizması analitik yaklaşım gösterimi

Burada OEF dik üçgeni üzerinde,

$$\tan \phi = \frac{|FO|}{|EG| + |GO|} = \frac{v(\theta)}{S(\theta) + R_p} \quad [2.1]$$

eşitliğinden, ϕ basınç açısı fonksiyonu Eşitlik 2.2’de olduğu gibi elde edilir.

$$\phi(\theta) = \arctan \frac{v(\theta)}{S(\theta) + R_p} \quad [2.2]$$

E noktasının dolayısıyla izleyicinin yörüngesinin koordinatları,

$$\left. \begin{aligned} x_f(\theta) &= \sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)(S(\theta) + R_p) \\ y_f(\theta) &= \cos\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)(S(\theta) + R_p) \end{aligned} \right\} \quad [2.3]$$

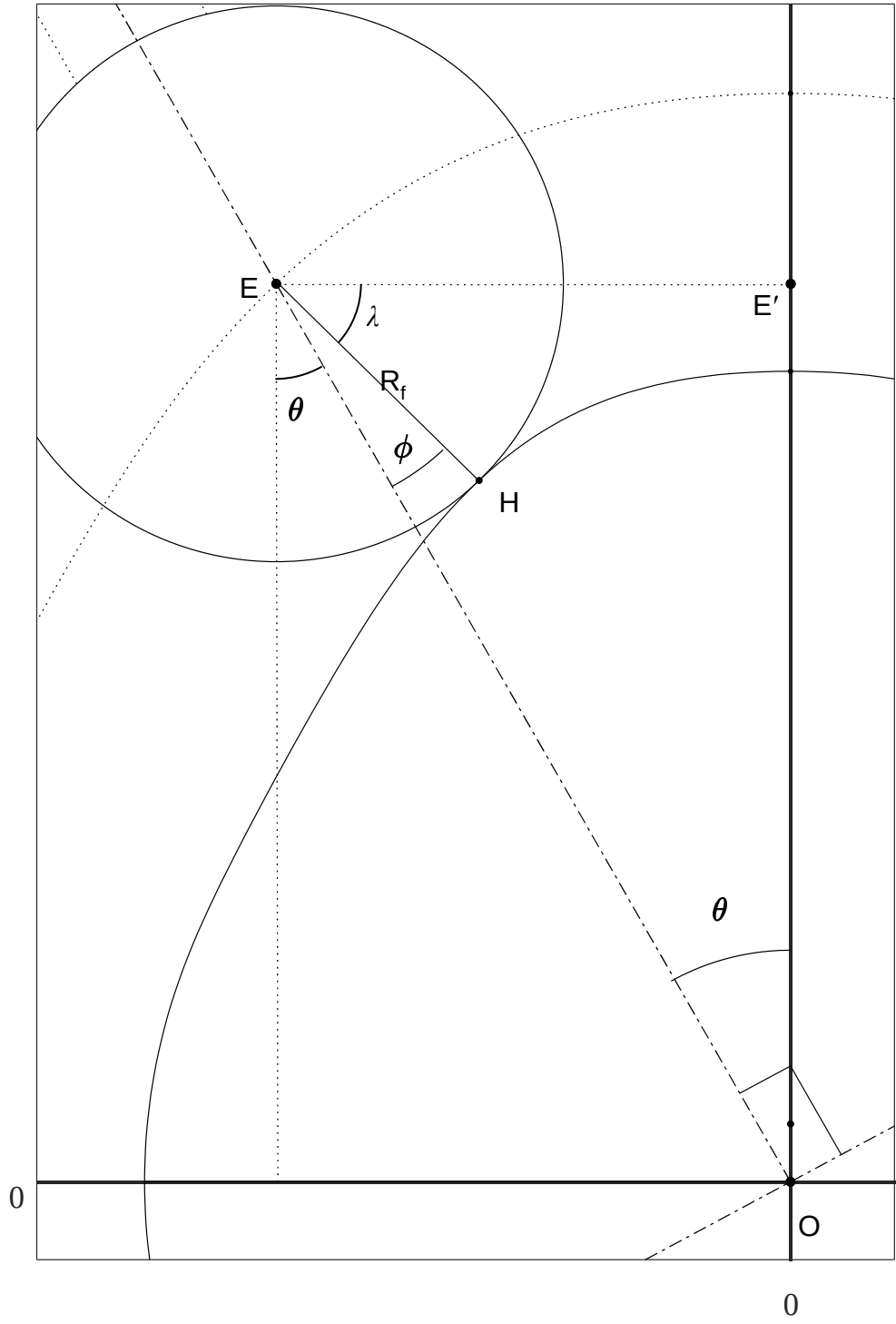
E noktasının koordinatları, ϕ açısı, $|EO|$ uzunluğu ve $|EH|$ uzunluğu bilindiğine göre kam profili yüzeyine teması ifade eden H noktasının da koordinatları bulunabilir. H noktası kam profili üzerinde olduğundan S fonksiyonun bütün açı değerleri için H noktaları hesaplanarak kam profiline ait nokta kümesi hesaplanmaktadır. H noktasının koordinatlarının hesaplanması Şekil 2.2’de gösterilen çizim göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Burada E noktasından yatay ve dikey eksenlere paralel kılavuz doğruları çizildiğinde θ ve ϕ açılara bağlı HEE’ açısı oluşmaktadır. Oluşan açı λ olarak adlandırılarak H noktası için koordinat hesabı yapılmaktadır.

$$\lambda(\theta) = \frac{\pi}{2} - \theta - \phi(\theta) \quad [2.4]$$

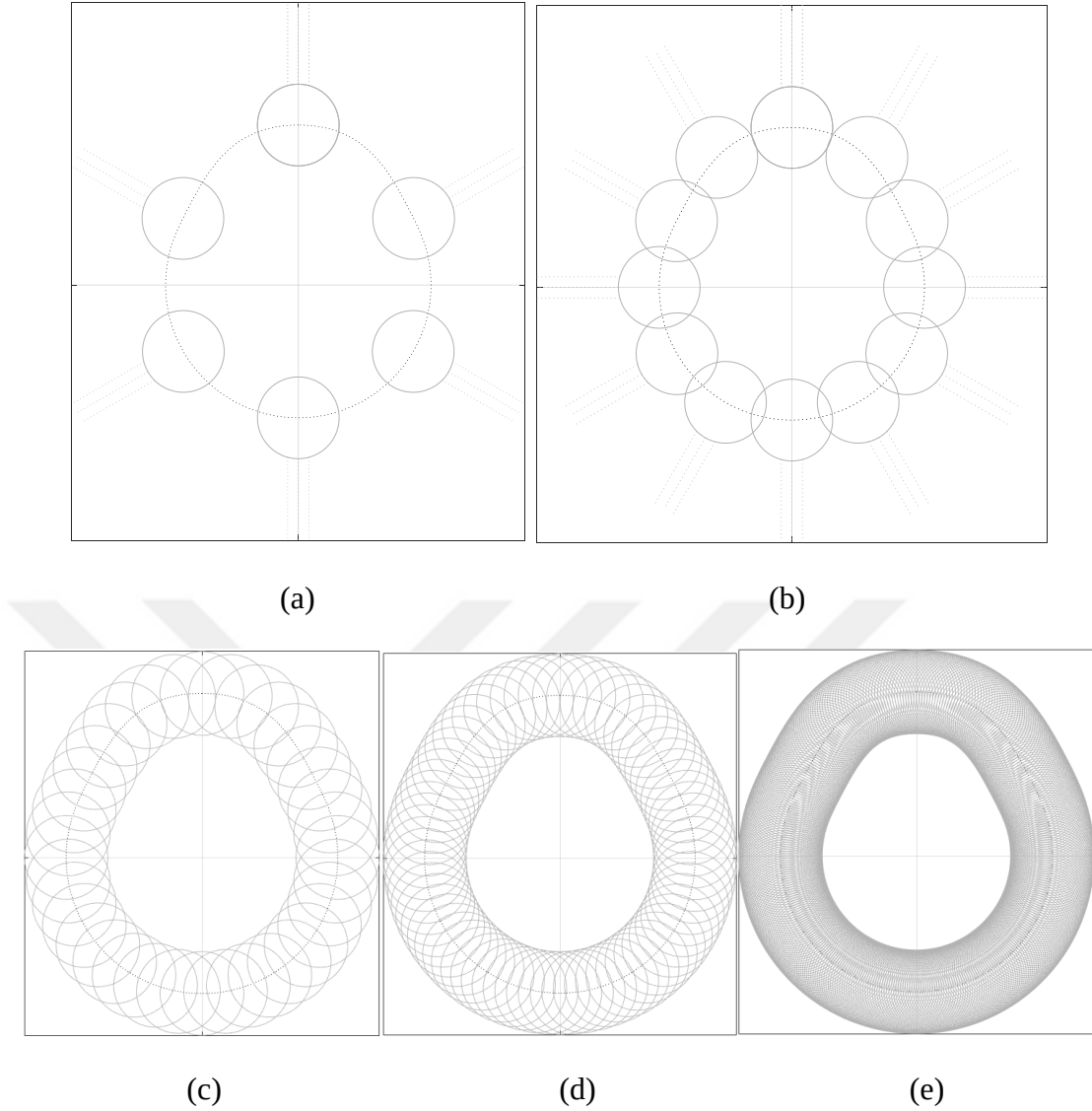
$$\left. \begin{aligned} x_H(\theta) &= x_f(\theta) + R_f \sin(-\lambda(\theta)) \\ y_H(\theta) &= y_f(\theta) + R_f \cos(-\lambda(\theta)) \end{aligned} \right\} \quad [2.5]$$

Eşitlik 2.5'te her θ açısı için elde edilen H noktasının koordinat değerleri kam profilinin de zarfını vermektedir. Ayrıca kam zarfı sadece Eşitlik 2.3 kullanılarak da elde edilebilmektedir ancak zarftaki uç noktaları hesaplamak için de ayrıca sayısal hesap gerekebilmektedir. Şekil 2.3'te aynı kama ait farklı açı çözünürlüklerinde elde edilmiş kam zarfları görülmektedir.





Şekil 2.2: Kam profilinde basınç noktasının hesaplanması için çizim



Şekil 2.3: Yuvarlak izleyicili kam zarfları a)60° b)30° c)10° d)5° e)1°

2.1.1.2 Düz izleyicili kam mekanizması için kam profili analitik hesabı

Düz izleyicili, ötelemeli kam mekanizmalarının genellikle içten yanmalı motorların supap kapaklarının silindirdeki gaz değişimini kontrol etmek için kullanıldıkları görülmektedir. Düz izleyicili kam mekanizmasında yörünge kam yüzeyinde oluşmaktadır. Bu durum hesabı biraz daha kolay hale getirmektedir. Literatürdeki analitik yaklaşımla Şekil 2.4'te görülen kam profilinin temel dairesi, basınç açısı ve kam açısı değişkenleri ile temel daire yarıçapı sabiti kullanılarak kam profili geometrisi elde edilmektedir. Kama ait R_c olarak adlandırılan temel daire yarıçapı $|AO|$ uzunluğundadır. $|DO|$ uzunluğu ile ifade edilen kam profilindeki izleyici basınç noktasının orijine uzaklığı R olarak adlandırılmaktadır. Düz izleyici mekanizmada da profil koordinatlarını elde etmek için S eğrisine ait veri kümesi yeterli değildir. S 'nin türevi

olan v eğrisine ait veri kümesi de kullanılmaktadır. v ise Şekil 2.1’de görülen $|CD|$ uzunluğuna değer olarak eşittir. $S(\theta)$ değeri ise $|BC|$ uzunluğu olduğuna göre ϕ açısı Eşitlik 2.6 – 2.7 ile hesaplanabilir.

$$\tan \phi = \frac{|CD|}{|BO| + |BC|} = \frac{v(\theta)}{R_c + S(\theta)} \quad [2.6]$$

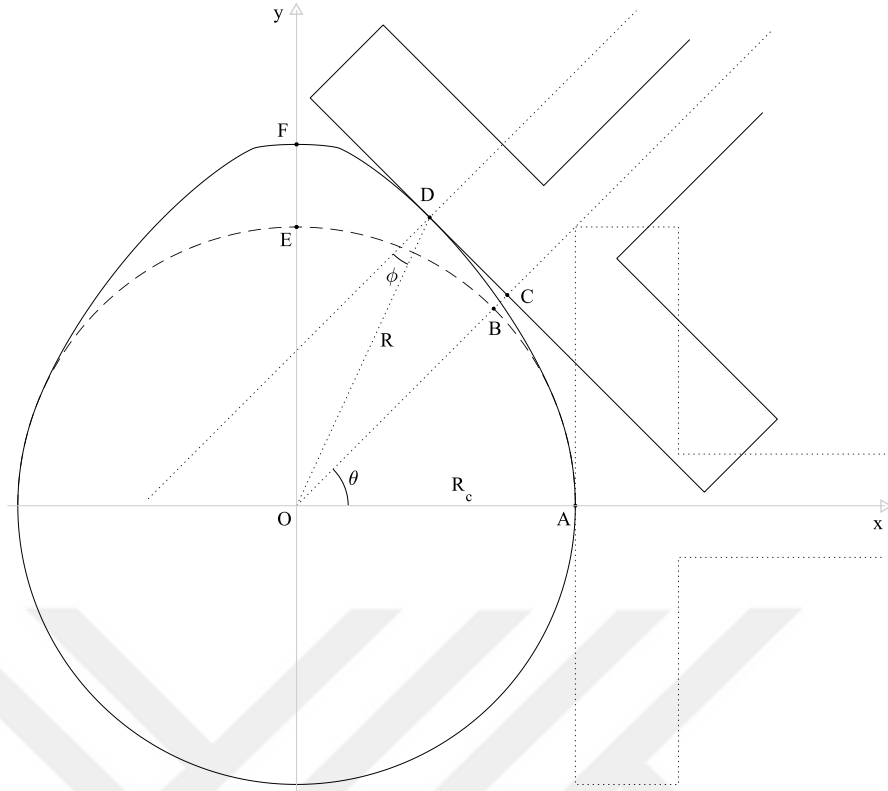
$$\phi(\theta) = \arctan \frac{v(\theta)}{R_c + S(\theta)} \quad [2.7]$$

Kam profili koordinatları izleyicinin temas noktaları olacağından D noktasının koordinat bileşenlerinin bulunması gerekir. ϕ açısının θ bitişiğine taşınıp iki açının toplanmasıyla oluşan açıdan koordinatlara ulaşılabilir ancak öncelikle $|DO|=R$ uzunluğunun bulunması gerekir. Eşitlik 2.8’de R uzunluğu hesaplanmaktadır.

$$R(\theta) = (|BO| + |BC|) \cdot \cos(\phi(\theta)) = (R_c + S(\theta)) \cdot \cos(\phi(\theta)) \quad [2.8]$$

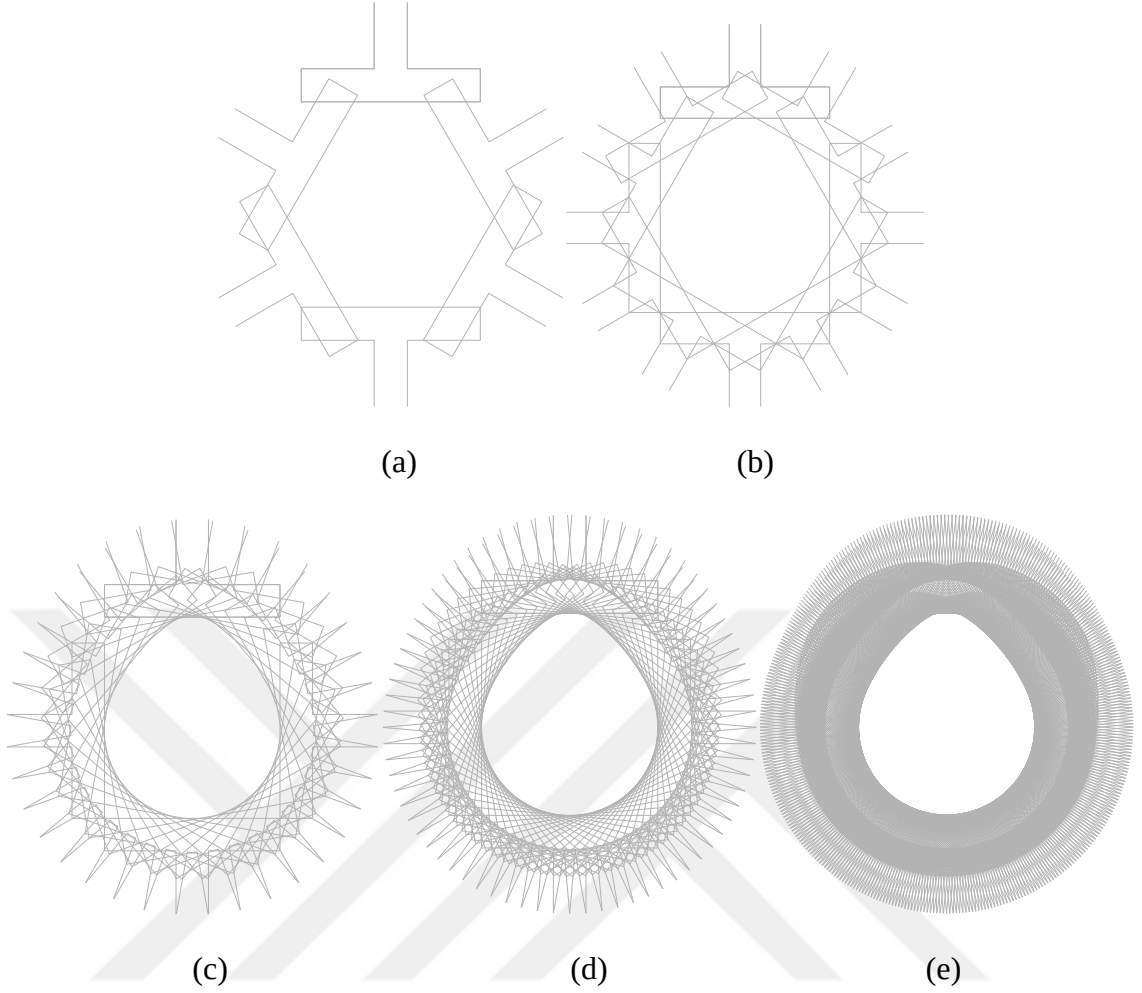
Eşitlik 2.9’da D noktasının koordinat hesabı verilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} x(\theta) &= R \cdot \cos(\theta + \phi(\theta)) \\ y(\theta) &= R \cdot \sin(\theta + \phi(\theta)) \end{aligned} \right\} \quad [2.9]$$



Şekil 2.4: Düz santrik izleyicili kam mekanizması analitik yaklaşım gösterimi

İzleyicinin her θ açısındaki konumu üst üste çizdirilerek kamın zarfı elde edilebilmektedir. Ancak kamın zarfından profil koordinatlarını elde etmek ayrıca bir sayısal hesap gerektirebilmektedir. Şekil 2.5'te farklı açı çözünürlüklerinde çizdirilmiş kam zarfları görülmektedir.



Şekil 2.5: Yuvarlak izleyicili kam zarfları a)60° b)30° c)10° d)5° e)1°

2.1.2 Grafik yaklaşım

Kam profili tasarımı kullanılan yöntemlerden, analitik yaklaşıma göre daha az bilineni ve kullanımına az rastlanılan olan grafik yaklaşım, başka bir deyişle geometrik yaklaşım, izleyicinin hareket grafiği üzerinden aşamalı olarak her örnekleme açısında kam profilindeki basınç noktalarının taşıma yöntemi sayesinde bulunmasıyla gerçekleştirilmektedir. Her örnekleme açısındaki taşıma çizimlerinin bir CAD yazılımında yapılması daha külfetli bir yol olduğundan daha az tercih edilmektedir. Sayısal hesap imkanlarının artmasıyla ve CAD yazılımlarının kodlarla da yönlendirilerek otomatik çizimlerin gerçekleştirilebilmesiyle grafik yaklaşım yeniden gündeme gelmektedir. Grafik yaklaşımın, kam profilinin oluşum aşamalarının daha iyi kavranabilmesi ve türevli değişkenlere ihtiyaç duyulmaması gibi analitik yaklaşıma göre üstünlükleri de tercih sebebi olmaktadır. Literatürde grafik yaklaşım aşamaları

açıklanırken işlem aşamaları tek tek anlatılmaktadır. Son aşamada bütün izleyicilere teğet geçen bir eğri çizilmesi belirtilmekte ancak bu eğrinin nasıl çizileceği hakkında bir açıklama bulunmamaktadır (Rothbart, 2004; Söylemez, 2008). Bu durum grafik yaklaşımın uygulanmasını zorlaştırmaktadır zira kam profili eğrisi izleyicinin herhangi bir noktasına teğet olabileceğinden bu noktanın yani basınç açısının bulunması gerekir ki bu da analitik yaklaşımın uygulanmasını gerektirir. Bu yüzden literatürteki grafik yaklaşım anlatımına göre, bu yaklaşımı kullanarak hassas bir kam profili hesabı mümkün görünmemektedir. Oysaki temas noktalarının bulunması merkezden çıkan ışınlar ile izleyicinin kesişim noktalarını bulmakla mümkündür. Literatüre ek olarak teğet noktalarının bulunması anlatımı da bu tez çalışmasında yer almaktadır. Buna göre bir kama ait profili oluşturmak üzere düz ve yuvarlak izleyiciler için farklı işlem sıraları izlenmektedir.

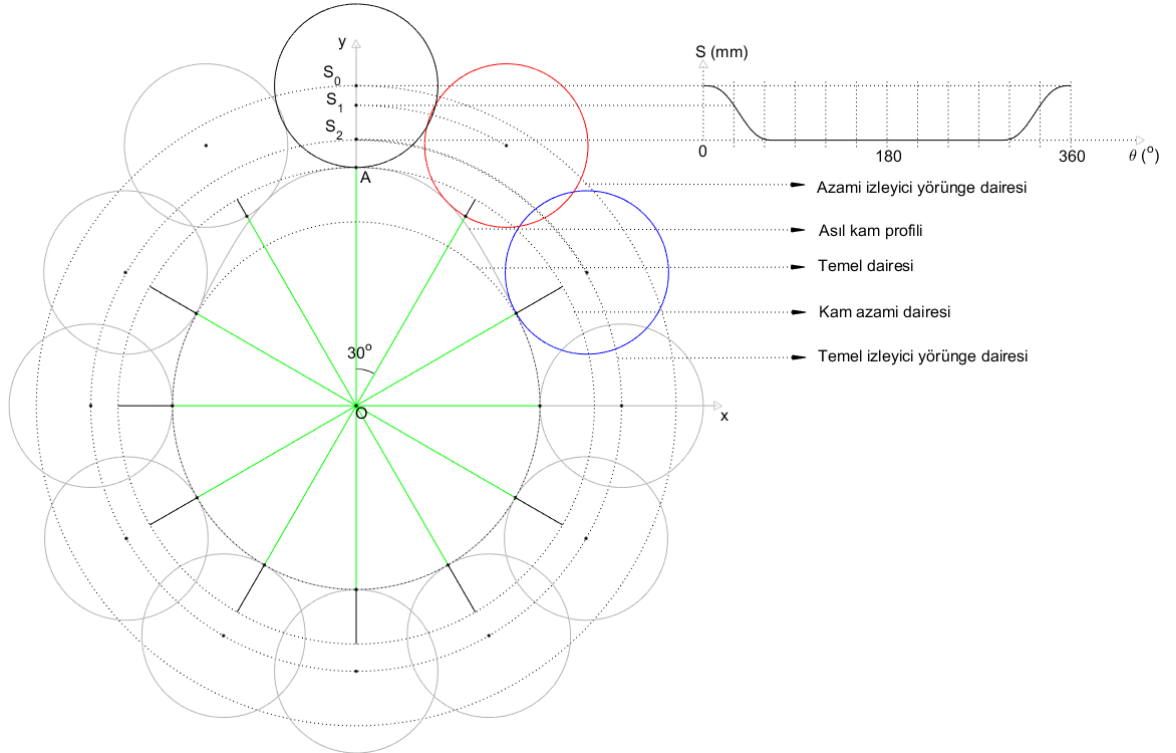
2.1.2.1 Yuvarlak izleyicili kam mekanizması için grafik kam profili çizimi

Yuvarlak santrik izleyicili kam mekanizmasına ait kam profilinin oluşturulması için aşağıdaki işlem basamakları kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da 30° örnekleme açısı için sürecin anlaşılmasına yönelik örnek bir çizim görülmektedir. Gerçek uygulamalarda genellikle 1° örnekleme açısı kullanılmakta olup örnekleme açısının 30° seçilmesi kaba bir kam profili oluşmasına neden olmaktadır. Sürecin daha iyi kavranması için 30° seçilmiştir.

1. Kam merkezi, kam temel dairesi, kam azami dairesi, azami izleyici yörünge dairesi ve temel izleyici yörünge dairesi çizilerek kam düzlemi oluşturulur.
2. Örnekleme açısı aralıklarında, $360^\circ/(\text{Örnekleme açısı})$ adedince, $R_c + \max(S)$ uzunluğunda merkezden çıkan doğru parçaları çizilir. (Şekil 2.6'da siyah doğrular)
3. İlk konum azami değer olacak şekilde $S-\theta$ grafiği çizilir. S verisine R_c ve R_f değerleri eklenerek çizilmelidir. θ vektörü ise kam düzlemi dışında bir aralığa taşınmalıdır.
4. S grafiği istenen açı hassasiyetinde örnekleme açılarına bölünür. (Şekil 2.6'da 30°)
5. Grafikten kam düzlemine çizilen taşıma doğrusu sayesinde izleyici merkezi, azami S değerinin merkez doğrusu üzerine yerleştirilir. (Şekil 2.6'da siyah renkli yuvarlak izleyici, $x=0$, $y=\max(S)+R_c+R_f$)

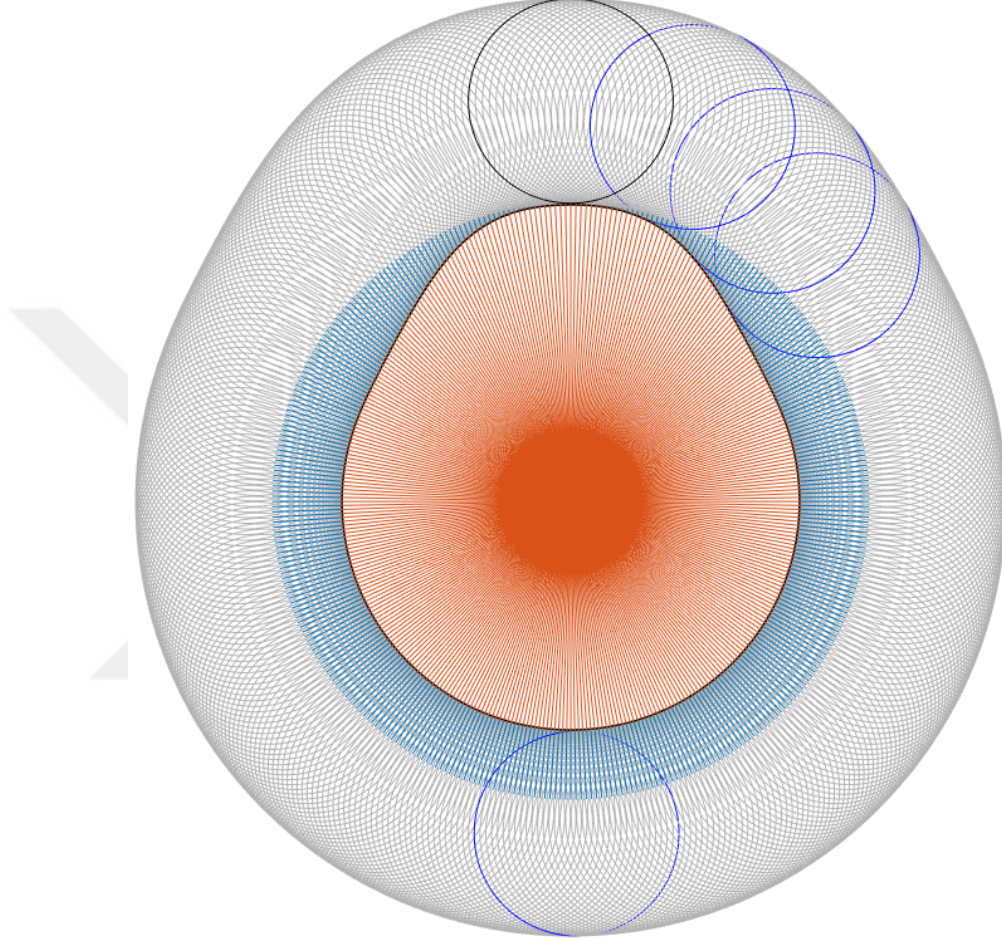
6. İzleyici merkezinin ordinatı bir sonraki S değerine taşınır ve ilgili merkez doğrusu üzerine döndürülerek taşınır. (Şekil 2.6'da S_1 ve S_2 noktalarından çıkan yaylarla döndürme işlemi gösterilmektedir.)
7. İzleyicinin kesiştiği merkez doğruların artıkları budanır. (Şekil 2.6'da artıklar siyah, kalan doğrular ise yeşil renkte gösterilmektedir.)
8. 360° tamamlanana kadar 6. ve 7. adımlar tekrarlanır.
9. Sonuçta budanmış merkez doğrularının uçları profilin koordinatlarını oluşturur.

Şekil 2.6'da 0° için ilk izleyici siyah, 30° için ikinci izleyici kırmızı, 60° için üçüncü izleyici mavi ve devam eden açılar için izleyiciler gri renkte görülmektedir. Şekil 2.6'da 1° örnekleme açısı ile oluşturulmuş asıl profil ile budanmış doğruların örtüşmedikleri kırmızı renkli izleyici üzerinde görülmektedir. İzleyicinin kam profiline teğet olduğu nokta ile merkez doğrusuyla kesiştiği noktanın farklı olduğu da görülmektedir. Bu durum yüksek bir örnekleme açısı seçildiğinden kaynaklanmaktadır. Örnekleme açısının 1° olarak seçildiği durumda izleyici birden fazla merkez doğrusu ile kesişerek, kesiştiği tüm doğrular budanmaktadır. Böylelikle kam zarfının dışında kalan bütün noktalar elenerek, elde kalan merkez doğrularının uç noktaları zarfa teğet olan eğri üzerinde kalmakta ve profili oluşturmaktadır.



Şekil 2.6: Yuvarlak santrik izleyicili kam mekanizması grafik yaklaşım çizimi

1° örnekleme açısı için uygulanan grafik yaklaşım Şekil 2.7’de görülmektedir. Şekil 2.7’de mavi doğrular budanmış artıkları, kırmızı doğrular kalan merkez doğruları, siyah daire izleyicinin ilk konumunu, mavi daireler izleyicilerin bazı farklı konumlarını, gri daireler yuvarlak izleyicilerin diğer tüm konumlarını, kapalı siyah eğri ise kam zarfına teğet olan kam profili eğrisini göstermektedir.



Şekil 2.7: Yuvarlak izleyicili 1° örnekleme açılı kam mekanizmasının grafik yaklaşım çizimi

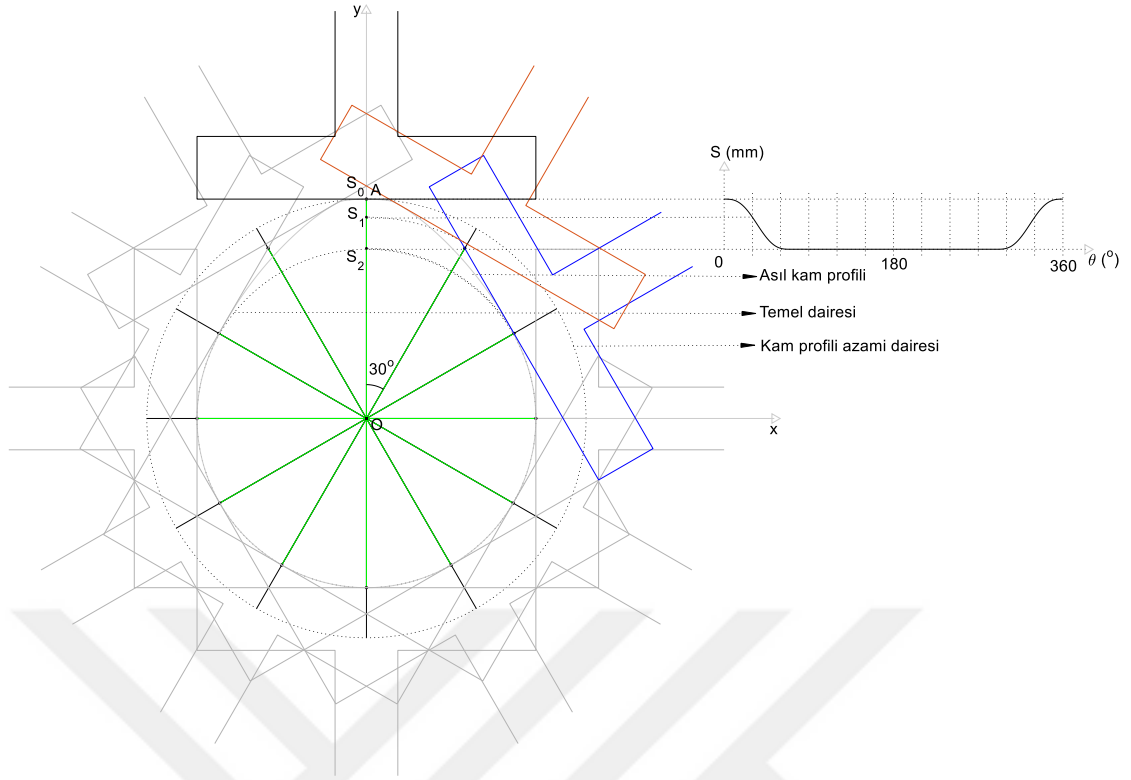
2.1.2.2 Düz izleyicili kam mekanizması için grafik kam profili çizimi

1. Kam merkezi, kam temel dairesi ve kam azami dairesi çizilerek kam düzlemi oluşturulur.
2. Örnekleme açısı aralıklarında, $360^\circ / (\text{Örnekleme açısı})$ adedince, $R_c + \max(S)$ uzunluğunda merkezden çıkan doğru parçaları çizilir. (Şekil 2.6’da siyah doğrular)

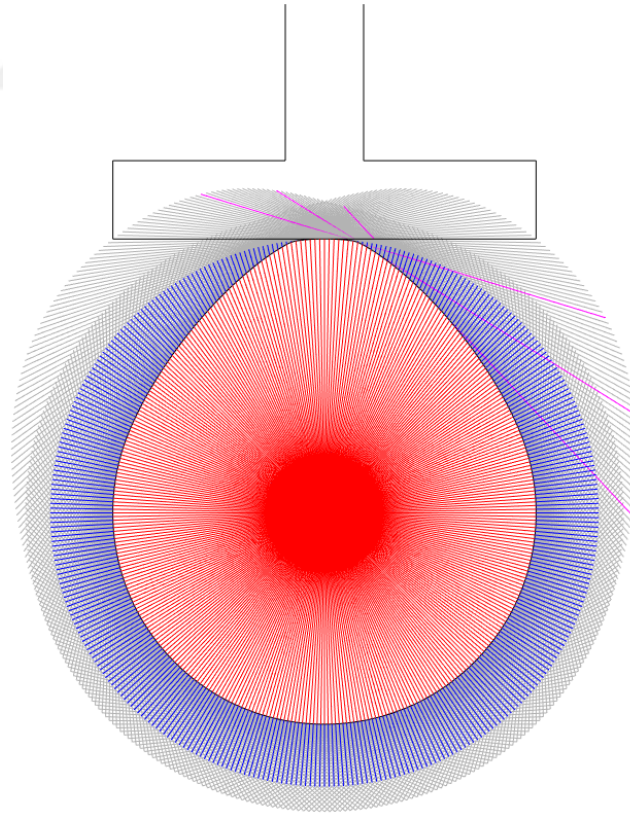
3. İlk konum azami değer olacak şekilde $S-\theta$ grafiği çizilir. S verisine R_c değeri eklenerek çizilmelidir. θ vektörü ise kam düzlemi dışında bir aralığa taşınmalıdır.
4. S grafiği istenen açı hassasiyetinde örnekleme açılarına bölünür. (şekil 2.8’de 30°)
5. Grafikten kam düzlemine çizilen taşıma doğrusu sayesinde izleyici azami S değerinin merkez doğrusu üzerine dik olarak yerleştirilir. (şekil 2.8’de siyah renkli düz izleyici, $x=0$, $y=\max(S)+R_c$)
6. İzleyici yüzeyi doğrusunun ordinatı bir sonraki S değerine taşınır ve ilgili merkez doğrusu üzerine döndürölerek taşınır. (şekil 2.8’de S_1 ve S_2 noktalarından çıkan yaylarla döndürme işlemi gösterilmektedir.)
7. İzleyicinin keşiştiği merkez doğruların artıkları budanır. (şekil 2.8’de artıklar siyah, kalan doğrular ise yeşil renkte gösterilmektedir.)
8. 360° tamamlanana kadar 6. ve 7. adımlar tekrarlanır.
9. Sonuçta budanmış merkez doğrularının uçları profilin koordinatlarını oluşturur.

şekil 2.8’de 0° için ilk izleyici siyah, 30° için ikinci izleyici kırmızı, 60° için üçüncü izleyici mavi ve devam eden açıları için izleyiciler gri renkte görölmektedir. Mavi renkle gösterilen izleyici hem kendine dik olan merkez doğrusu ile hem de bir önceki kırmızı izleyiciye ait merkez doğrusunu kesmektedir. Dolayısıyla kırmızı izleyicinin daha önce budadığı doğru güncellendiğinden izleyici keşişim noktasından yukarıda kalmaktadır. 1o örnekleme açısına sahip asıl kam çiziminde budama işlemi izleyicinin keşiştiği tüm doğrulara yapılarak basınç açısından bağımsız bir yöntem uygulanmaktadır. Böylelikle kam zarfının dışında kalan bütün noktalar elenerek, elde kalan merkez doğrularının uç noktaları zarfa teğet olan eğri üzerinde kalmakta ve profili oluşturmaktadır.

1o örnekleme açısı için uygulanan düz izleyicili grafik yaklaşım şekil 2.9’da görölmektedir. şekil 2.9’da mavi doğrular budanmış artıkları, kırmızı doğrular kalan merkez doğruları, siyah izleyici ilk konumu, fuşya doğrular düz izleyici yüzeylerinin bazı farklı konumlarını, gri doğrular yuvarlak izleyicilerin diğer tüm konumlarını yani kam zarfını, kapalı siyah eğri ise kam zarfına teğet olan kam profili eğrisini göstermektedir.



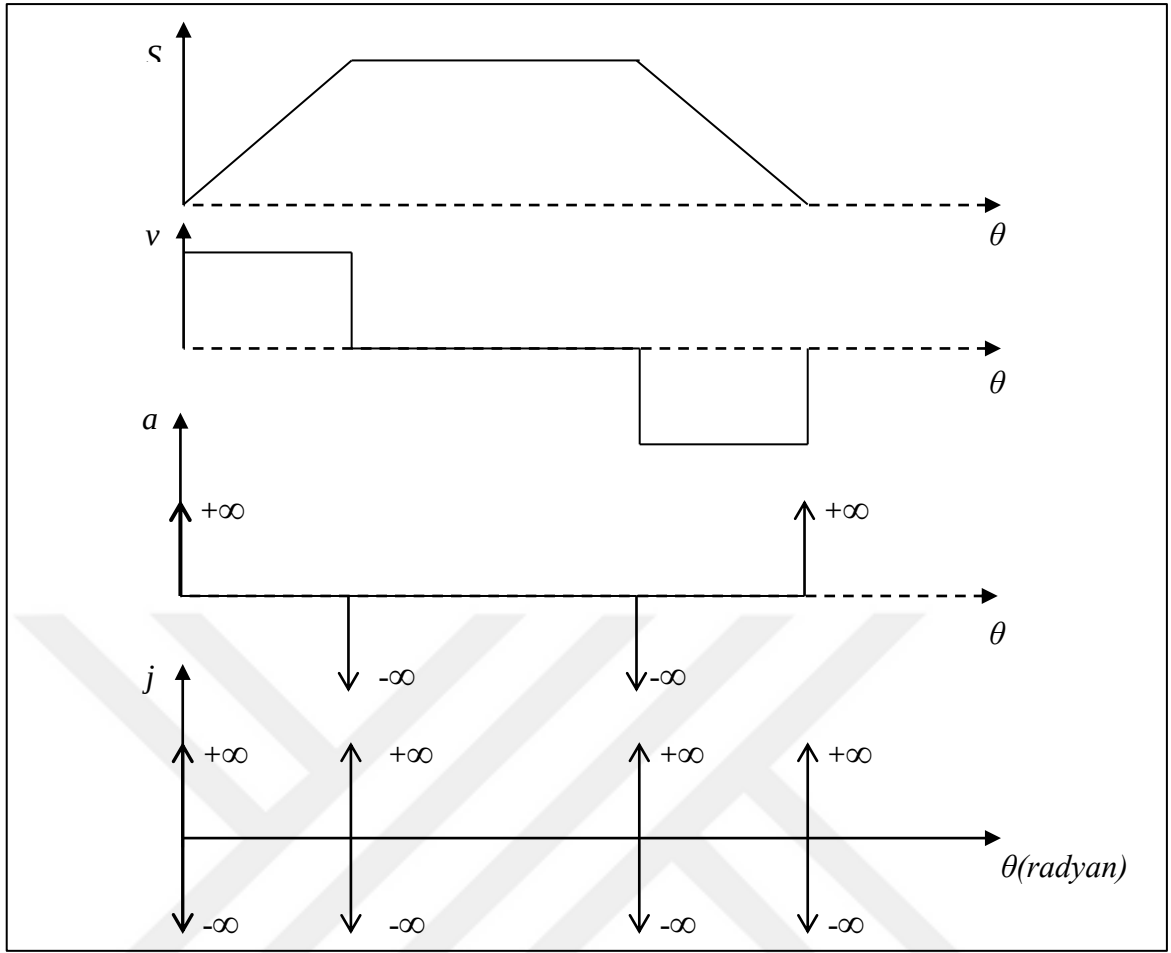
Şekil 2.8: Düz santrik izleyicili kam mekanizması grafik yaklaşım çizimi



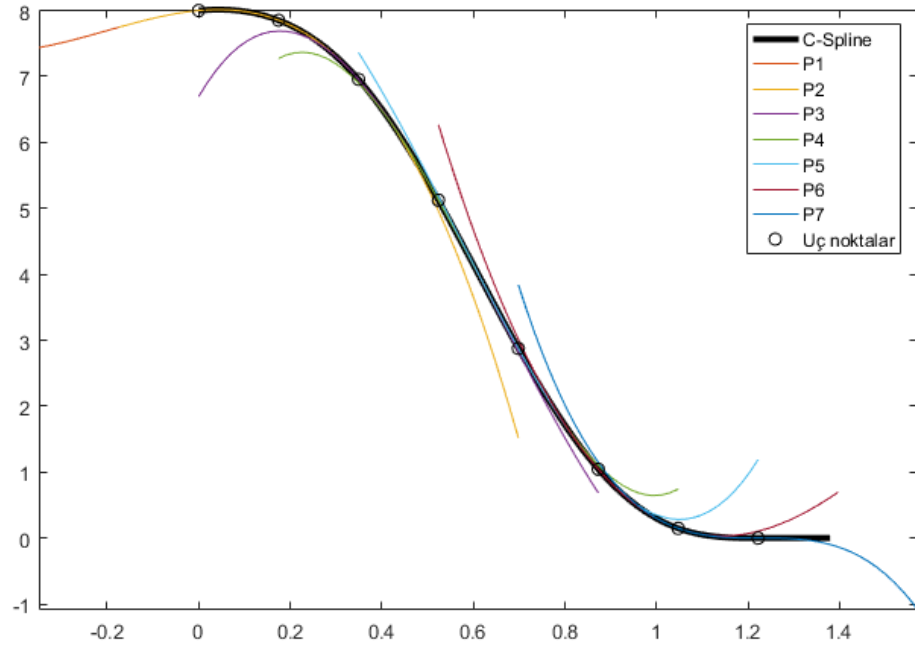
Şekil 2.9: Düz izleyicili 1° örnekleme açılı kam mekanizmasının grafik yaklaşım çizimi

2.1.3 Kam profili tasarımında eğri uydurma ve interpolasyon

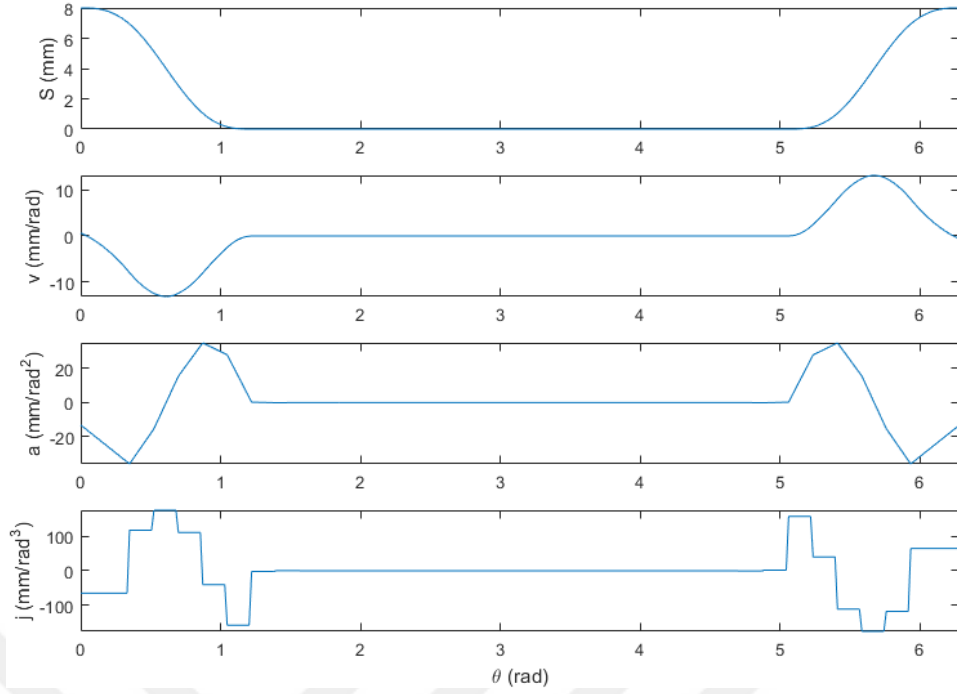
Bir yakıt motorunda valf zamanlama görevini dikte eden kam mekanizması izleyicisinin S fonksiyonu farklı eğrilerle ya da eğri parçaları ile temsil edilebilmektedir. S fonksiyonunun kinematik analizinde sonsuz değerlere giden durumların olması istenmeyen etmenlerden olarak bilinmektedir. Örneğin trapezoid bir konum fonksiyonunun ilk türevi olan hız fonksiyonunda sıfır ve sabit değerler görünürken ikinci türevi olan ivme fonksiyonunda sıfır ve sonsuza giden değerler görülmektedir. Bu durum Şekil 2.10'da açıkça görülmektedir. Kinematik analizlerdeki bu sonsuz değerlerin oluşması özellikle S 'nin üçüncü türevi olan j yani sıçrama fonksiyonundan kaynaklı olarak mekanizmanın çalışması esnasında yüksek sıçramalara sebep olmaktadır. Bu durum hem mekanizmanın ömrünün, hem de taşıt konforunun yüksek düzeyde tutulması için istenmeyen bir durum olmaktadır. İzleyici kinematiğindeki bu istenmeyen durumların engellenmesi için yüksek hızlı kamlarda sikloid, trapez ivme, modifiye edilmiş trapez ivme gibi eğriler kullanılmaktadır (Söylemez, 2008). Sonsuz değerler eğrilerdeki süreksizliklerden kaynaklandığından S eğrisinin sürekli bir fonksiyon olarak seçilmesi sonsuz değerleri de engellemektedir. Bir eğrinin sürekli olması için o eğriyi oluşturan alt fonksiyonlarının birleşim noktalarındaki ya da düğümlerindeki türevlerinin eşit olması gerekmektedir. Bu tür eğriler genellikle spline türü eğrilerdir. Karmaşık bir veri setine uydurulabilen en düşük dereceli eğri tipi olan ve bu yüzden sayısal hesaplamaları daha kolay yapılabilen kübik spline (c-spline) eğrileri çeşitli uygulamalarda kullanılabilmektedir. C-spline eğrileri üçüncü derece polinomların birleşmesiyle oluşarak aslında parçalı bir fonksiyondan ibaret olmaktadır. Parça fonksiyonlarının ortak noktalarında sürekli olması ile yumuşak geçişler sağlanmaktadır. Ayrıca kam mekanizmalarındaki özel bir durum için izleyici fonksiyonuna atanan bir c-spline eğrisinin sürekliliği v , a ve j değerlerinin de sonsuz değerlerin çıkmasını önlemektedir. Şekil 2.11'de sikloid fonksiyonla üretilmiş S eğrisinden 10° aralıklarla alınan veriye uydurulan c-spline eğrisinin kapama kısmı, Şekil 2.12'de ise S fonksiyonuna uydurulmuş eğrinin tamamı ve kinematik grafikleri görülmektedir. S verisine sürekli eğrilerin atanması ile katlı türevlerden dolayı izleyicide oluşabilecek sıçramalar önlenebilmektedir. Şekil 2.11'in oluşturulmasında kullanılan MATLAB® komut bütünü Ek-3'te verilmektedir.



Şekil 2.10: Trapez konum ve kinematiklerinin grafiklerinde sonsuz değerlerin oluşumu



Şekil 2.11: C-spline, alt polinomlar ve polinomların sürekli olduğu uç noktalar



Şekil 2.12: S verisine uydurulmuş c-spline ve kinematik grafikleri

Bir c-spline eğrisini oluşturabilmek, yani katsayılarını bulabilmek için en az dört noktanın tanımlanması gerekmektedir. Bunun nedeni eğrinin en az bir adet üçüncü derece bir polinom segmentinden meydana gelmesidir. Buna göre Eşitlik 2.10'da genel denklemi verilen üçüncü derece polinomun katsayılarını hesaplamak için verilen dört nokta, polinoma uygulanarak lineer denklem sistemi elde edilmektedir. Denklemin çözümü ile de polinom katsayıları bulunabilmektedir.

$$f(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad [2.10]$$

Verilen dört noktanın x eksenine göre aldığı değerlerin bilmesi gerekmektedir. Buna göre polinomun aldığı değer y ile ve noktalar x ile gösterilirse, dört noktanın indisi 0-4 arasında değişmek kaydıyla, lineer denklem Eşitlik 2.11'de görüldüğü gibi oluşmaktadır. Katsayılar matrisinin çözüm denklemi ise Eşitlik 2.12'de verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} x_3^3 & x_3^2 & x_3 & 1 \\ x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_0^3 & x_0^2 & x_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_3 \\ y_2 \\ y_1 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad [2.11]$$

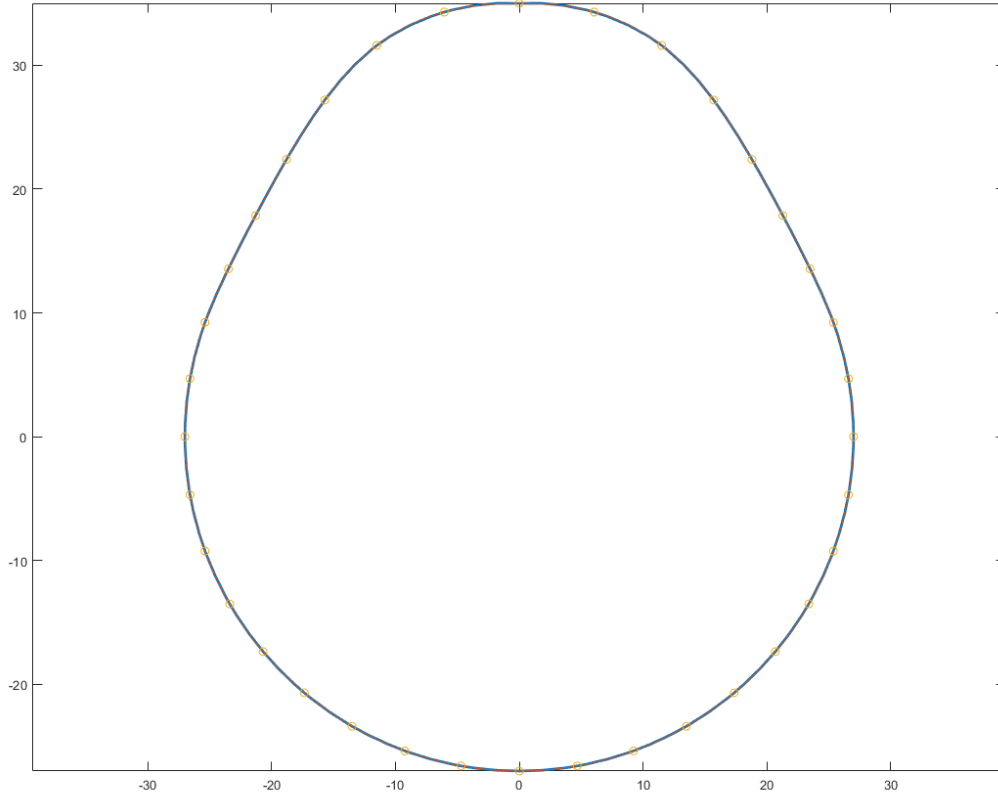
$$a = x^{-1}y, \quad |x| \neq 0 \quad [2.12]$$

Geleneksel CNC makinelerinde interpolasyon işlemi doğrusal ve dairesel olarak yapılabilmektedir, ancak doğrusal ve dairesel interpolasyon, doğrusal ya da dairesel olmayan yüzeylerin işlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Doğrusal olmayan işlemler içinse daha üst düzey CNC makinelerinde çeşitli polinom temelli eğriler kullanılmaktadır (Vavruška, 2012). CNC kam taşlama makinelerinde de taş, bir izleyici gibi hareket ettiğinden taşın kütlesine karşı iş yapan öteleme ekseninin servo motorlarına yüklenecek dinamik büyüklüklerin de kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bu yüzden taşın öteleme hareketinin katlı türevlerinin ani değişimlerini ve yüksek değerlerini engellemek amacıyla düğüm noktalarında sürekli olan parçalı eğrilerin seri üretimde kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. C-spline eğrileri C^2 sürekliliğine sahip olduğundan yani düğüm noktalarındaki ikinci türevler eşit olduğundan, hız analizi, ivme analizi ve eğrilik analizi açısından kam mekanizmaları için tercih sebebi olmaktadır. Ayrıca doğrusal interpolasyonla işleme yapıldığında kam profilindeki ya da S verisindeki örnekleme sayısına eşit sayıda komut satırıyla yavaş bir şekilde işlenebildiğinden eğri tabelaları oluşturularak komut satırı işletim sürelerinin azaltılmasına olanak tanınabilmektedir. Ancak CNC taşlama makinelerinin bu yeteneklerinin kam mili üreticileri tarafından kullanılabilmesi için eğri katsayılarını hesaplayabilen önişlemci (postprocessor) yazılımları da az sayıda CNC kam taşlama makinesi üreticisi tarafından ilgili ürünler ile birlikte sunulabilmektedir.

Kam profilinin bir eğri ile ifade edilebilmesi eğrilik yarıçapı, izleyici çap dönüşümü gibi problemlerin de çözülmesine olanak tanımaktadır. İzleyici hareketinin S eğrisi parametrik olmayan bir eğri ile ifade edilmektedir. Kam profili ise uzay eğrisi sınıfına girmektedir. Uzay eğrileri de ancak parametrik denklemlerle ifade edilebilmektedir (Alcázar, Hermoso, & Muntingh, 2014). Bu yüzden kam profilini bir eğri ile ifade

etmek için parametrik bir eğri uydurulması gerekmektedir. Elde x ve y koordinat değerleri bulunan bir veri setini parametrikleştirmenin çok çeşitli yolları bulunmaktadır. Kam profili verisi açıya göre ya da yay kirişi uzunluklarına göre parametrikleştirilebilmektedir. Şekil 2.13'te 10° aralıklarla açıya göre parametrikleştirilerek uydurulmuş bir profil eğrisi görülmektedir. Uydurma ve çizdirme işlemleri için gerekli MATLAB® komutları Ek-4'te verilmektedir. Sonuçta oluşan parametreye göre eğrinin türevi de alınabilmektedir. Uzay eğrilerinde türev ve iki katlı türev ise eğrilik değerlerini bulmakta kullanılmaktadır. Eşitlik 2.13'te parametrik eğriler için eğrilğin genel denklemi verilmektedir.

$$\kappa = \frac{x'y'' - y'x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} \quad [2.13]$$



Şekil 2.13: Uydurulmuş profil eğrisi

2.2 Kam Profilinden Hareket Eğrisine Ulaşmak: Ters Dönüşüm

CNC freze makinelerinde kam profili verileri ile bir kam mili ancak düşük hızlarda çalışan bir kam mekanizması için üretilebilir. Yüksek hızlı kam millerinin pürüzsüz yüzey gereksinimlerinden dolayı CNC taşlama yoluyla üretilmeleri gerekmektedir. Bu yüzden yüksek hızlı bir kam mekanizmasına ait kam milini üretebilmek için kam profiline ait koordinatlar yeterli olmamaktadır. Sadece profil koordinatlarının bulunduğu durumlarda ise S değerlerinin üretilmesi yani $XY \rightarrow S$ ters dönüşümünün yapılması bir çözüm yolu olabilmektedir. Ters dönüşüm problemi literatürde az sayıda çalışma ile ele alınmaktadır (Tutak & Söylemez, 1986; Kiper, Huang, & Söylemez, 2012). Bu çalışmada tersine dönüşüm yöntemi grafik yaklaşım kullanılarak geliştirilmektedir. Geliştirilen yöntem bölüm 3.2’de sunulmaktadır.

2.3 Kam Mekanizmasında Kinematik Analiz ve Optimizasyon

Yüksek hızlı kam mekanizmaları genellikle silindir subaplarının hareketini kontrol etmek için kullanıldığından izleyici hareketinin kinematik analizi yapılarak gürültüsüz bir şekilde kontrol yapabilen mekanizmanın tasarımı hedeflenmektedir. Bunun için izleyici hareketinin fonksiyonunu oluşturan S eğrisi kinematik analize dahil edilmektedir. Kinematik analizde bölüm 2.4.1 ‘de anlatılan ve Şekil 2.10’da gösterilen sonsuz değer durumlarının önlenmesi hedeflenmektedir. Buna göre S fonksiyonunun açısız konuma göre katlı türevleri analitik ya da sayısal yaklaşımla elde edilebilmektedir. S fonksiyonu bir matematiksel sürekli fonksiyon olduğunda hem analitik hem de sayısal yaklaşım kullanılabilir iken, ayrık veri olduğunda sadece sayısal yaklaşım kullanılabilir.

CNC taşlama işleminde kinematik analiz yüksek hızlara çıkılmadığından genellikle ivme ve sıçrama değerleri açısından ele alınmamaktadır. Üretimde daha çok kesme hızı, paso ya da talaş alma derinliği, temas yüzeyi, yüzey pürüzlülüğü gibi kısıtlar üzerinden optimizasyon yapılmakta ya da bu kısıtlara göre kinematik analizler elde edilmektedir. Bu bağlamda CNC taşlamada kinematik analizler belirlenirken istenen nitelikli üretimi sağlayabilmek adına öncelikle izleyiciye göre çok daha büyük çaplı taşlar kullanılmaktadır. Büyük çaplı taş kullanımı optimizasyon için en büyük kısıtı oluşturmaktadır. İzleyici S değerlerinin taş S değerlerine dönüştürülmesi ile başlayan optimizasyon süreci en uygun eğriyi uydurma ile devam etmekte ve uydurulan eğrilerin en uygun NC parçalı eğri tabloları şeklinde ifade edilmesi ile son bulmaktadır.

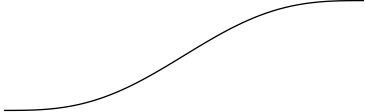
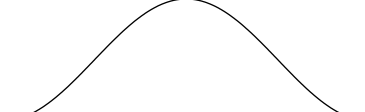
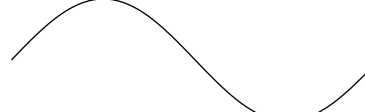
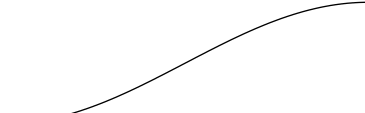
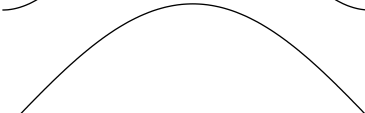
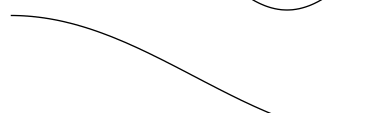
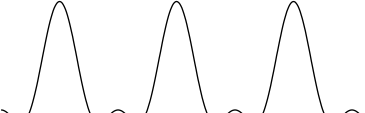
2.3.1 Analitik yaklaşım

İzleyicinin hareketi çeşitli fonksiyonlardan seçilebilmektedir. Sikloid, harmonik, çift harmonik, trapez ivme, modifiye trapez, 3-4-5 polinomu ve 4-5-6-7 polinomu gibi S fonksiyonlarının kinematik analizi sayısal yaklaşımla yapılmak istendiğinde öncelikle fonksiyona ilgili açı ve yükselme değerleri verilerek ayırık S veri seti elde edilmektedir. Çizelge 1’de bazı tek parçalı fonksiyonların analitik yaklaşımla elde edilmiş S , v , a , j denklemleri verilmektedir. Hesaplamalarda açısal hız sabit alınmakta, türev işlemi θ açısına göre yapılmaktadır. Denklemleri verilmeyen yukarıda bahsedilen diğer eğri fonksiyonları modifiye noktalarından dolayı ya da uydurulan polinomda oluşan katsayılarla göre denklemler değiştiğinden çizelgeye dahil edilmemiştir. Bu eğrilerin detaylı açıklamaları için literatüre bakılabilir (Rothbart, 2004). Analitik yöntemle elde edilen türevli ifadelerle ilgili açı değerleri verilerek eğriler çizdirilebilmektedir. Denklemleri verilen eğrilerin θ açısı $0-2\pi$ aralığında değişen değerler, β açısı ise 2π olmak üzere grafikleri Çizelge 2’de görülmekte, bu grafikleri çizdirmek için kullanılan MATLAB® komutları ise Ek-5’te verilmektedir.

Çizelge 2.1: Sikloid, harmonik ve çift harmonik fonksiyonlarının kinematik analizi

Eğri Türü	S	$v = dS/d\theta$	$a = d^2S/d\theta^2$	$j = d^3S/d\theta^3$
Sikloid	$\frac{h}{\pi} \left[\frac{\pi\theta}{\beta} - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right) \right]$	$\frac{h}{\beta} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right) \right]$	$\frac{2\pi h}{\beta^2} \sin\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right)$	$\frac{4\pi^2 h}{\beta^3} \cos\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right)$
Harmonik	$\frac{h}{2} \left[1 - \cos\left(\pi \frac{\theta}{\beta}\right) \right]$	$\frac{\pi h}{\beta} \sin\left(\pi \frac{\theta}{\beta}\right)$	$\frac{\pi^2 h}{\beta^2} \cos\left(\pi \frac{\theta}{\beta}\right)$	$-\frac{\pi^3 h}{\beta^3} \sin\left(\pi \frac{\theta}{\beta}\right)$
Çift Harmonik	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \cos(\pi\theta) + \frac{1}{4} \cos(2\pi\theta)$	$\frac{\pi}{2} [\sin(\pi\theta) - \sin(2\pi\theta)]$	$\pi^2 \left[\frac{1}{2} \cos(\pi\theta) - \cos(2\pi\theta) \right]$	$\pi^3 \left[2 \sin(2\pi\theta) - \frac{1}{2} \sin(\pi\theta) \right]$

Çizelge 2.2: Sikloid, harmonik ve çift harmonik fonksiyonlarının kinematik analiz grafikleri

Eğri Türü	S	$v = dS/d\theta$	$a = d^2S/d\theta^2$	$j = d^3S/d\theta^3$
Sikloid				
Harmonik				
Çift Harmonik				

2.3.2 Sayısal yaklaşım

S fonksiyonunun sürekli matematik denklemi elde yoksa ve ayrık bir veri olarak mevcutsa bu fonksiyonun kinematik analizi için sayısal yaklaşım kullanılmaktadır. Sayısal yaklaşımda kullanılan bilinen türev yaklaşımları, merkezi sonlu farklar, geri sonlu farklar ve ileri sonlu farklar olmak üzere üç farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler, isimlerinden de anlaşılabilirdiği gibi fark teriminin asıl terime göre referans alınma durumuna göre çeşitlenmektedir. Merkezi sonlu farklar ile türev alma işlemi asıl değere bir yaklaşım sağlamak ve terim sayısı artırılarak yaklaşımın doğruluğu yükseltilebilmektedir. Buna rağmen S veri setinden sayısal yöntemle hesaplanan türevli ifadelerde yaklaşma hataları bulunmaktadır (Gordon, 2012). Eşitlik 2.15 ile Eşitlik 2.20 arasında merkezi sonlu farklar yöntemi ile sırasıyla birinci mertebe bir terimli, birinci mertebe iki terimli, ikinci mertebe bir terimli, ikinci mertebe iki terimli, üçüncü mertebe bir terimli ve üçüncü mertebe iki terimli türev alma işlemleri verilmektedir.

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2h} \quad [2.15]$$

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 8f(x_{i+1}) - 8f(x_{i-1}) + f(x_{i-2}))}{12h} \quad [2.16]$$

$$f''(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - 2f(x_i) + f(x_{i-1}))}{h^2} \quad [2.17]$$

$$f''(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 16f(x_{i+1}) - 30f(x_i) + 16f(x_{i-1}) - f(x_{i-2}))}{12h^2} \quad [2.18]$$

$$f'''(x_i) = \frac{f(x_{i+2}) - 2f(x_{i+1}) + 2f(x_{i-1}) - f(x_{i-2}))}{2h^3} \quad [2.19]$$

$$f'''(x_i) = \frac{-f(x_{i+3}) + 8f(x_{i+2}) - 13f(x_{i+1}) + 13f(x_{i-1}) - 8f(x_{i-2}) + f(x_{i-3}))}{8h^3} \quad [2.20]$$

Bu eşitliklerde f , x 'e bağımlı bir fonksiyon olmak üzere, $f(x)$ bir ayrık veri seti kabul edilerek i bu veri setindeki x değerinin sıra indisi ve h ise fonksiyonun bağımlı olduğu değişkenin artım miktarı, bir başka deyişle örnekleme periyodudur. Bu tanıma göre bir S fonksiyonuna ait veri seti için x yerine θ (radyan) açısı koyulmaktadır.

2.4 CNC Taşlama ile Kam Mili Üretimi

CNC taşlama makineleri ile kam mili üretim işleminin CNC freze makineleri ile üretim işlemine göre, seri üretim, yüzey pürüzlülüğü, daha az eksen kullanımı, dolayısıyla enerji verimliliği gibi avantajları bulunmaktadır. CNC makinelerinde doğrusal ya da dairesel yapıda olmayan bir geometriyi oluşturabilmek için temel düzey CNC kontrol sistemlerinin sunduğu doğrusal ve dairesel interpolasyon desteği yanında üst düzey kontrol sistemlerinin sunduğu eğri interpolasyon fonksiyonlarının desteği de bulunmalıdır. Eğri interpolasyon komutları kontrol sistemleri içinde koşturulmak üzere daha önce taş yörüngesini NC kodlarına dönüştüren son işlemci yazılımları tarafından yazılmaktadır. Daha sonra bu kodlar kontrol sistemlerine yüklenerek koşturularak CNC taşlama makinesinde üretim gerçekleştirilmektedir. Kam mili üretimine yönelik CNC taşlama makinesi üretimi yapan Schaudt ve Junker gibi kam mili taşlamaya yönelik CNC üreticisi pazarına hakim markalar Siemens'in SINUMERIK serisi kontrol sistemlerini kullanmaktadır. Yüksek seviye eğri uydurma fonksiyonlarını Heidenhain ve Mazak gibi CNC kontrol sistemi markaları da desteklemektedir. Bu çalışmada SINUMERIK referans alınarak anlatımlar gerçekleştirilmektedir. SINUMERIK 840D, 840Di, 810D kontrol sistemi bulunduran CNC makinelerinde Polynom, Akima Spline, düzensiz rasyonel B-spline (NURBS, Non-Uniform Rational B-spline) ve Cubic Spline eğrileri için fonksiyonlar bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar sırasıyla POLY, ASPLINE, BSPLINE, CSPLINE şeklinde kullanılmaktadır (Siemens, 2002). Spline fonksiyonları iki ya da üç boyutlu bir eğrinin oluşturulmasında kullanılmaktadırlar. Bu fonksiyonlardan ASPLINE ve CSPLINE birbirine çok benzer olmakla birlikte verilen noktalardan geçen yumuşatılmış bir eğri elde etmektedirler. BSPLINE ise bir eğrinin kontrol poligonunun koordinatları bilindiği durumda o eğriyi üretmek için kullanılmaktadır ve aslında ismine rağmen NURBS eğrileri ile işlem gerçekleştirilmektedir. Sentaksı Çizelge 3'te verilen spline fonksiyonları daha çok CNC frezede üretilen kam milleri için uygundur.

Çizelge 2.3: SINUMERIK Spline fonksiyonları

Komut	Açıklama	Sentaks
ASPLINE	Akima Spline, Noktalardan geçen eğri	ASPLINE X Y Z A B C
BSPLINE	NURBS, Kontrol poligonu bilinen eğri	BSPLINE X Y Z A B C
CSPLINE	Kübik spline, Noktalardan geçen eğri	CSPLINE X Y Z A B C

Bir kam mili taşlama sisteminde taşın X doğrusal eksenindeki hareketi ve kam milinin bağlı olduğu C ekseninin dairesel hareketi ile açığa göre konumlar elde edilmektedir. Yani C eksenindeki açığa göre X eksenindeki konumlar kam profilini oluşturmaktadır. Bu sistem kam mekanizmasına benzemektedir ancak izleyici durumundaki taş konumunu kam profilinden değil X ekseninin servo motorlarından almaktadır. Dolayısıyla X eksenine bir eğri seti oluşturmak gerekmektedir. Ancak bu eğrilerin düğüm noktalarında sürekli olması gerektiğinden c-spline eğrileri ile çalışmak gerekmektedir. C-spline eğrileri kübik polinomlardan müteşekkil olduğundan, kübik polinomları son işlemci yazılımında hesaplayıp CNC kontrol sisteminde POLY fonksiyonu ile tanımlamak mümkün olmaktadır.

2.4.1 Eksene eğri atama

SINUMERIK kontrol sistemleri kullanan CNC kam taşlama makinelerinde eksenlere haricen hesaplanmış bir spline atayabilmek için POLY isimli bir polinom interpolasyon komutu sunulmaktadır. POLY ile kontrol sistemi versiyonuna göre beşinci derece polinoma kadar interpolasyon yapılabilir. Ancak bir taşa ait S eğrisinde c-spline interpolasyonu kullanıldığında en fazla üçüncü derece polinoma ihtiyaç olmaktadır. Buna göre tek eksende bir polinom oluşturmak için Eşitlik 2.21 dikkate alınmalıdır.

$$f(p) = a_0 + a_1p + a_2p^2 + a_3p^3 \quad [2.21]$$

Burada f polinom, p parametre, a_n ise polinom katsayısıdır. Bu katsayılar atanacak değerlere göre doğru, parabol, kuadratik fonksiyon gibi çeşitli eğri şekilleri elde etmek mümkün olmaktadır. a_2 ve a_3 ün yerine sıfır verildiğinde bir doğru elde edilmektedir. a_0 önceki bloktaki polinomun son değeri, a_1 ise tanım aralığının sonundaki eksen konumu ile başlangıç konumu arasındaki farktır. Bu tanıma göre POLY komutunun sentaksı Eşitlik 2.22’de verilmektedir.

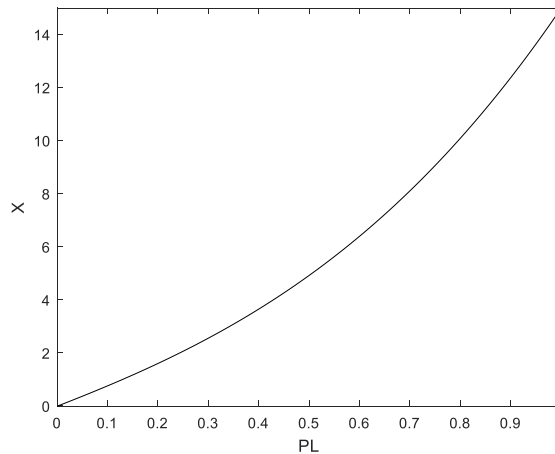
$$\text{POLY PO}[X] = (x_e, a_2, a_3) \quad \text{PL}=n \quad [2.22]$$

Burada POLY ifadesi komutun başlatılması için kullanılmaktadır. Polinomlardan oluşan eğrinin saklandığı tabelayı tanımlamak için CTABDEF (Curve Table Define) komutu POLY komutundan önce kullanılmaktadır. PO[] polinom satırını tanımlamaktadır. X polinomun atanacağı eksenini tanımlamaktadır. x_e bir önceki satırda tanımlanan polinomun son değerini belirtmektedir ve geçerli satırdaki polinomun a_0 katsayısına eşittir. a_2 ve a_3 polinomun diğer katsayılarıdır. Polinomun a_1 katsayısını kontrol sistemi kendisi hesaplamaktadır ve tanımlamaya ihtiyaç duyulmamakla birlikte, hesaplama yöntemi Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.24 ile anlatılmaktadır.

$$x_e = a_0 + a_1 PL + a_2 PL^2 + a_3 PL^3 \quad [2.23]$$

$$a_1 = \frac{x_e - a_0 - a_2 PL^2 - a_3 PL^3}{PL} \quad [2.24]$$

PL değişkeni ise polinomun tanım aralığının uzunluğunu belirtmektedir ve varsayılan değeri 1'dir. Her polinom satırında polinom aralığı tanımlama zorluğunun kaldırılması adına ilk başta bir defa tanımlama yapılmaktadır. Bu durumda bir boyutlu c-spline eğrisinin parça kübik polinomları sürekli aynı aralıkta tanımlanmaktadır. Dolayısıyla polinomların değer aralığı X ekseninin konumlarından oluşmakta, tanım aralığı ise 0 – PL arasında oluşmaktadır. CNC kontrol sistemindeki bu karmaşanın çözülmesi için daha önceden S eğrisine uydurulan c-spline parça polinomlarının tanım eksenini üzerinde düğüm noktaları aralığından tanım aralığına taşınması gerekmektedir. Taşınmış bir polinom parçası Şekil 2.15'te görülmektedir.



Şekil 2.15: PL ekseninde kübik bir polinom

Polinom taşıma, polinomun katsayılarının değişmesi anlamına gelmektedir. O halde Eşitlik 2.11’de verilen lineer denklemden hareketle polinom eşitliğinden çift taraflı bir lineer denklem sistemi oluşturularak çözüme ulaşılabilmektedir. İlgili çözüm Eşitlik 2.25’te verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} p_3^3 & p_3^2 & p_3 & 1 \\ p_2^3 & p_2^2 & p_2 & 1 \\ p_1^3 & p_1^2 & p_1 & 1 \\ p_0^3 & p_0^2 & p_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_3^3 & q_3^2 & q_3 & 1 \\ q_2^3 & q_2^2 & q_2 & 1 \\ q_1^3 & q_1^2 & q_1 & 1 \\ q_0^3 & q_0^2 & q_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_3 \\ b_2 \\ b_1 \\ b_0 \end{bmatrix} \quad [2.25]$$

Burada a_n taşınmış polinomun katsayıları, b_n ise ilgili polinomun katsayılarıdır. p_n , PL eksenindeki değerler ve q_n ilgili polinomun başlangıç ve bitiş düğümleri arasındaki değerler olmak üzere PL=1 alındığında $p_0=0$, $p_3=1$ olmaktadır. p_1 ve p_2 sabit aralıklarla seçildiğinde sırasıyla Eşitlik 2.26 ve Eşitlik 2.27’de hesaplanmaktadır.

$$p_1 = p_0 + \frac{p_3 - p_0}{3} \quad [2.26]$$

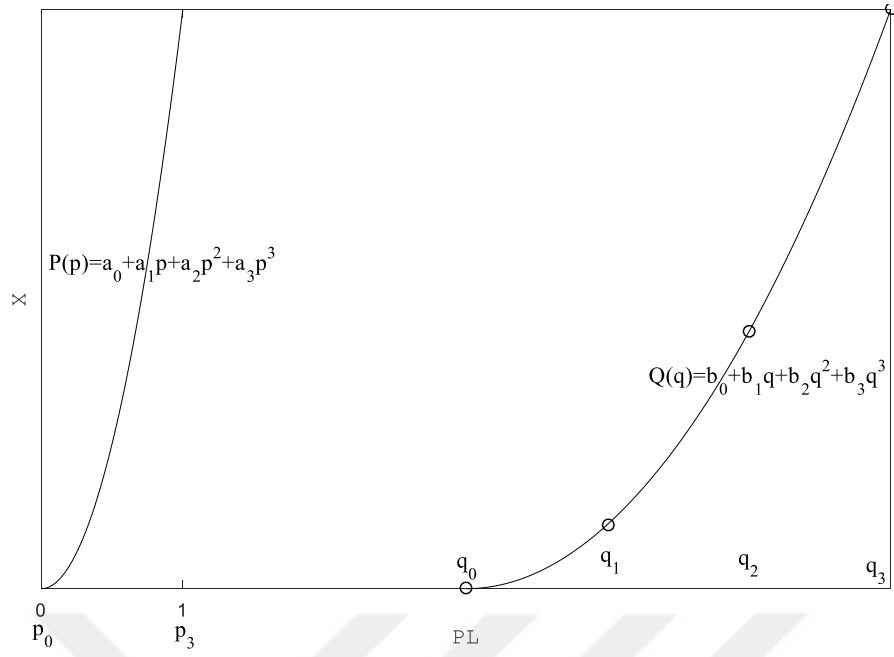
$$p_2 = p_0 + \frac{2(p_3 - p_0)}{3} \quad [2.27]$$

q_0 ilgili polinomun başlangıç düğümü, q_3 bitiş düğümü olmakta q_1 ve q_2 ise Eşitlik 2.28 ve Eşitlik 2.29 ile hesaplanmaktadır.

$$q_1 = q_0 + \frac{q_3 - q_0}{3} \quad [2.28]$$

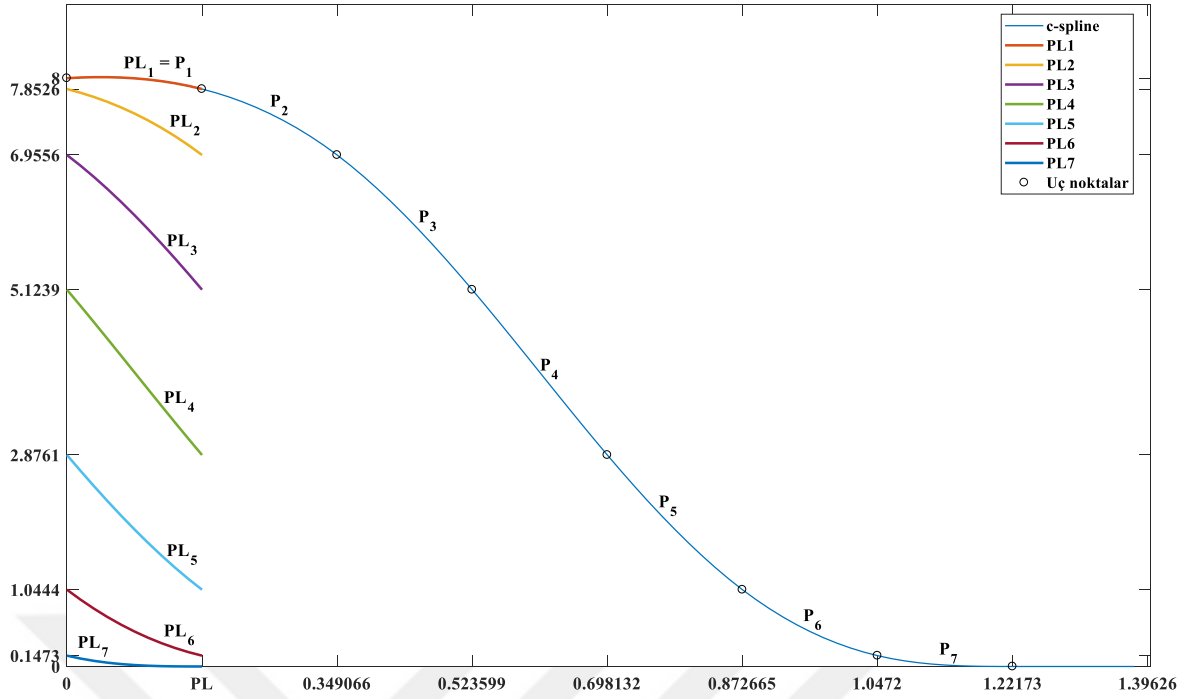
$$q_2 = q_0 + \frac{2(q_3 - q_0)}{3} \quad [2.29]$$

Şekil 2.16’da taşınmadan önce ve taşındıktan sonra elde edilen polinom eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.16: Kübik polinom taşıma

Eşitlik 25'teki denklem $[p_n][a_n]=[Q]$ şeklinde bir lineer denklem olarak ele alındığında çözümü $[a_n]=[p_n]^{-1}[Q]$ şeklindedir. İlgili polinom taşıma işlemini yapmak üzere yazılan MATLAB® fonksiyonu ve örnek uygulama kodu Ek-6'da verilmektedir. PL aralığındaki polinomu başka bir aralığa taşıma işlemi yapmak içinse Eşitlik 2.25'teki denklem $[P]=[q_n][b_n]$ şeklinde lineer denklem olarak ele alınarak çözümü $[b_n]=[q_n]^{-1}[P]$ şeklinde elde edilmektedir. Bir c-spline eğrisinin parçalı polinomlarının $PL=0.174533$ tanım aralığında görünümü Şekil 2.17'de verilmektedir. Bu eğri Şekil 2.11'de kullanılan c-spline eğrisidir. Şekil 2.17'nin oluşturulması için kullanılan MATLAB® komut bütünü Ek-7'de verilmektedir.



Şekil 2.17: C-spline eğrisine ait alt polinomların PL ekseninde görünümü

2.4.2 İçbükey kamlarda maksimum taş çapı ve hesabı

Bir eğrinin ya da kapalı bir eğri olan kam profilinin eğrilik yarıçapı ile eğriligi birbirinin çarpıma göre tersidir. Bir eğriye ait eğrilik ifadesi Eşitlik 2.30’da verilmektedir.

$$\rho = \frac{(x'^2 + y'^2)^{3/2}}{x' y'' - y' x''} \quad [2.30]$$

Buradaki türevli ifadeler koordinat değerlerinin bir t parametresine göre türevi alınan ifadeler olmaktadır. Türev parametresi olan t parametrik eğrilerin tanımlamasında kullanılmaktadır. Kam profilinde parametre olarak iki nokta arası uzaklık, iki nokta arasındaki açı gibi değişkenler t parametresi olarak alınabilmektedir. Küçük çaplı taşlarla hem üretim hızı düşmekte hem de düşük çevresel hızda işleme sebebiyle kalite düşmekte olduğundan kam millerinin olası en büyük taşla işlenmesi tercih edilmektedir. Uydurulan konkav profilli bir kamı işleyecek CNC taşın maksimum yarıçapının belirlenebilmesi için ise eğrilik yarıçapı hesabı yapılmaktadır.

2.5 Üretimde Simülasyon Kavramı

Kam profilinin hesabı, kam profilinden S yörüngesinin hesabı, izleyici dönüşümü gibi konular kam mili tasarımında önemli olduğu kadar CNC kam taşlama makinesinin operatörler tarafından doğru kullanımı da hatasız kam mili üretimi için önemlidir. İş

ölçme, iş bağlama, ürün ölçme gibi işlemler operatör tarafından yapıldığından CNC makinesinin çalışma mantığına uygun hasarsız görselleştirme ile operatörlere eğitim verilebilecek bir platformun gereksinimi kam mili üretim sektörü açısından hayati önem taşımaktadır. Yüksek verimliliğe sahip bir üretim tesisinin vazgeçilmez bileşenlerinden olan operatörler ancak iyi ve doğru eğitildiğinde doğru ve hızlı üretim yaparak tesis verimliliğine katkıda bulunabilmektedirler. Bu bağlamda operatörlerin, malzeme sarfiyatı olmadan eğitime tabi tutulabileceği bir eğitim aracı olarak kam taşıma simülasyon yazılımı geliştirilmiştir. Yazılım MATLAB® ortamında App Designer arayüz tasarım aracı kullanılarak nesne tabanlı kodlarla yazılmakta ve simülasyon görselleri elde edilmektedir. Simülasyon yazılımı aşağıdaki parametreleri hesaplayabilecek ve simüle edecek kabiliyete sahiptir.

İş bağlama açısı: Operatörün kam milini C eksenine bağlama açısını ifade eder.

Pin deliği: C eksenini ile mil ekseninin arasındaki açıyı belirlemek ve sabitlemek için kullanılan bir delik olup yanlış tespit edildiğinde profilde açısal sapmalara neden olur.

Paso adımları: Her bir turda kam mili üzerindeki kaba profilden talaş kaldırmayı temsil eder. Son paso ile nihai profil değerlerine ulaşılmış olur.

Paso adımlarının hızları: İlk pasolarda pürüzlülük önemli olmadığı için C eksenini daha yüksek hızlarda dönerek kam profili işlenir. Son pasolarda ise ürünün nihai yüzeyinin pürüzsüz olması için kesme hızının dolayısıyla C eksenini hızının yavaş olması gerekmektedir. Bu değişken hızlar paso adımlarının hızlarında girdi olarak alınır.

Pasoya dalma açısı: Taş profile ilk yanaştığında ve paso başlangıçlarında paso miktarınca birden daldığında taşta kırılma oluşabilir ya da dalmanın az olduğu bölgelerde yüzey pürüzlülüğü oluşabilir. Bu durumu engellemek için taş paso kalınlığına yavaşça dalarak yaklaşık 40 derecelik açılarda kalınlığa ulaşır. Bu durum da simülasyonda gerçekleştirilmiştir.

Profil sapması hataları: Pim deliği yanlış açıda bağlandığında taş profilin tüm bölgelerinden istenen oranlarda talaş kaldıramaz. Bu durum bazı bölgelerde fazla dalmaya bazı bölgelerde ise eksik ya da sıfır dalmaya neden olur. Bu hata da simüle edilerek iş başında ulaşılabilecek hatalı sonuçlar görselleştirilmiştir.

3. BULGULAR

3.1 Profil Hesabında Grafik Yaklaşımın Analizi ve Uygulaması

Bu başlık altında Bölüm 2.1.2’de anlatılmakta olan kam profilinin koordinatlarının bulunma yöntemlerinden olan grafik yaklaşımın analizi yapılarak yeni bir yöntem ortaya koyulmaktadır. Bu yöntemin amacı ve üstünlükleri CAD yazılımlarını kullanmadan ve eğrilik, basınç açısı, hız gibi türev hesabı gerektiren parametrelere gerek duymadan kam profiline ulaşabilmektir. Grafik yaklaşımın analizi, kam mili üreticileriyle paylaşılan kam mekanizmasına ait kısıtlı S verisinden yüksek doğrulukta kam profili koordinatlarına ulaşabilmek ve analitik yaklaşıma göre üstünlükler ortaya koymak gibi kolaylıklar sunmaktadır. Bu bağlamda grafik yaklaşımın analizi yapılmakta, koordinatları elde etmek için denklemler elde edilmekte ve denklemleri uygulayabilecek algoritma ile komut bütünü ortaya koyulmaktadır. Bu başlık altındaki çalışmalar ayrıca bir makale olarak da sunulmaktadır (Közkurt, Ertaş, & Yücel, 2017).

Şekil 2.6’da ve Şekil 2.8’de doğrular, noktalar, daireler, uzaklıklar ve kesişimler şeklinde verilen geometrik unsurların analitik geometri kapsamında denklemleri yazılabilmektedir. O halde kam profilinin koordinatları analitik bir yaklaşımla elde edilebilmesi de mümkün olmaktadır. Şekil 2.6’da ve Şekil 2.8’de yuvarlak ve düz izleyicinin ilk ve azami konumları olan S_0 konumlarında profile teğet oldukları noktadan merkeze çizilen $|AO|$ doğrusunun uzunluğuna eşit yarıçaptaki daire, dış daire olarak adlandırılmaktadır. Bu daire üzerinde örnekleme açısı aralığındaki yayların uç noktaları da genel kümeyi oluşturmaktadır. İzleyici konumu $S-\theta$ verisine göre sırayla değiştirilirken her değişimde genel küme de değişim açısı kadar döndürülmektedir. Bu açıdan literatürün aksine izleyicinin sabit olduğu kamın döndüğü işlem kam mekanizmasındaki hareket ile aynı şekilde gerçekleşmektedir. Genel kümenin noktalarıyla orijin arasında kalan doğrular üretimle karşılaştırıldığında kam milinin kütüğünü temsil etmektedir. Bu doğruların sırayla budanması ile kam profili aşamalı olarak oluşturulmaktadır. İlgili açıdaki genel kümeye ait doğrular ile izleyicinin kesiştiği noktalar budanarak, genel küme, kesişmeyen doğruların uç noktalarıyla birlikte güncellenmektedir. 360 derecelik dönme işlemi birim dönmelerle tamamlandığında her açıda oluşan kesişim noktaları bulunmakta ve nihayetinde bu noktalar kam profilinin

koordinatlarını oluşturmaktadır. Dönme işlemi için Eşitlik 3.1’de verilen matris kullanılmaktadır (Golstein et al. 2002). Kamın dönme merkezi orijin olarak, izleyicinin doğrusal hareket eksenini ise Y eksenini olarak alınmaktadır.

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad [3.1]$$

3.1.1 Düz izleyicili kam profili için grafik yaklaşımın analizi

L_1 düz izleyicinin kama teğet olan doğru parçasını, L_2 ise, Şekil 2.6 ve Şekil 2.8’de $|AO|$ ile belirtildiği gibi bir doğru parçası olmak üzere L_1 ve L_2 nin sınır şartları ile matris gösterimi Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 ile gösterilmektedir. Bu durumda (X,Y) koordinatı, L_1 ile L_2 nin kesişim noktası olmak üzere Eşitlik 3.4 ile hesaplanmaktadır (Goldman, 1990).

$$L_1 = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{11} \\ x_{12} & y_{12} \end{bmatrix} \quad [3.2]$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} \\ x_{22} & y_{22} \end{bmatrix} \quad [3.3]$$

$$X = \frac{\begin{vmatrix} |L_1| & \begin{vmatrix} x_{11} & 1 \\ x_{12} & 1 \end{vmatrix} \\ |L_2| & \begin{vmatrix} x_{21} & 1 \\ x_{22} & 1 \end{vmatrix} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{11} & 1 \\ x_{12} & 1 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{11} & 1 \\ y_{12} & 1 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} x_{21} & 1 \\ x_{22} & 1 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{21} & 1 \\ y_{22} & 1 \end{vmatrix} \end{vmatrix}} \quad [3.4]$$

$$Y = \frac{\begin{vmatrix} |L_1| & \begin{vmatrix} y_{11} & 1 \\ y_{12} & 1 \end{vmatrix} \\ |L_2| & \begin{vmatrix} y_{21} & 1 \\ y_{22} & 1 \end{vmatrix} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{11} & 1 \\ x_{12} & 1 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{11} & 1 \\ y_{12} & 1 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} x_{21} & 1 \\ x_{22} & 1 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{21} & 1 \\ y_{22} & 1 \end{vmatrix} \end{vmatrix}} \quad [3.5]$$

Sınır şartları temel seviye eşitliklere göre göz önünde bulundurulduğundan tanımsız ve sonsuz değerli sonuçlar önlenmelidir (Thomas & Finney , 1998). L_1 doğrusu x eksenine paralel olduğundan y_{11} ve y_{12} birbirine eşittir ve x_{11} ile x_{12} sabittir. L_2 doğrusunun bir ucu orijin olduğundan x_{21} ve y_{21} sifıra eşittir. Bu şartlar altında sadeleştirmeler yapıldıktan sonra kesişim noktasının koordinat bileşenleri sırasıyla Eşitlik 3.6'da ve Eşitlik 3.7'de görüldüğü gibi elde edilmektedir.

$$X = y_{11} \frac{x_{22}}{y_{22}} \quad (y_{22} \neq 0) \quad [3.6]$$

$$Y = y_{11} \quad [3.7]$$

Kam mekanizmasının doğası sonsuz değerle sonuçlanacak olası durumları engellemektedir. y_{22} 'nin sifıra eşit olduğu sonsuz değer durumunu genel kümenin x ekseninde olması oluşturmaktadır. İzleyici x eksenine inmeyeceğinden sonsuz durum aslında oluşmamaktadır. Ancak bu hatalı durumun hesaplanmasını önlemek için sayısal olarak bir sınır şartı oluşturulabilir. Sınır şartı olarak genel kümeye ait kesişimi hesaplanacak noktaların izleyicinin Y değerinden büyük olması sağlanmalıdır. Böylelikle prosedür sadece ilgili doğrular için çalışacaktır. Sonuç olarak düz izleyici için genel denklem Eşitlik 3.8'deki gibi olmaktadır.

$$(X_i, Y_i) = \left(y_{i1} \frac{x_{k2}}{y_{k2}}, y_{i1} \right), (y_{k2} \neq 0) \quad [3.8]$$

i indisi izleyici doğrularını ve iterasyonları göstermektedir. k indisi ise genel kümenin doğrularını göstermektedir. Her budama işleminden sonra dönme işlemi Eşitlik 3.9'daki gibi uygulanmaktadır. Böylece sistem bir sonraki budama işlemi için hazırlanmaktadır.

$$(X_{i+1}, Y_{i+1}) = R \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} \quad [3.9]$$

3.1.2 Yuvarlak izleyicili kam profili için grafik yaklaşımın analizi

Düz izleyicili kam profilinde yapılan analizden farklı olarak yuvarlak izleyicide doğruların kesişimi yerine doğru ile dairenin kesişim noktası ve iki nokta arasındaki mesafenin hesaplanması gerekmektedir. Genel kümedeki herhangi bir nokta yuvarlak izleyicinin merkezinden izleyicinin yarıçapı kadar ya da daha az uzaklıkta ise yuvarlak izleyicinin profile yani genel kümeye temas ettiği ya da daldığı kabul edilmektedir. Bu aşamada yuvarlak izleyici dairesi ile izleyici dairesine giren çizgilerin kesişim noktaları hesaplanmaktadır. Genel kümedeki herhangi bir doğru, örneğin |OT| doğrusu, L_3 olarak kabul edilirse, L_3 'ün özel durumumuza göre nihai hali alışı Eşitlik 3.10 ile Eşitlik 3.13 arasında gösterilmektedir.

$$L_3 = \begin{bmatrix} x_{31} & y_{31} \\ x_{32} & y_{32} \end{bmatrix} \quad [3.10]$$

$$(x_{31}, y_{31}) = (0,0) \quad [3.11]$$

$$L_3: Y = \frac{y_{32}}{x_{32}} X, (x_{32}) \neq 0 \quad [3.12]$$

$$L_3: X = \frac{x_{32}}{y_{32}} Y, (y_{32}) \neq 0 \quad [3.13]$$

İzleyici y ekseninde olduğu için daire Eşitlik 3.14'te olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$X^2 + (Y - y_4)^2 = r^2, (r > 0) \quad [3.14]$$

Eşitlik 3.12, 3.13, ve 3.14'ten Eşitlik 3.15 ve 3.16'da görüldüğü gibi ikinci derece denklemler elde edilmektedir.

$$X^2 + \left(\frac{y_{32}}{x_{32}} X - y_4 \right)^2 = r^2 \quad [3.15]$$

$$\left(\frac{x_{32}}{y_{32}} Y \right)^2 + (Y - y_4)^2 = r^2 \quad [3.16]$$

Bu denklemlerin çözüm kümesi ile Eşitlik 3.17 ve 3.18'de görülmekte olan kesişim koordinatları elde edilmektedir.

$$X_{1,2} = \frac{y_4 \frac{y_{32}}{x_{32}} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{y_{32}}{x_{32}} \right)^2 + 1 \right) r^2 - y_4^2}}{\left(\frac{y_{32}}{x_{32}} \right)^2 + 1} \quad [3.17]$$

$$Y_{1,2} = \frac{y_4 \pm \sqrt{y_4^2 - \left(\left(\frac{x_{32}}{y_{32}} \right)^2 + 1 \right) (y_4^2 - r^2)}}{\left(\frac{x_{32}}{y_{32}} \right)^2 + 1} \quad [3.18]$$

x_{32} veya y_{32} 'nin sıfıra eşit olması durumunda sonsuz değerli terimler elde edilse de kam mekanizmasının doğası bu terimlerin oluşumunu önlemektedir. y_{32} 'nin sıfıra eşit olma durumu genel küme doğrularının x ekseninde olması halinde oluşmaktadır. Yuvarlak izleyici hiçbir zaman x eksenine ulaşmadığı için bu durum gerçekleşmemektedir. Ancak

yine de numerik süreç hatasını önlemek için bir sınır şartı olmalıdır. Kesişim hesabında gerekli olan bu sınır şartı da, uçları yuvarlak izleyicinin içinde kalan doğruları işlemek olmaktadır. x_{k2} 'nin sıfıra eşit olma durumu genel küme doğrularının y ekseninde olması halinde oluşmaktadır. Doğrular ile yuvarlak izleyicinin kesişim noktası iki noktada oluşmaktadır. Bu problemi çözmek için X'in maksimum Y'nin ise minimum değerleri alınmaktadır. Böylelikle genel ifade Eşitlik 3.19'da olduğu gibi ortaya çıkar.

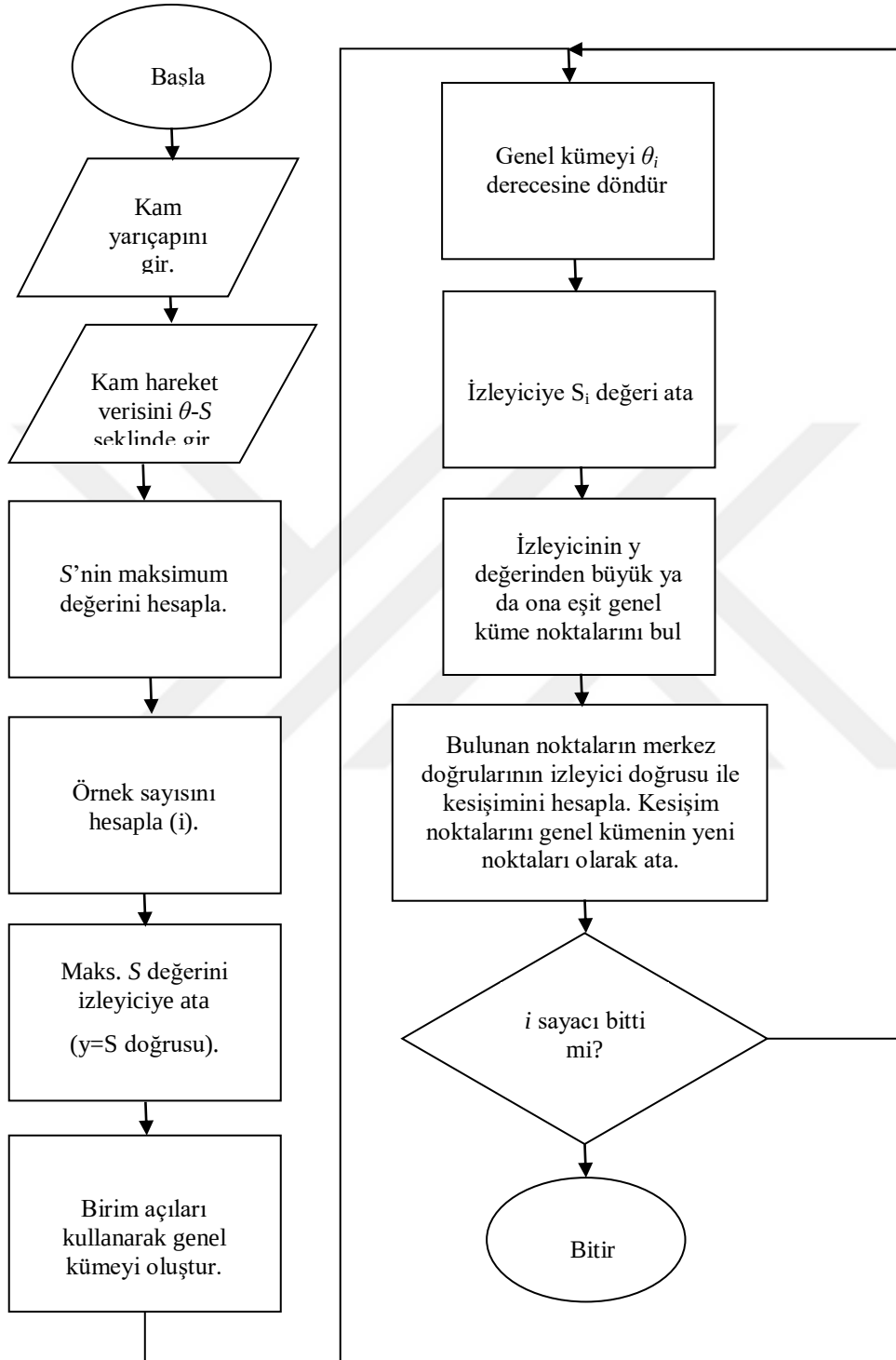
$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{y_i \frac{y_{k2}}{x_{k2}} + \sqrt{\left(\left(\frac{y_{k2}}{x_{k2}}\right)^2 + 1\right)r^2 - y_i^2}}{\left(\frac{y_{k2}}{x_{k2}}\right)^2 + 1}} \\ \frac{y_i - \sqrt{y_i^2 - \left(\left(\frac{x_{k2}}{y_{k2}}\right)^2 + 1\right)(y_i^2 - r^2)}}{\left(\frac{x_{k2}}{y_{k2}}\right)^2 + 1} \end{pmatrix} \quad [3.19]$$

i indisli terimler ilgili iterasyondaki izleyici dairesinin merkezini ifade etmektedir. k indisli terimler ise düz izleyici analizinde olduğu gibi genel küme doğrularını ifade etmektedir. Dönme işlemi her birim açındaki budama döngüsünden sonra Eşitlik 3.9'da verildiği gibi yapılmaktadır.

3.1.3. Grafik yaklaşım analizinin algoritmaları

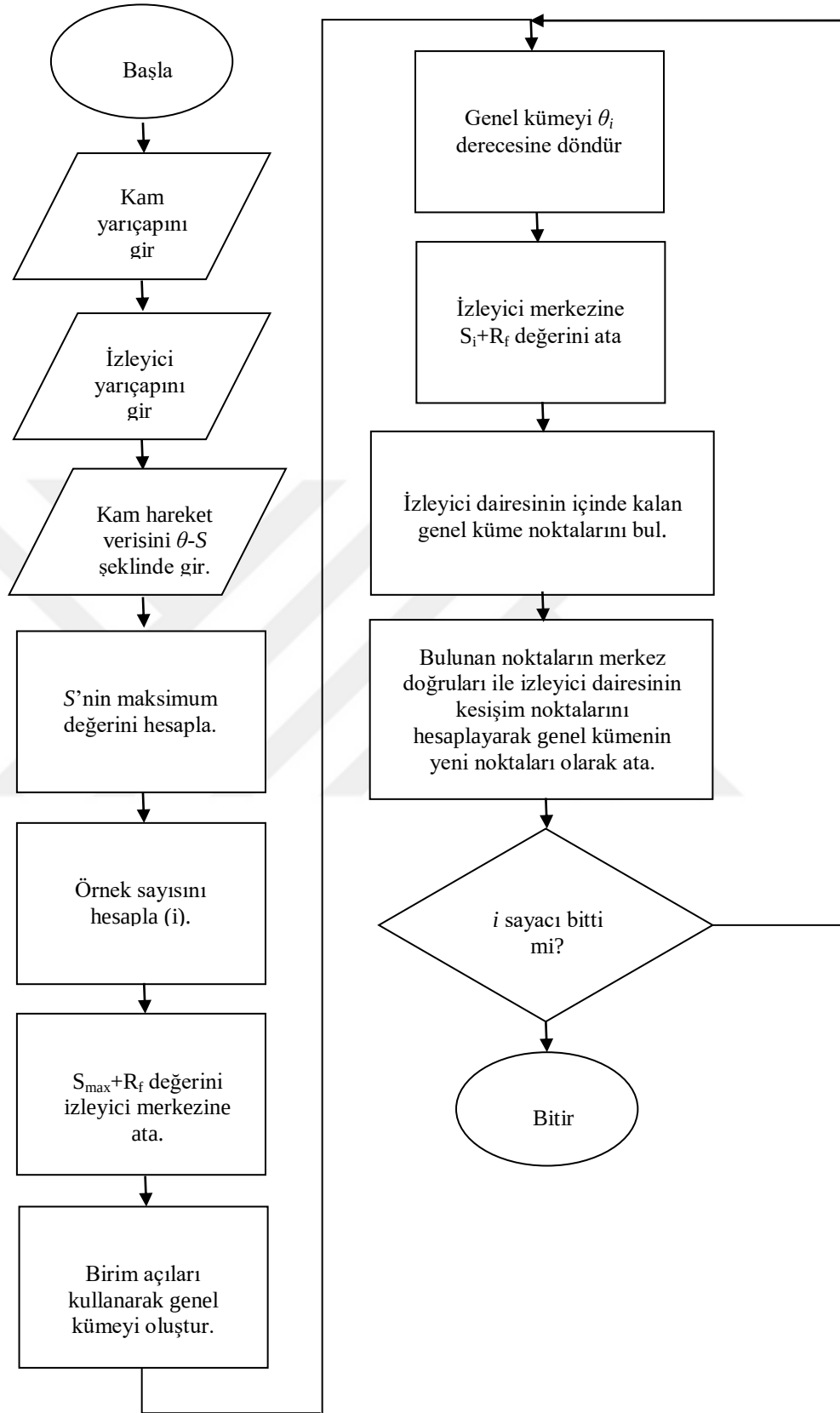
Elde edilen düz izleyicili ve yuvarlak izleyicili mekanizmalara ait denklemlerin koda dökülmesindeki karmaşayı ortadan kaldırmak amacıyla algoritmalar da sırasıyla Şekil

3.1 ve Şekil 3.2’de verilmekt edir.



Şekil 3.1: Düz izleyicili kam mekaizması için grafik yaklaşım algoritması





Şekil 3.2: Yuvarlak izleyicili kam mekaizması için grafik yaklaşım algoritması

3.1.4. Doğrulama ve sonuçların karşılaştırılması

Geliştirilen yeni ve basit grafik yaklaşım ile geleneksel analitik yaklaşımlar (Chen F. Y., 1982; Norton, 2002; Rothbart, 2004; Söylemez, 2008) MATLAB® ortamında kodlanarak lineer enterpolasyon yöntemi kullanan *plot* çizdirme fonksiyonu yoluyla karşılaştırılmaktadır. İki yaklaşım arasındaki farkları görebilmek için grafiklerin yakınlaştırılmış halleri de verilmektedir. Veri noktalarındaki farkları gösteren grafikler çubuk grafikler şeklinde verilmektedir. Bu değerler sayısal olarak sabit dairesel hızda yüzey hızlarını göstermektedir. Kam profilindeki yüzey hızlarının analizi özgün bir yöntem olarak ortaya konulmaktadır. Geliştirilen yöntem sonuçları ayrıca grafik yaklaşım temelli işlem yapan CAD sistem sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Aradaki farklar maks. $7 \cdot 10^{-5}$ mm büyüklükte çıkmaktadır. Bu hata da CAD sistemde elde edilen sonuçların çözünürlüğünün daha düşük olmasından kaynaklanmakta dolayısıyla geliştirilen yöntem ile CAD sistem arasındaki mutlak hatanın sıfır olduğu kabul edilmektedir. Bu karşılaştırma ESTAS ürün portföyünde bulunan çok çeşitli kam profillerine de uygulanmış ve verilerin onbinde bir düzeyinde hata ile örtüştüğü görülmüştür.

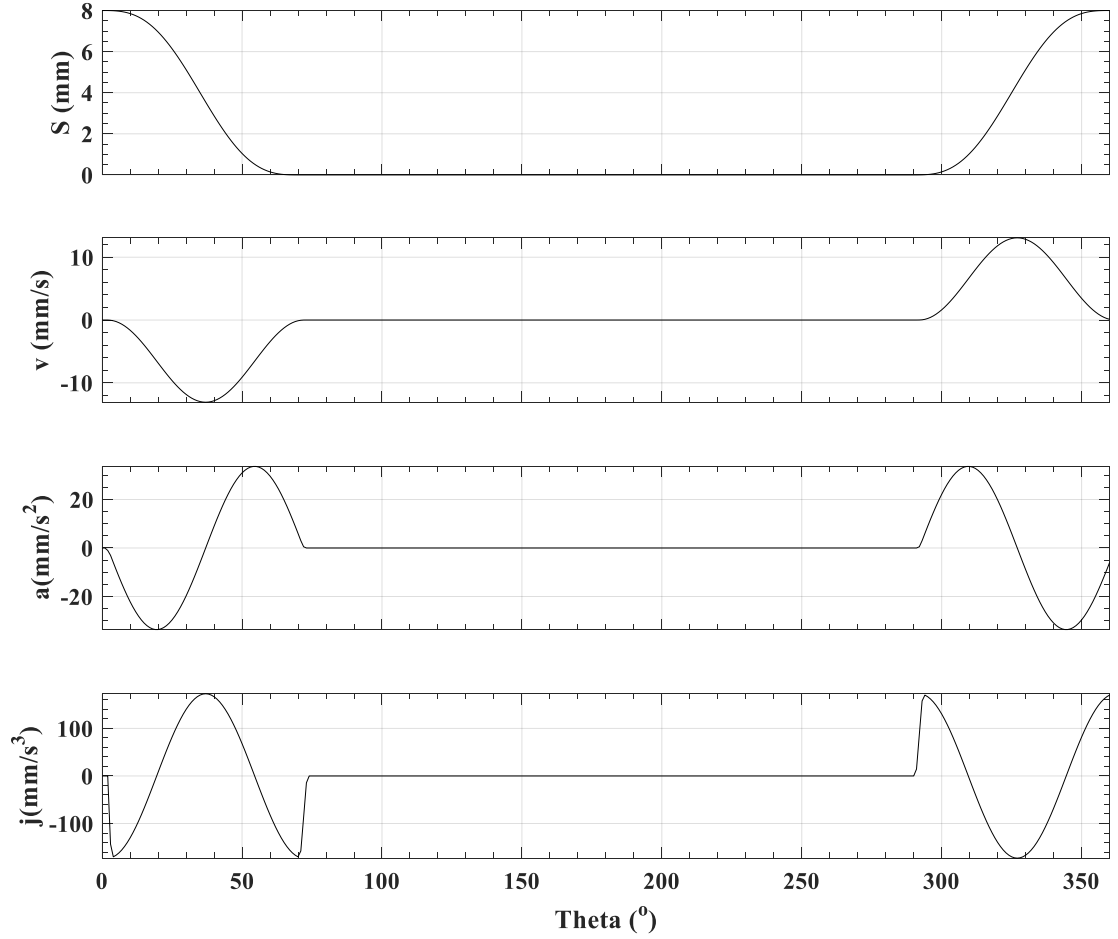
Kam profilini elde etmek üzere Çizelge 4'te belirlenen senaryoya uygun hareket verisini elde etmek için sikloid fonksiyonu kullanılmaktadır. Hareketin veri kümesi Çizelge 5'te, kinematik eğri grafikleri ise Şekil 3.3'de verilmektedir. Eşitlik 3.20 kullanılarak hareket verisi hesaplanmaktadır.

$$S = \frac{H}{\pi} \left[\frac{\pi\theta}{\beta} - \frac{1}{2} \sin \left(\frac{2\pi\theta}{\beta} \right) \right] \quad [3.20]$$

Burada S hareket, H hareketin maks. değeri, θ anlık açı, β ise maks. θ ile min. θ arasındaki farkı göstermektedir.

Çizelge 3.1: Hareket (S) senaryosu bilgileri

İzleyici Tipi -R	$\theta=0^\circ-70^\circ$	$\theta=71^\circ-289^\circ$	$\theta=290^\circ-360^\circ$	Temel Dairesi Yarıçapı
Düz İzleyici - 0	8 0 mm	dwell	0 8 mm	27 mm
Yuvarlak İzleyici - 12 mm	8 0 mm	dwell	0 8 mm	27 mm

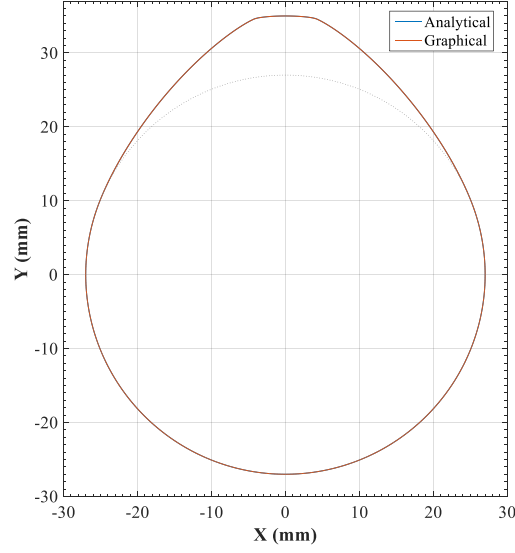


Şekil 3.3: Kullanılan hareket verisinin kinematik grafiği

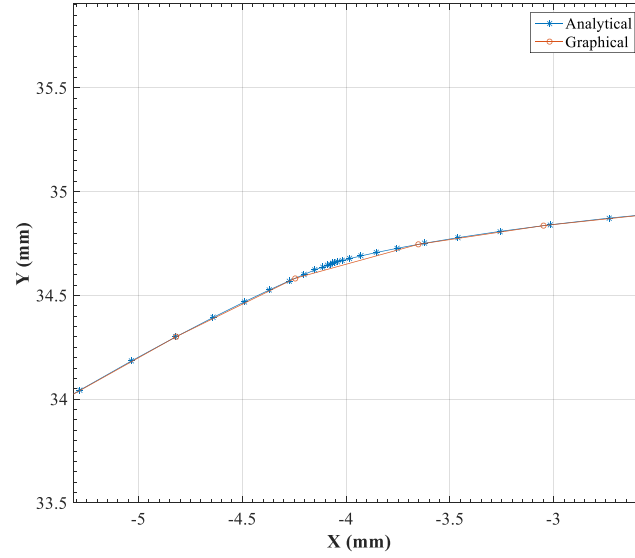
3.1.5 Düz izleyicili kam profili sonuçları

Düz izleyicide S verisini elde etmek için kam mekanizması senaryosu 0° açıda 8 mm yükseklikten başlayarak 70° açıda 0 mm yüksekliğe kadar kapanmak üzere düşen, 71° ve 290° arasında sabit duran, 291° ve 360° arasında 0 mm'den 8 mm'ye açılmak üzere yükselen bir hareket şeklinde uygulanmaktadır. Kam temel dairesinin yarıçapı 27 mm dir. Bu senaryo, geliştirilen grafik yaklaşım ve geleneksel analitik yaklaşım üzerinde uygulanarak Şekil 3.4'de verildiği gibi karşılaştırılmaktadır. İlk bakışta veriler örtüşmüş gibi görünse de Şekil 3.5'de verilen yakınlaştırılmış görüntüde geleneksel yaklaşımla elde edilen verilerin daha sık olduğu açıktır. Şekil 3.6'teki gibi temel daire ile profilin birleştiği bölgeye yakınlaştırarak bakıldığında geleneksel analitik yaklaşımda daha değişken örnekleme aralıklarının olduğu farkedilmektedir. Temel daire üzerindeki örnekleme frekansları her iki veri için de eşit olduğu görülmektedir. Geliştirilen grafik yaklaşım ile geleneksel yaklaşıma göre daha az değişimli veri aralıklarında profil elde edildiği görülmektedir. Bu da profil yüzeyinin sabit hızda daha kararlı hıza sahip

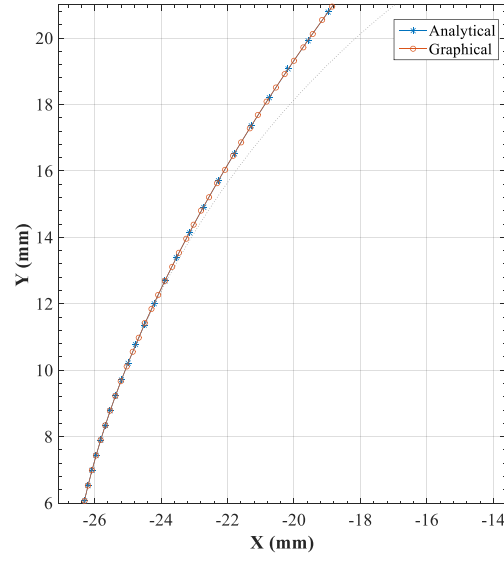
olduğunu göstermektedir. İki yaklaşımın verilerindeki değişimi gösteren grafikler Şekil 3.7’de verilmektedir. Sabit aralıklı veri değişimleri temel daire üzerinde oluşmaktadır.



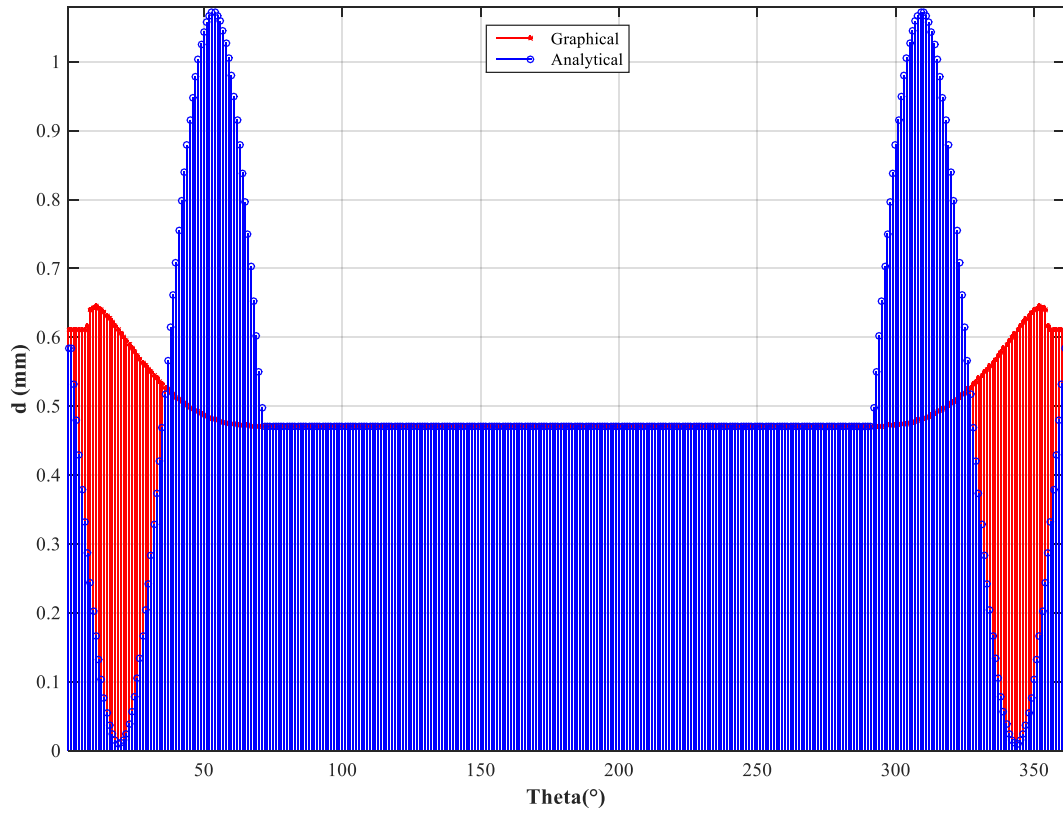
Şekil 3.4: Analitik ve grafik yaklaşımın örtüşmesi (Düz izleyicili kam profili)



Şekil 3.5: Örtüşmenin sol üst bölgesinin yakın görünümü (Düz izleyicili kam profili)



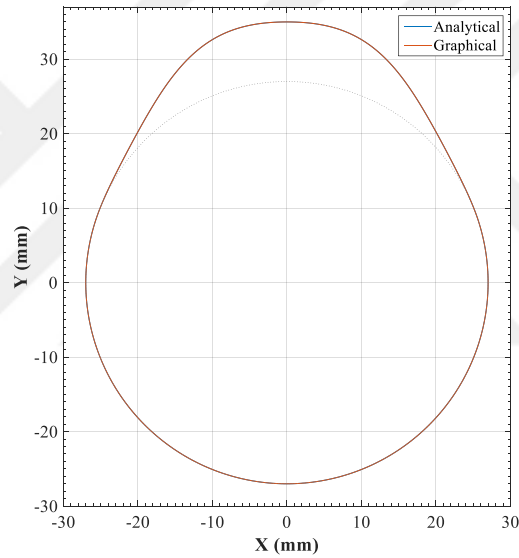
Şekil 3.6: Örtüşmenin sol orta bölgesinin yakın görünümü (Düz izleyicili kam profili)



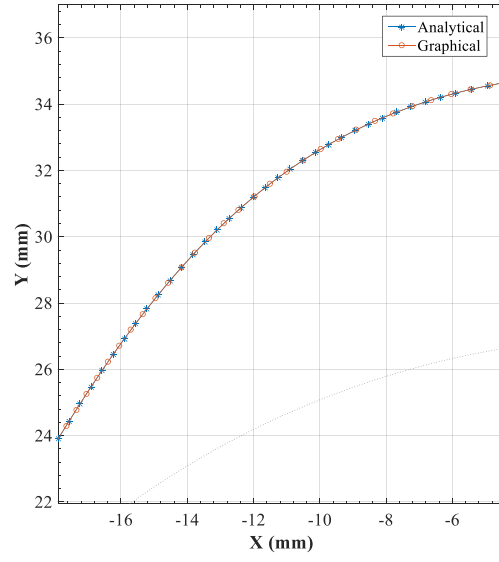
Şekil 3.7: Analitik ve grafik yaklaşımda veri noktaları farkının karşılatırılması (Düz izleyicili kam profili)

3.1.7 Yuvarlak izleyicili kam profili sonuçları

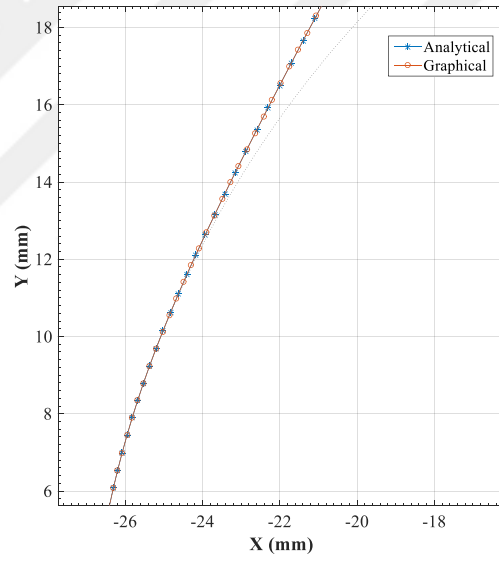
Yuvarlak izleyicili mekanizmada da düz izleyicide kullanılan senaryo kullanılmaktadır. Temel daire yarıçapı 27 mm, yuvarlak izleyici yarıçapı ise 12 mm dir. Senaryo, geliştirilen grafik yaklaşım ve geleneksel analitik yaklaşım üzerinde uygulanarak Şekil 3.8’te verildiği gibi karşılaştırılmaktadır. Yakınlaştırılmış görüntüler Şekil 3.9’da ve Şekil 3.10’da verilmektedir. Temel daire üzerindeki örnekleme frekansları her iki veri için de eşit olduğu görülmektedir. Düz izleyicili sonuçlarının karşılaştırmasında olduğu kadar olmasa da geliştirilen grafik yaklaşım ile geleneksel yaklaşıma göre daha az değişimli veri aralıklarında profil elde edildiği görülmektedir. Bu da profil yüzeyinin sabit hızda daha kararlı hıza sahip olduğunu göstermektedir. İki yaklaşımın verilerindeki değişimi gösteren grafikler Şekil 3.11’de verilmektedir.



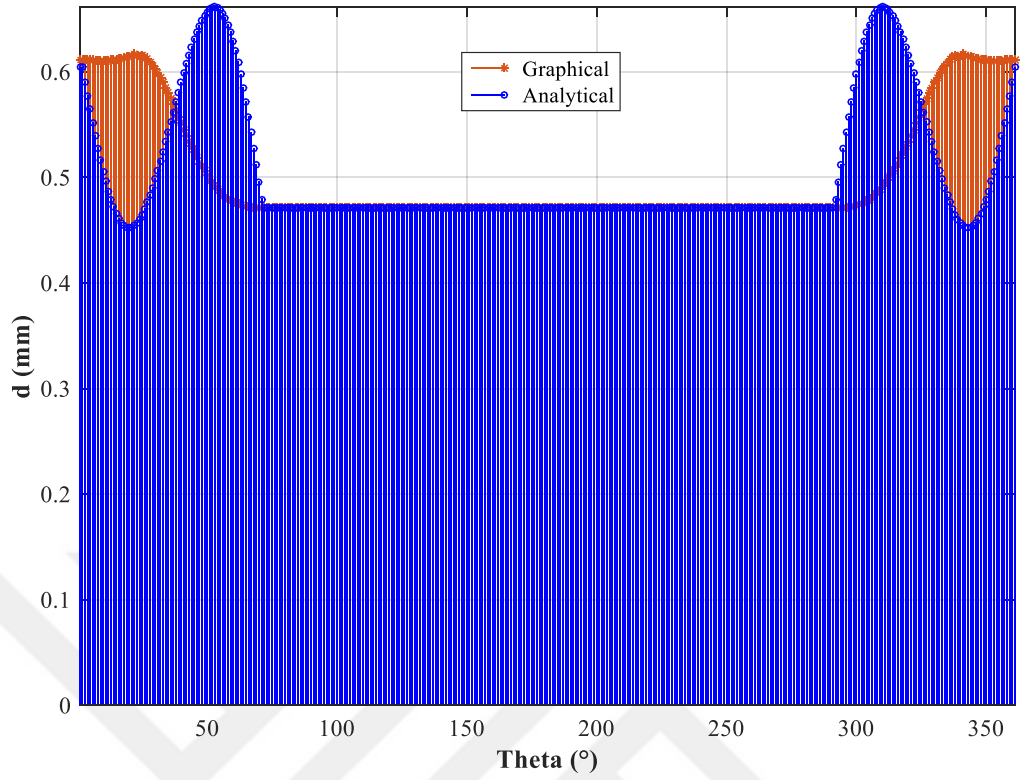
Şekil 3.8: Analitik ve grafik yaklaşımın örtüşmesi (Yuvarlak izleyicili kam profili)



Şekil 3.9: Örtüşmenin sol üst bölgesinin yakın görünümü (Yuvarlak izleyicili kam profili)



Şekil 3.10: Örtüşmenin sol orta bölgesinin yakın görünümü (Yuvarlak izleyicili kam profili)



Şekil 3.11: Analitik ve grafik yaklaşımda veri noktaları farkının karşılaştırılması
(Yuvarlak izleyicili kam profili)

3.2 Ters dönüşüm Yaklaşımının Geliştirilmesi ve Uygulaması

Bu çalışmada ters dönüşüm yani Kartezyen ya da polar koordinatları bilinen bir kam profilinden S verilerine ulaşmak için de bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde 1° çözünürlükte elde edilen azami mutlak hata 0,02 mm olarak sunulmakta ve bu hata kam profiline göre 0,005 mm düzeyine kadar düşmektedir. Bu başlık altında geliştirilen tersine dönüşüm çalışmasının yuvarlak ve düz izleyici için gerekli matematik denklemleri sunulmakta ve uygulaması yapılarak hata düzeyleri tespit edilmektedir. Bir kam profilini oluşturan n sayıdaki noktanın ifadesi Eşitlik 3.21’de görülmektedir.

$$C = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 \\ x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_{n-1} & y_{n-1} \\ x_n & y_n \end{bmatrix}_{(n+1) \times 2} \quad [3.21]$$

Burada n , çözünürlüğü ifade etmekte olup $360/n$ derece cinsinden örnekleme açısı olmaktadır. Yani C profili $n+1$ adet noktadan oluşmaktadır. Bu yüzden $x_0 = x_n$ ve $y_0 = y_n$ şartları sağlanarak kapalı profil oluşturulmalıdır. C profili m kere $(360/m)^\circ$ kadar döndürüldüğünde bir tur atarak başlangıç konumuna gelmektedir. Tersine dönüşüm işlemi için başlangıç açısındaki kam profilinin noktalarını ifade eden C matrisi, bir tur tamamlanana kadar döndürme açıları artımıyla döndürülmelidir. Düzlemde döndürme işlemi Eşitlik 3.1’de verilen R matrisi ile çarpılarak yapılmaktadır. O halde θ kadar döndürülmüş bir kam profili $R(\theta)$ matrisi ile çarpım sonucu elde edilmektedir.

$$C(\theta) = [CR(\theta)]_{(n+1) \times 2} \quad [3.22]$$

m kere, örnekleme açısı $(360/m)^\circ$ kadar β açılarınca döndürülmüş C profilleri ise Eşitlik 3.24’te üç boyutlu bir matris ya da bir tansör olarak ifade edilmektedir.

$$\beta = [\beta_0 \ \beta_1 \ \dots \ \beta_m]_{1 \times (m+1)}, \quad \beta_0 = 0^\circ, \quad \beta_m = 360^\circ \quad [3.23]$$

$$C(\theta, \beta) = [C(\theta)R(\beta)]_{(n+1) \times 2 \times (m+1)} \quad [3.24]$$

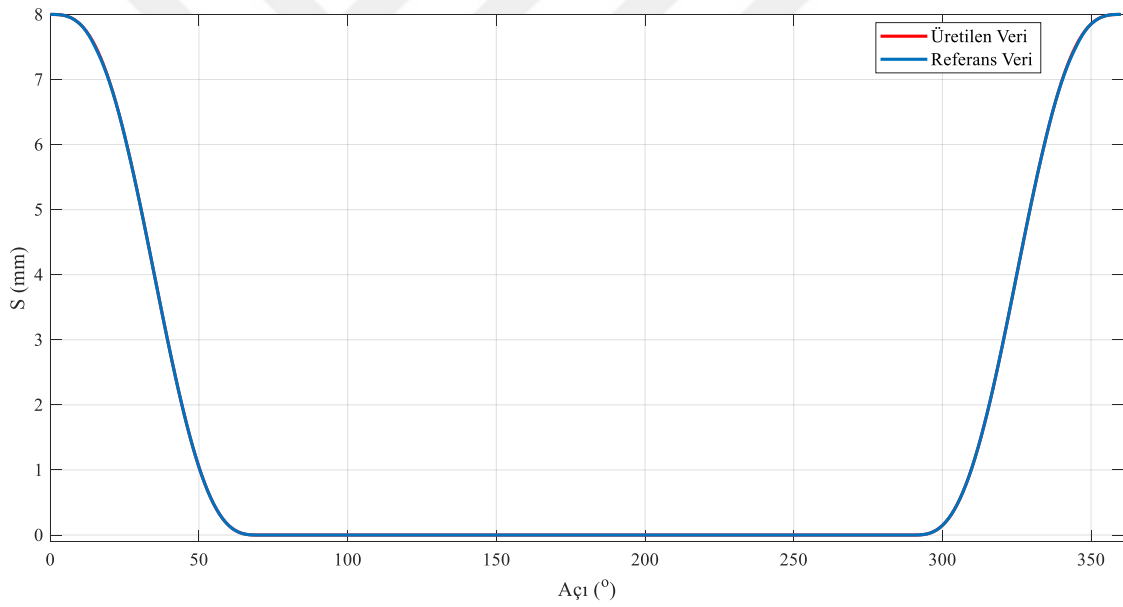
3.2.1 Düz izleyicili mekanizmada ters dönüşüm

Düz izleyicili bir kam mekanizmasında ters dönüşüm, izleyicinin doğrusal hareket ettiği eksen üzerinden yapılmaktadır. Burada izleyicinin x ekseninde hareket ettiği durum ele alınmaktadır. O halde Kartezyen koordinatları bilinen bir kam profilinin döndürülerek elde edilen tüm konumları için izleyiciye temas noktalarını bularak bu temas noktalarından geçen ve hareket eksenine dik olan doğru parçalarının yani izleyicinin hareket eksenindeki konumlarının bulunması gerekmektedir. $C(\theta, \beta)$ matrisinin üçüncü boyutunda döndürülmüş bütün kam profillerini bulunduğundan bu boyuttaki apsislerin maksimumları elde edilmelidir. $(n+1) \times 1 \times (m+1)$ boyutundaki kamın apsisler matrisi

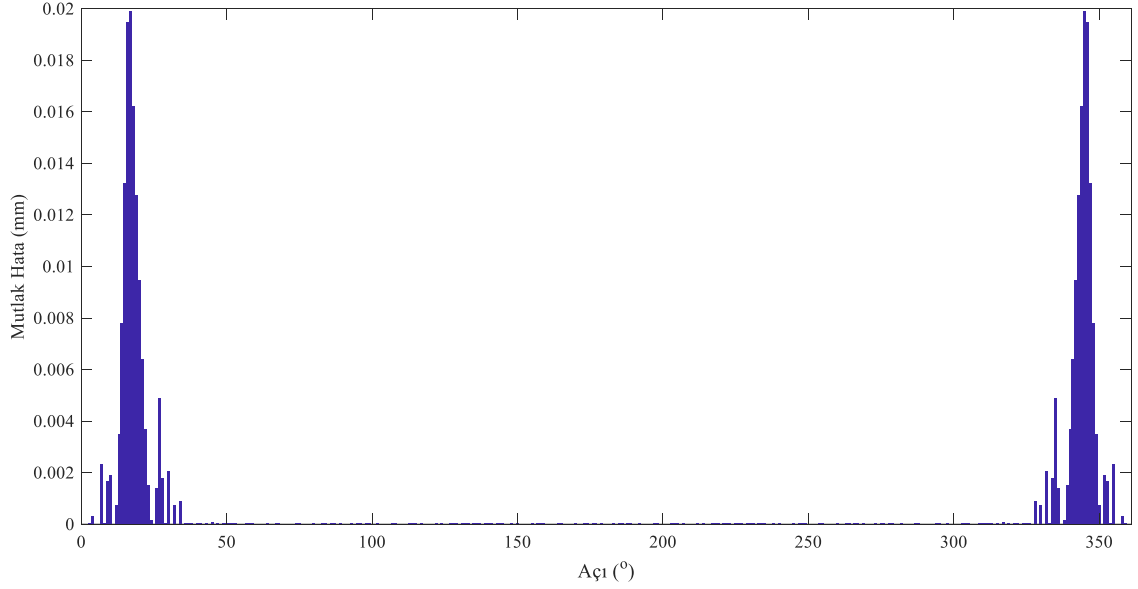
$C(\theta, \beta)_{(x)}$ ile ifade edilecek olursa düz izleyicinin hareket vektörü Eşitlik 3.25'te elde edilmektedir.

$$S(\beta) = [max\{[C(\theta, \beta)_x]_{(n+1) \times 1 \times (m+1)}\}]_{1 \times 1 \times (m+1)} \equiv [S(\beta)]_{(m+1) \times 1} \quad [3.25]$$

Burada *max* işlemi üç boyutlu matriste sütun bazlı uygulanmaktadır. Geliştirilen model doğrultusunda MATLAB® ortamında kodlama yapılmıştır. Yazılan kodlar Ek-8'de verilmektedir. Yazılan kodlar Ek-2'de verilen sikloid kam üzerinde uygulanmaktadır. Uygulama sonucunda üretilen veri ile referans veri Şekil 3.12'de üst üste çizdirilmiştir. Mutlak hatalar Şekil 3.13'de paylaşılmaktadır.



Şekil 3.12: Ters dönüşüm ile elde edilen S verisi ile referans S verisi çizimi



Şekil 3.13: Ters dönüşüm ile elde edilen S verisi ile referans S verisi mutlak hataları

3.2.2 Yuvarlak izleyicili mekanizmada ters dönüşüm

Yuvarlak izleyicili kam mekanizması CNC taşlama ile aynı çalışma mantığında olduğundan burada izleyici yerine taş alınmaktadır. Yuvarlak izleyicili bir kam mekanizmasında ters dönüşüm, izleyicinin doğrusal hareket ettiği eksen üzerinden yapılmaktadır. Burada taşın x ekseninde hareket ettiği durum ele alınmaktadır. O halde Kartezyen koordinatları bilinen bir kam profilinin döndürülmesi ile elde edilen tüm konumları için profilin taşa temas ettiği noktaları bularak bu temas noktalarını karşılayan taşın hareket eksenindeki merkez konumlarının bulunması gerekmektedir. Bu konumlar taşın S verisine temel dairesi yarıçapı ve izleyici yarıçapı kadar eklenmiş halini verecektir. Ancak taş ile profilin temas noktasının bulunması biraz karmaşıktır. Bu nokta bulunurken üç şart vardır. Bu şartlar:

- Temas noktasının kam profili üzerinde olması,
- Temas noktasının x eksenine uzaklığının taş yarıçapı R_g kadar olması,
- Temas noktasının taş çemberi üzerinde olması,

şeklinde. (a) şartının sağlanabilmesi için Eşitlik 3.24'te tanımlanan tüm açılardaki kam profillerinin üzerindeki noktaların Kartezyen koordinatlarını belirten üç boyutlu matris kullanılmalıdır. (b) şartı için tüm profil noktalarının x eksenine taş yarıçapı kadar olan uzaklıkları hesaplanmalıdır. Ancak numerik işlem hacmini azaltmak için ilgili olmayan koordinat bölgelerindeki noktaların elenmesi gerekmektedir. Temas birinci ve

dördüncü Kartezyen koordinat bölgelerinde olmaktadır. Apsisler kam temel dairesi yarıçapı R_c değerinden küçük olamayacağından Eşitlik 3.24'te düzenleme yapılmalıdır.

$$\{C_{rx}(\beta) \in C(\beta) \mid C_{rx}(\beta) \geq R_c, \text{eşitsizlik apsis vektörleri için}\} \quad [3.26]$$

Eşitlik 3.26'da $\geq$ işlemi, apsisler üzerinde yapılarak profilin her açısına göre değişkenlik gösterebilecek q satırına indirgeme yapılmaktadır. q satırı değişken olduğundan burada olası en büyük değer olarak düşünülmeli, daha küçük değerlerdeki artık satırlar matris içinde boşluklu ya da sayı değil olarak ifade edilen NaN değerinde oluşturularak numerik işlemlerde boyut uyum hataları önlenmelidir.

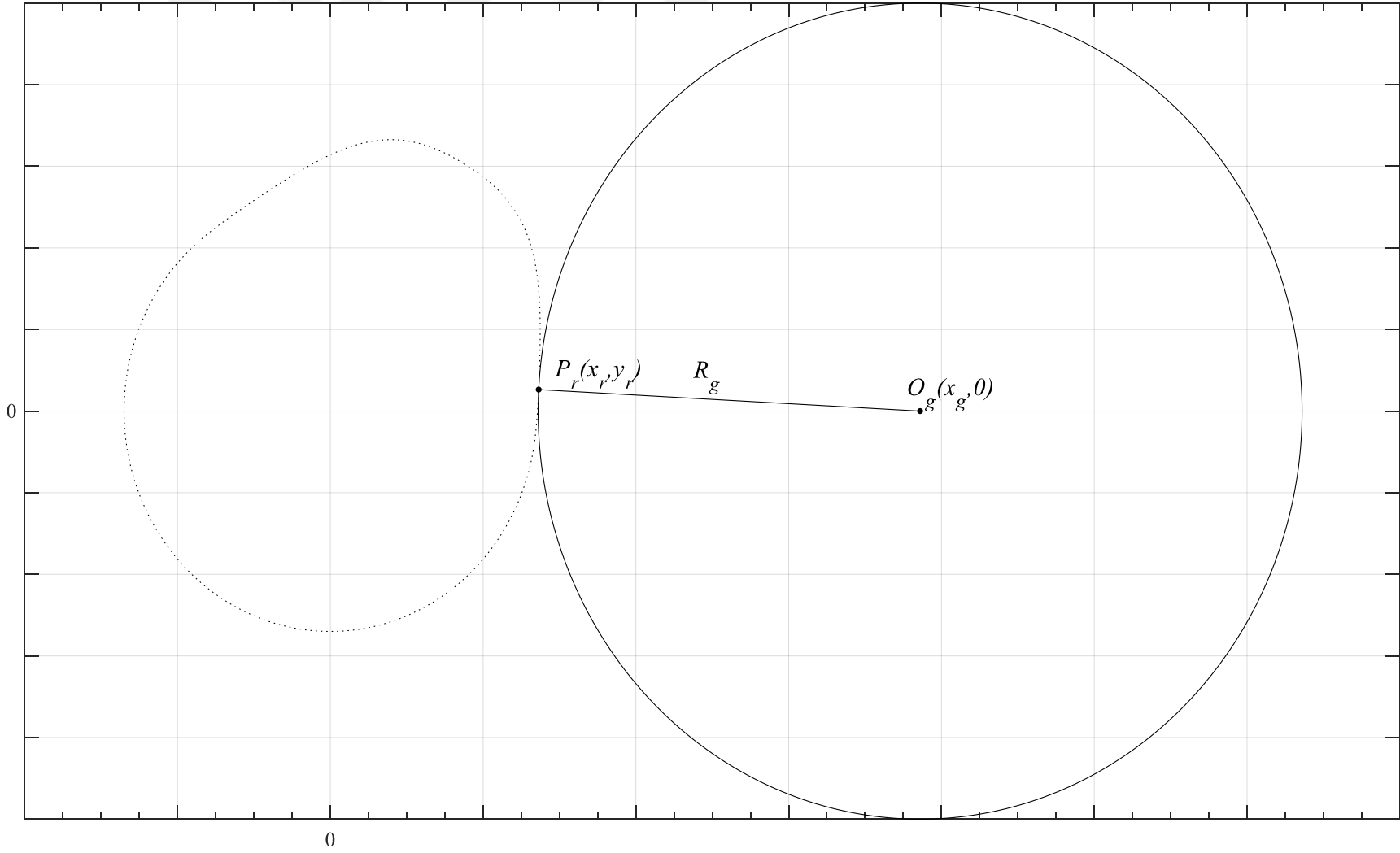
Ayrıca ordinat değerleri taş yarıçapı R_g değerinden büyük olamayacağından Eşitlik 3.26 tekrar düzenlenmelidir.

$$\{C_{rxy}(\beta) \in C_{rx}(\beta) \mid C_{rxy}(\beta) \leq R_g, \text{eşitsizlik ordinat vektörleri için}\} \quad [3.27]$$

Eşitlik 3.27'de $\leq$ işlemi, ordinatlar üzerinde yapılarak satır sayısı q değerinden p değerine indirgenmekte ve ilgilenilen koordinatlar olabildiğince azaltılmaktadır. İlgilenilen koordinatlar elde edildikten sonra bunlardan hangilerinin temas noktası olduğunu bulmak için daire denklemine göre yeni bir denklem oluşturmak gerekir. Bunun için Şekil 3.14'de verilen taşın kam profiline temas durumu ele alınacak olursa P_r temas noktası ve R_g bilinen olmak üzere O_g , dolayısıyla x_g değerinin bulunması gerekir. Bunun için dairenin denkleminde Eşitlik 3.28 yazılır.

$$(x_r - x_g)^2 + y_r^2 = R_g^2 \quad [3.28]$$

Eşitlik 3.28'deki ikinci derece denklemde x_g için çözüm kümesinden pozitif değerli ifade çekildiğinde Eşitlik 3.29'a ulaşılır.



Şekil 3.14: Taşın profile teması

$$x_g = x_r + \sqrt{R_g^2 - y_r^2} \quad [3.29]$$

Eşitlik 3.29, Eşitlik 3.27'deki $m+1$ profilin her birindeki bütün ilgilenilen noktalara (her profil için en çok p noktaya) uygulanmalıdır. Bu uygulama sonucunda elde edilen matris p satır $m+1$ sütun boyutunda olacaktır. Bu yeni matris $[O_g]_{p \times (m+1)}$ şeklinde olmaktadır. O_g matrisindeki her değer x eksenini üzerindedir, dolayısıyla $m+1$ adet x sütun vektörü O_g matrisini oluşturmaktadır. Burada her sütun vektörü içinden profile dalmayan taş konumlarının bulunması gerekmektedir. Profile dalma durumunda taşın merkezi O_g ile profilin ilgilenilen koordinat noktaları yani Eşitlik 3.27'de elde edilen $C_{rxy}(\beta)$ arasında R_g değerinden küçük, R_g değerinde ve R_g değerinden büyük mesafeler oluşmaktadır. Temas noktasını sağlayan O_g ile $C_{rxy}(\beta)$ arasında ise mesafe en küçük R_g kadar olmaktadır. O halde iki nokta arasındaki mesafeler hesaplanmalı ardından bu mesafelerde R_g 'den küçük olan değerlerin olduğu vektörler elenmelidir. Sonuçta elde kalan her vektörde 1 değer olacak ve taşın ayrık S verisi elde edilecektir. İki nokta arasındaki mesafe hesabı için Eşitlik 3.28'de R_g yalnız bırakılarak tek durum çözümü yapılabilmektedir. Çözümü genelleştirmek için $C_{rxy}(\beta)$ matrisindeki x değerlerini ve y değerlerini içeren vektörler ayrı ayrı yazılır. Bunlar C_x ve C_y olarak yeniden isimlendirilirse noktalar arası mesafe için Eşitlik 3.30 elde edilir.

$$[D_g]_{p \times p \times (m+1)} = \sqrt{(C_x - O_g)^2 + C_y^2} \quad [3.30]$$

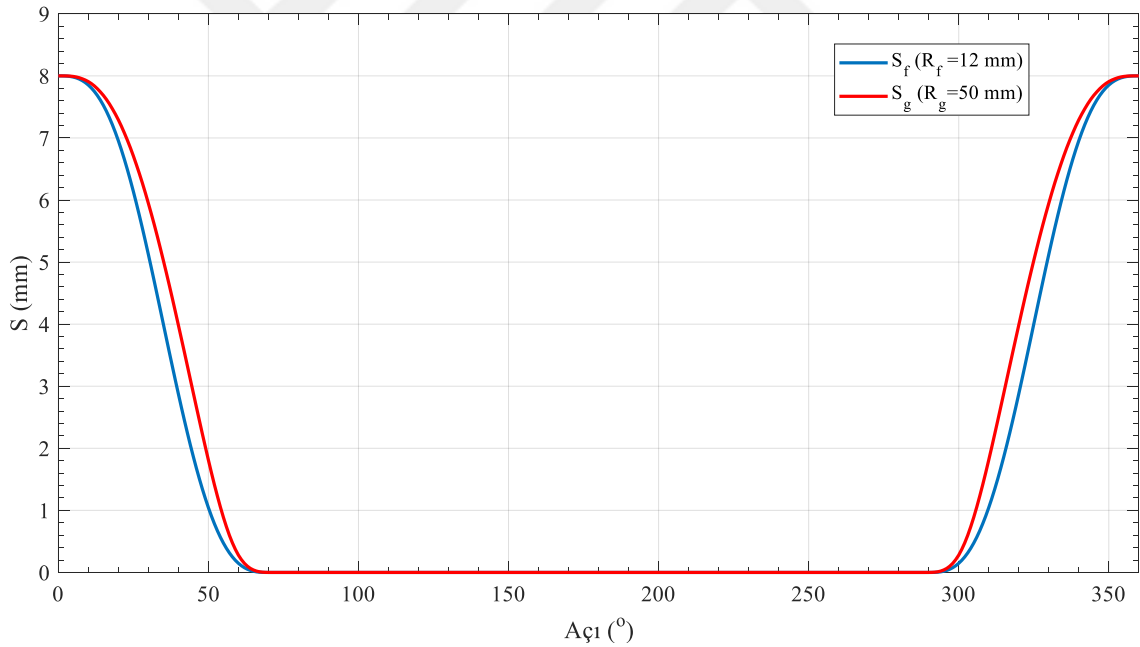
D_g matrisi R_g değerinden çıkartılıp mutlak değeri alındığında taşın profile daldığı ya da değmediği noktalar maksimize edilmiş olur. Bu mutlak değerli ifadeye Eşitlik 3.31'de olduğu gibi minimum işlemi uygulandığında temas noktaları bulunmuş olur.

$$[P]_{(m+1)} = \min_{(1)} \left(\min_{(2)} (|R_g - D_g|) \right) \quad [3.31]$$

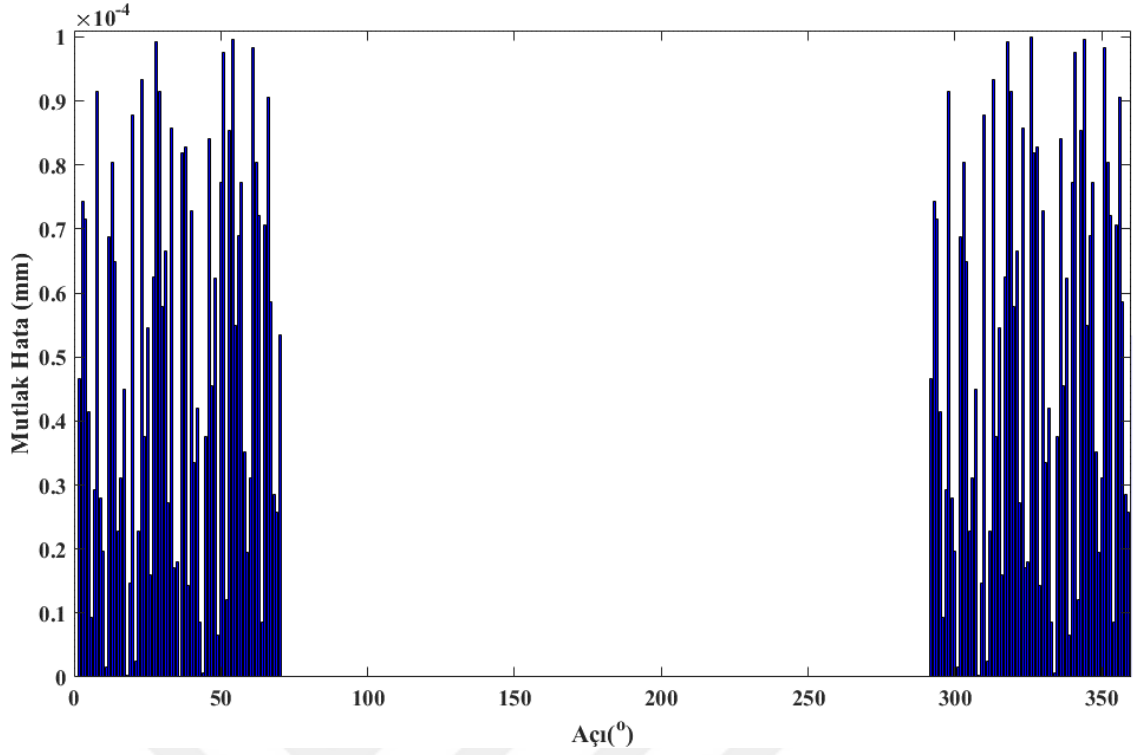
Bulunan P değerleri x eksenindeki taşın merkezinin konumlarını ifade etmektedir. Taşın hareket verisi ise Eşitlik 3.32'deki gibi olmaktadır.

$$[S_g]_{(m+1)} = P - R_g - R_c \quad [3.32]$$

Bu hesaplarda m değeri ne kadar yüksek tutulursa doğruluğun da o kadar yüksek olması beklenir. m değerini büyütmek için izleyiciye ait S verisinde c-spline interpolasyonu yapılmalı ya da S verisi fonksiyondan üretilirken düşük açı aralıkları ile elde edilmelidir. Burada elde edilen denklemlere karşılık gelen MATLAB® komut bütünü taş yarıçapı 50 mm alınarak ve Ek-2'de sunulan verilere uygulanarak Ek-9'da paylaşılmaktadır. Paylaşılan kodlar sonucu elde edilen S ve izleyiciye ait S değerlerinin tek grafikte görünümü Şekil 3.15'de verilmektedir. Taş çapı için yapılan uygulamada hata ölçümü yapmak mümkün olmamakla birlikte eğer taş, izleyici çapında olursa ters dönüşümde oluşan mutlak hatalar Şekil 3.16'te paylaşılmaktadır.



Şekil 3.15: İzleyiciye ait S eğrisi ile elde edilen taş yörüngesinin karşılaştırılması



Şekil 3.16: Ters dönüşümde oluşan mutlak hatalar

3.3 Taş yörüngesine ait eğrinin NC komutları ile ifadesi

Bu başlık altında alt bölüm 2.1.3 ve 2.3.1’de ortaya koyulan aşamalar göz önünde bulundurularak bir önceki alt bölümde elde edilen S_g verisinin NC kodları elde edilmektedir. Öncelikle taşın hareket eğrisinin parçalı polinom olarak oluşturulması gerekmektedir. Bunun için S_g verisine 5° aralıkla kübik bir spline uydurulmaktadır. Elde edilen eğri parçaları PL eksenine taşınarak bu parçalı eğrilerin NC komut tanım parametreleri elde edilmektedir.

```
N30 CTABDEF(X,Z,1,1)
N40 FGROUPE(X,Z)
N50 G90 T0 D0 G500 POLY
N60 Z=0.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N70 Z=5.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N80 Z=10.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N90 Z=15.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
```


N100 Z=20.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N110 Z=25.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N120 Z=30.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N130 Z=35.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N140 Z=40.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N150 Z=45.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N160 Z=50.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N170 Z=55.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N180 Z=60.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N190 Z=65.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
 N200 Z=70.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0001)
 N210 Z=75.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,-0.0004)
 N220 Z=80.0000 PO[X]=(0.0000,-0.0001,0.0013)
 N230 Z=85.0000 PO[X]=(0.0000,0.0003,-0.0050)
 N240 Z=90.0000 PO[X]=(0.0000,-0.0001,0.0188)
 N250 Z=95.0000 PO[X]=(0.0000,0.0039,-0.0701)
 N260 Z=100.0000 PO[X]=(0.0000,-0.0145,0.2617)
 N270 Z=105.0000 PO[X]=(0.0000,0.0540,-0.9766)
 N280 Z=110.0000 PO[X]=(0.0000,-0.2017,3.8761)
 N290 Z=115.0000 PO[X]=(0.0002,0.08131,44.686)
 N300 Z=120.0000 PO[X]=(0.0398,12.5119,58.3833)
 N310 Z=125.0000 PO[X]=(0.2791,27.7966,-22.9523)
 N320 Z=130.0000 PO[X]=(0.8878,21.7877,-48.1497)
 N330 Z=135.0000 PO[X]=(1.8115,9.1821,-31.4678)
 N340 Z=140.0000 PO[X]=(2.8862,0.9439,-17.9161)
 N350 Z=145.0000 PO[X]=(3.9843,-3.7466,-17.4347)

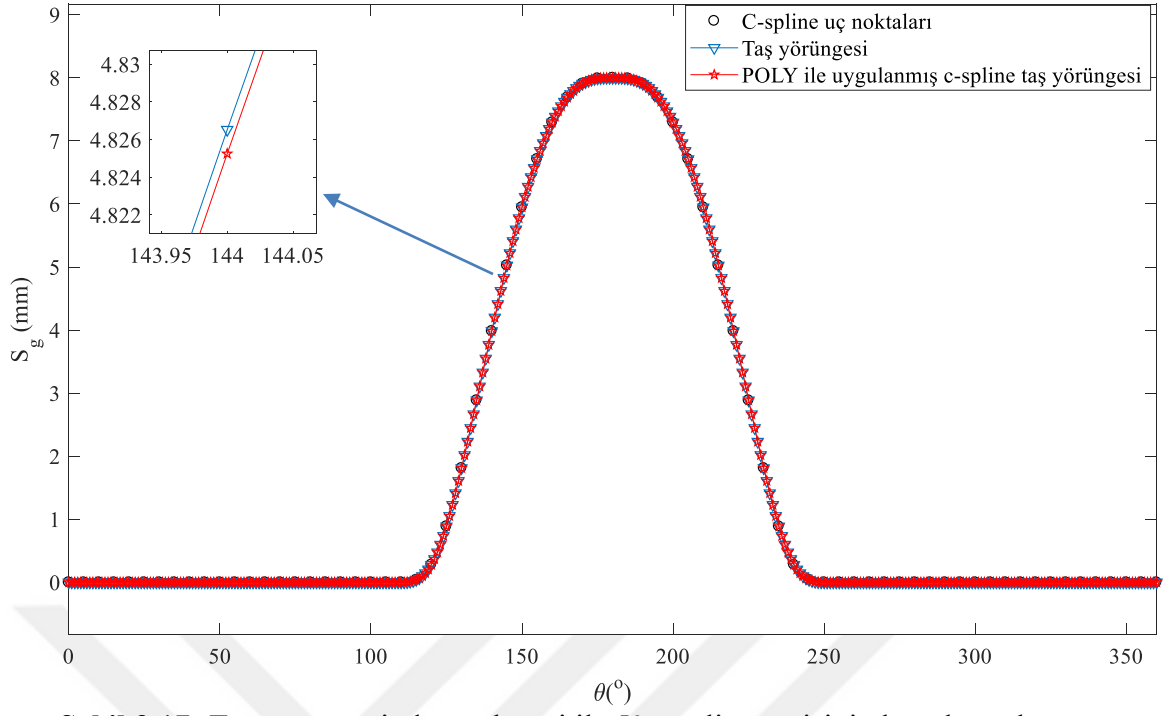
N360 Z=150.0000 PO[X]=(5.0256,-8.311,-7.6977)
 N370 Z=155.0000 PO[X]=(5.9468,-10.3262,-7.4597)
 N380 Z=160.0000 PO[X]=(6.7109,-12.2791,-0.8823)
 N390 Z=165.0000 PO[X]=(7.2923,-12.5101,3.7193)
 N400 Z=170.0000 PO[X]=(7.6863,-11.5364,8.149)
 N410 Z=175.0000 PO[X]=(7.9075,-9.403,16.2599)
 N420 Z=180.0000 PO[X]=(7.9908,-5.1462,22.578)
 N430 Z=185.0000 PO[X]=(8.0000,0.7647,-22.578)
 N440 Z=190.0000 PO[X]=(7.9908,-5.1462,-16.2599)
 N450 Z=195.0000 PO[X]=(7.9075,-9.403,-8.1490)
 N460 Z=200.0000 PO[X]=(7.6863,-11.5364,-3.7193)
 N470 Z=205.0000 PO[X]=(7.2923,-12.5101,0.8823)
 N480 Z=210.0000 PO[X]=(6.7109,-12.2791,7.4597)
 N490 Z=215.0000 PO[X]=(5.9468,-10.3262,7.6977)
 N500 Z=220.0000 PO[X]=(5.0256,-8.311,17.4347)
 N510 Z=225.0000 PO[X]=(3.9843,-3.7466,17.9161)
 N520 Z=230.0000 PO[X]=(2.8862,0.9439,31.4678)
 N530 Z=235.0000 PO[X]=(1.8115,9.1821,48.1497)
 N540 Z=240.0000 PO[X]=(0.8878,21.7877,22.9523)
 N550 Z=245.0000 PO[X]=(0.2791,27.7966,-58.3833)
 N560 Z=250.0000 PO[X]=(0.0398,12.5119,-44.6860)
 N570 Z=255.0000 PO[X]=(0.0002,0.08131,-3.8761)
 N580 Z=260.0000 PO[X]=(0.0000,-0.2017,0.9766)
 N590 Z=265.0000 PO[X]=(0.0000,0.0540,-0.2617)
 N600 Z=270.0000 PO[X]=(0.0000,-0.0145,0.0701)
 N610 Z=275.0000 PO[X]=(0.0000,0.0039,-0.0188)

```

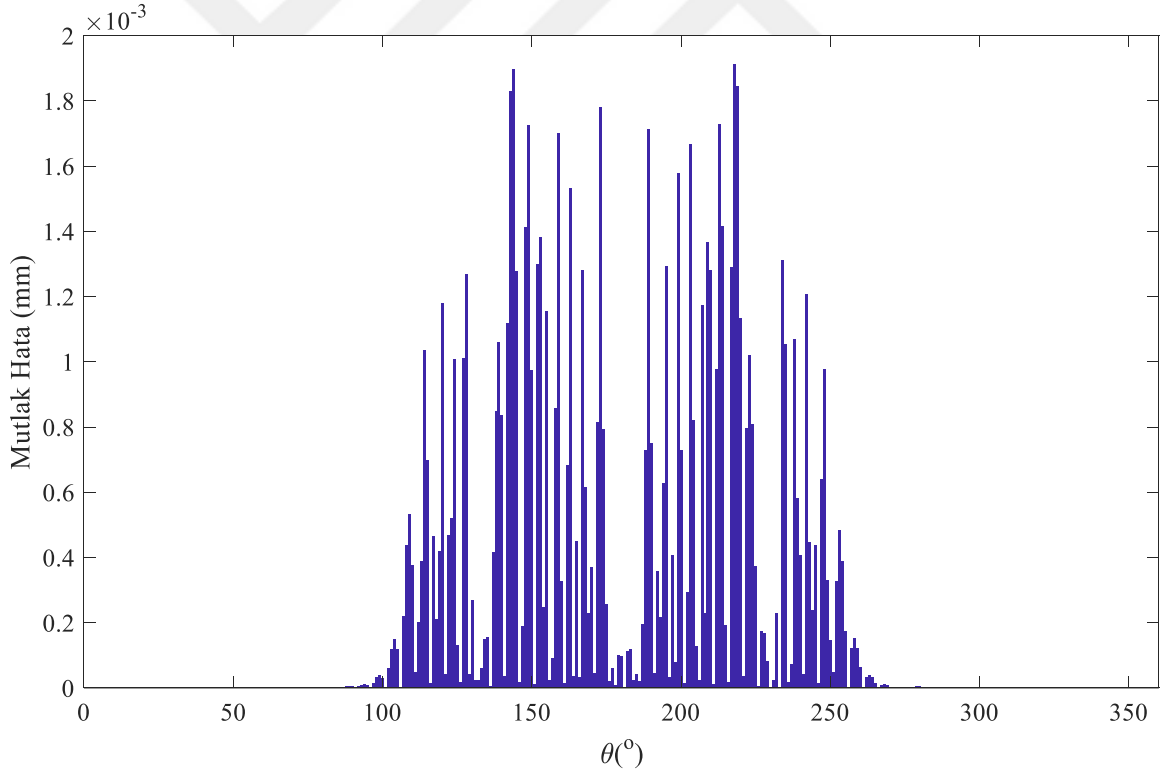
N620 Z=280.0000 PO[X]=(0.0000,-0.0001,0.0050)
N630 Z=285.0000 PO[X]=(0.0000,0.0003,-0.0013)
N640 Z=290.0000 PO[X]=(0.0000,-0.0001,0.0004)
N650 Z=295.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,-0.0001)
N660 Z=300.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N670 Z=305.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N680 Z=310.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N690 Z=315.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N700 Z=320.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N710 Z=325.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N720 Z=330.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N730 Z=335.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N740 Z=340.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N750 Z=345.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N760 Z=350.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N770 Z=355.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N780 Z=360.0000 PO[X]=(0.0000,0.0000,0.0000)
N1090 CTABEND

```

Yukarıda verilen komutlardaki katsayılar θ eksenine taşınarak değer verilip sonuçları taş bir derece çözünürlüklü yörünge verisi ile karşılaştırıldığında verilerin örtüştüğü Şekil 3.17’de görülmektedir. Ayrıca bu iki verinin mutlak hataları Şekil 3.18’de görüldüğü gibi azami 0.002 mm civarında oluşmaktadır. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’in elde edilmesi için yapılan hesapları ve çizdirme komutlarını içeren MATLAB® komut bütünü Ek-10’da verilmektedir.



Şekil 3.17: Taş yörüngesinde ayırık veri ile 5° c-spline verisinin karşılaştırılması

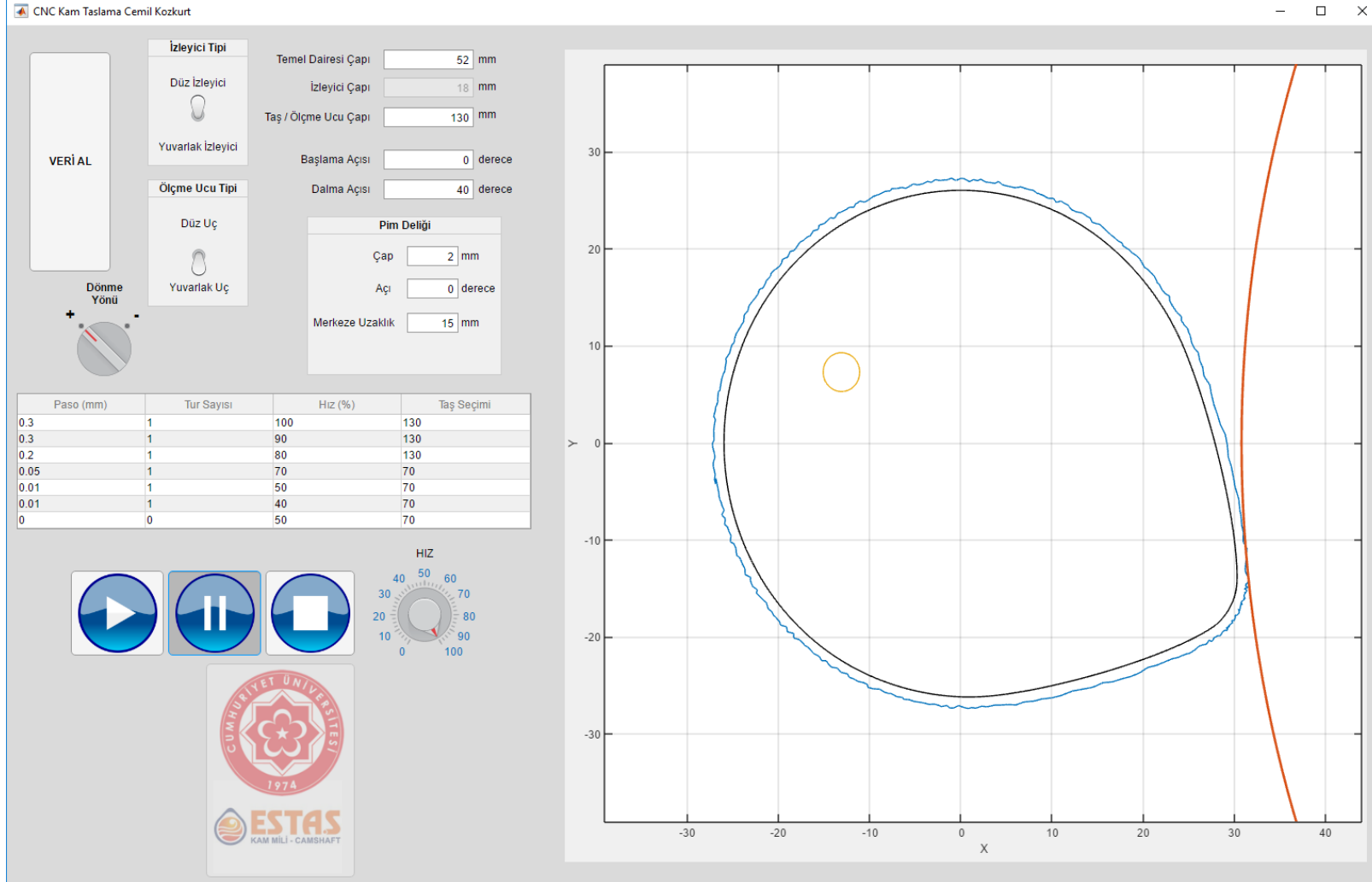


Şekil 3.18: 5° çözünürlükle uydurulmuş c-spline taş yörünge verisinin ayırık veriye göre mutlak hataları

3.4 Simülasyon Yazılımı ve Çıktıları

Bu başlık altında tez çalışmasında elde edilen matematiksel ve sayısal yöntemlerin MATLAB® App Designer ortamında uygulanarak elde edilen bir simülasyon yazılımı sunulmaktadır. Bu yazılım bir CNC kam taşlama makinesinin C eksen ve X eksen uyumunu simüle etmektedir. Geliştirilen yazılımın arayüz ekran görüntüsü Şekil 3.17’de verilmektedir.

CNC Kam Taşlama simülasyon yazılımı, VERİ AL butonu ile açığa karşılık gelen S verisi ile R_c ve R_f değerlerini alarak bölüm 3.1’de geliştirilen yöntemi kullanarak kam profilini oluşturmaktadır. Simülasyon düz izleyici ve yuvarlak izleyici için çalışabilmekte, dönme yönü, dönme hızı, paso miktarları, pim deliği konumu ve boyutu, başlama ve dalma açıları ayarlarıyla istenen çaptaki bir taş ile simülasyon gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.17: Simülasyon yazılımının arayüzüne ait ekran görüntüsü

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda kullanılan yüksek hızlı düz ve yuvarlak sentrik izleyicili radyal kam millerinin Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (Computer Numeric Control - CNC) taşlama makinelerinde işlenebilmesi için işleme öncesinde gerekli olan matematiksel yöntemler ve sayısal işlemler ortaya koyulmaktadır. İzleyici hareketinin ayrık verisinden kam profilinin elde edilmesi, profil koordinat verileri bilinen kamı işleyecek taşın yörünge verisinin elde edilmesi, bu verinin numerik kontrol (NC) eğri interpolasyon komutlarıyla ifade edilmesi konuları matematiksel detaylarıyla ele alınmakta ve örnek MATLAB® uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Ele alınan konulardan elde edilen MATLAB® komutları kullanılarak operatör eğitimi için CNC taşlama makinesinin bir simülasyon yazılımı geliştirilmektedir.

Materyal ve yöntem kısmında ele alınan konular her ne kadar bilinen konular olsa da uygulanması için literatürde kaynak bulmak oldukça zordur. Burada oluşturulan materyal ve yöntem kısmının tamamı öz çalışma ile elde edilmiş ve çok azında literatürden birebir alıntı yapılmıştır Bu açıdan tez çalışmasının bir kaynak kitap niteliğinde fayda sağlaması da beklenmektedir.

Bulgular kısmında ele alınan grafik yaklaşımdan elde edilen analitik yaklaşım da özgün bir çalışmadır ve bu çalışma bir yayın olarak da sunulmaktadır (Közkurt, Ertaş, & Yücel, 2017). Bu özgün çalışma ile literatüre yeni bir analitik yaklaşım kazandırılmış ve bu analitik yaklaşım geleneksel yöntemle veri noktaları arasındaki farklar bakımından karşılaştırıldığında, farkların yani profil yüzeyi hızlarının daha az değişken olduğu ortaya koyulmuştur. Bu avantaj CNC freze makinelerinde numune şeklindeki nokta temelli üretimlerde daha hatasız ve kaliteli yüzeyler oluşturulmasını sağlayacaktır.

Bulgular kısmında ele alınan ters dönüşüm yaklaşımı matris bakış açısıyla ele alınarak geliştirilmiştir. Kam profili verisinden izleyici yörüngesine yani hareket verisine ulaşmanın yolu olan ters dönüşüm yaklaşımı aynı zamanda taş yörüngesinin

elde edilmesini de sağlamıştır. Yaklaşımında özgün matris yaklaşımı literatürde ele alınmamış bir yöntemle geliştirilmiş ve doğruluğu yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Taş yörüngesine MATLAB® yardımı ile c-spline eğrisinin uydurulması ve bu eğriyi oluşturan kübik polinomların bulunması, kübik polinomların NC kodlarla ifade edilmesi ortaya koyulmuş ve örnekli bir çözüm de sunulmuştur. Bu yöntemle CNC taşlama makinelerinde eğri tabelaları kullanılarak daha hızlı üretim yapılmasının önü açılmıştır. Hızlı üretim, seri imalat yapan kam mili sanayii için önemli bir kriter olmakla birlikte yöntemin açıkça ortaya konması bu işlemi kısıtlı sayıda gerçekleştiren CNC kam taşlama makinesi markasına ait yazılımdan bağımsız olarak tüm CNC kam taşlama makinelerinde kullanılabilir kılmıştır. Yöntemin basamakları açıkça ortaya koyularak örnekle açıklanması kam mili sanayii için önemli bir kazanımdır. Ters dönüşüm yaklaşımı ayrıca farklı uç çapına ait bir kam mili ölçüm cihazı ile ölçüm yapıldığında elde edilmesi gereken S verisini de vererek sanayinin kullanabileceği bir çözüm ortaya koymaktadır.

Çalışmada geliştirilen yöntemler bir simülasyon yazılımı oluşturulmasında kullanılmış, bu yazılım operatör eğitiminde enerji, malzeme ve zaman verimliliği sağlayacak faydalı bir sonuç ortaya koymuştur. Materyal ve yöntem kısmında ve bulgular kısmında verilen görsellerin MATLAB® kodları ile nasıl gerçekleştirildiği de eklerde verilerek çalışmanın başka verilere de uygulanabilmesi ve geliştirilmesi için imkan sunulmuştur.

İleri dönük bir çalışma olarak ters dönüşüm yaklaşımını kullanan, daha kısıtlı bir uç çeşitliliğiyle ölçüm yapabilen bir kam mili ölçüm cihazı geliştirilebilir. Bu tür bir cihaz oldukça maliyetli olan ölçüm uçlarının oluşturduğu dezavantajı önemli oranda ortadan kaldıracaktır. Yine gelecekte yapılabilecek bir çalışma olarak taş yörüngesi c-spline eğrisinin sabit aralıklarla değil de c eksenini açısal hızı, eğrilik, yüzey hızı gibi kısıt fonksiyonlarına bağlı olarak değişken aralıklarla belirlenerek uydurulabilecek bir yöntem ortaya konabilir. Ayrıca c ekseninin açısal hızının da bir NC eğri tabelası ile belirlenmesi sağlanabilir. Bu çalışmaların yanında sezgisel ve meta sezgisel yöntemler kullanılarak hata oranına bağlı en uygun eğri uydurma uç noktaları, en uygun örnekleme aralıklarının belirlenmesi gibi çalışmalar da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Alcázar, J. G., Hermoso, C., & Muntingh, G.** (2014). Detecting symmetries of rational plane and space curves. *Computer Aided Geometric Design* 199–209(31), 199-209.
- Bağırov, H., & Ertaş, H. A.** (2009). *İçten Yanmalı Pistonlu Motorlar* (Cilt 2). Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları.
- Biswas, A., Stevens, M., & Kinzel, G.** (2004). A comparison of approximate methods for the analytical determination of profiles for disk cams with roller followers. *Mechanism and Machine Theory*(39), 645-656.
- Chen, F.** (1973). A refined algorithm for finite-difference synthesis of cam profiles. *Mechanism and Machine Theory*,(7(4)), 453-460.
- Chen, F. Y.** (1982). *Mechanics and Design of Cam Mechanisms*. New York: Pergamon Press.
- Chen, G., Mei, X., & Zheng, T.** (2009). Research on the key technologies of CNC noncircular camshaft grinding. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (s. 4528-4533). Changchun: IEEE.
- Drazumeric, R., Badger, J., & Krajnik, P.** (2014). Geometric, kinematical and thermal analyses of non-round cylindrical grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 818-827.
- Drazumeric, R., Vrabic, R., Krajnik, P., Meyer, B., Butala, P., Kosel, F., & Kopac, J.** (2010). Modelling of grinding gap macro geometry and workpiece kinematics in throughfeed centerless grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, 104-109.
- Ertaş, H. A.** (2016). *Tersine Tasarımla Kam Profiline Bulunması ve CNC Taşlamada Yörünge Tayininde Kullanılması, SANTEZ (0402.STZ.2013-2)*. Ankara: Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.

- Farouki, R., Manjunathaiah, J., & Jee, S.** (1998). Design of Rational Cam Profiles with Pythagorean-Hodograph Curves. *Mech. Mach. Theory*, 669–682.
- Farouki, R., Tsai, Y.-F., & Yuan, G.-F.** (1999). Contour machining of free-form surfaces with real-time PH curve CNC interpolators. *Computer Aided Geometric Design*, 61-76.
- Goldman, R.** (1990). Intersection of Two Lines in Three-Space. A. Glassner içinde, *Graphics gems* (s. 304). San Diego: Academic Press Professional Inc.
- Gordon, S. P.** (2012). Some surprising errors in numerical differentiation. *Primus*(22(6)), 437-450.
- Hong, H., Parvate-Patil, G. B., & Gordon, B.** (2004). Review and analysis of variable valve timing strategies—eight ways to approach. *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering*, 1179-1200.
- Hong-Sen, Y., & Wen-Teng, C.** (1999). Curvature Analysis of Roller-Follower Cam Mechanism. *Mathematical and Computer Modelling*, 29, 69-87.
- Hong-Sen, Y., & Wen-Teng, C.** (1999). Curvature analysis of spatial cam-follower mechanisms. *Mechanism and Machine Theory* , 319-339.
- Karabulut, H., & Sarıdemir, S.** (2009). Farklı Supap Açık Kalma Süreleri ve Kursları için Klasik Spline Yöntemi ile Elde Edilen Kam Profillerinin Karşılaştırması. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 24(3), 509-515.
- Kiper, G., Huang, C., & Söylemez, E.** (2012). Numerical Analysis of Planar Cam Follower Mechanisms. *The 2nd IFToMM Asian Conference on Mechanism and Machine Science*, (s. 335-342). Tokyo.
- Közkurt, C., Ertaş, H., & Yücel, S.** (2017). Analysis of Graphical Approach for Cam Profile Determination. *Journal of New Results in Science*, 32-46.
- Krajnik, P., Drazumeric, R., Badger, J., & Hashimoto, F.** (2014). Cycle optimization in cam-lobe grinding for high productivity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* , 333-336.
- Lancefield, T.** (2002). *The Application and Effects of Variable Duration Camshaft Systems to Light Duty Diesel Engines*, PhD Thesis. Oxford: Oxford University, Wolfson College.

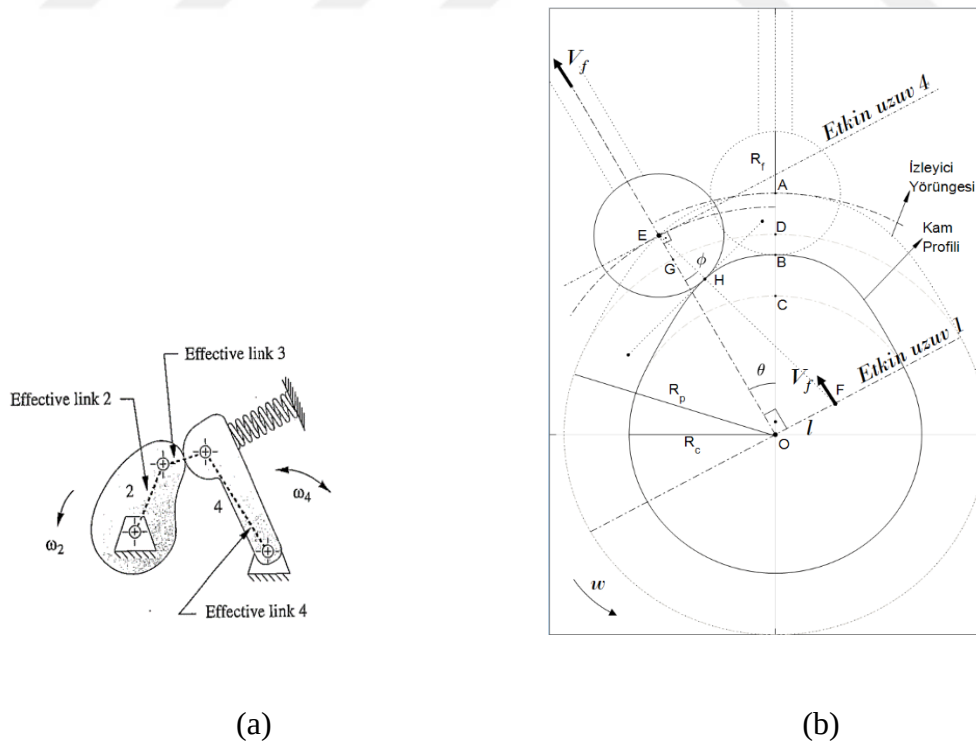
- Liang, Z., & Quinn, C.** (1991). Accurate Design of a Cam Profile on the CAD System. *Journal of Manufacturing Systems*, 10(6), 501-508.
- Meneghetti, U., & Maggiore, A.** (2011). Antique Applications of Cam Mechanisms. *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, (pp. 1-8). Guanajuato.
- Norton, R. L.** (2002). *Cam Design and Manufacturing Handbook*. New York: Industrial Press.
- Ottaviano, E., Mundo, D., Danieli, G., & Ceccarelli, M.** (2008). Numerical and experimental analysis of non-circular gears and cam-follower systems as function generators. *Mechanism and Machine Theory*, 996–1008.
- Rothbart, H. A.** (2004). *Cam design handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Sezgin, F.** (2008). *İslam'da Bilim ve Teknik, Cilt:III*. İstanbul: Kültür A.Ş.
- Siemens.** (2002). *Advanced SINUMERIK 840D/840Di/810D Programming Guide 11*. Münih: Siemens.
- Söylemez, E.** (2008). *Mekanizma Tekniği*. Ankara: Birsen Yayınevi.
- Sui, Z., Guo, M., Liu, H., & Tian, Y.** (2011). Modeling and simulation analysis of NC camshaft grinding system. *2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation* (s. 733-738). IEEE.
- Su-zhen, W., & Yu-xi, L.** (2011). Research on the CNC system of camshaft grinding. *2011 Interational Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization* (s. 288-301). IEEE.
- Takazakura, T., Morita, T., & Sugiura, T.** (2016). Dynamical behavior of noncontact driving cam mechanism using permanent magnets. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 169-174.
- Thomas, G., & Finney, R.** (1998). *Calculus and Analytic Geometry*. Addison Wesley Publishing Comp.
- Timehenko, A., Skomorokhov, G., & Skhirtladze, A.** (1999). Making camshafts on a circular grinding machine. *Chemical and Petroleum Engineering*, 59-62.

- Ting, D., Hongjun, W., & Lei, S.** (2012). Study of Camshaft Grinders Faults Prediction Based on RBF Neural Network. *Applied Mechanics and Materials*(141), 519-523.
- Tutak, B., & Söylemez, E.** (1986). Kam Profili Koordinatlarından Uydu Hareketinin Bulunması. 2. *Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu* (s. 27-35). Gaziantep: Proc. TÜBİTAK.
- Vavruška, P.** (2012). Machine Tool Control System and Interpolations of SPLINE Type. *Engineering Mechanics*, 19(4), 219-229.
- Wang, J., Sui, Z., Tian, Y.-t., Wang, X., & Fang, L.** (2015). A speed optimization algorithm based on the contour error model of lag synchronization for CNC cam grinding. *Int J Adv Manuf Technol*(80), 1421–1432.
- Wilson, A.** (2002). Machines, Power and The Ancient Economy. *The Journal of Roman Studies*(92), 1-32.
- Wu, L.-I., Wu, S.-H., & Yan, H.-S.** (1999). Simplified graphical determination of disk-cam curvature. *Mechanism and Machine Theory*, 34, 1023-1036.
- Yardım, M. H.** (2015). *Motor Teknolojisi*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Yücel, A.** (2015). *Bor Karbür Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerden Kam Üretiminin Araştırılması, Doktora Tezi*. Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Zhou, H., Wu, J., Tang, X., & Chen, J.** (2012). Research and implementation of NURBS interpolator with continuous feedrate for high-speed machining. *International Journal of Production Research*, 6457-6468.

EKLER

Ek-1 Kam profilinde hızın geometrik bir uzunluğa eşit olmasının ispatı

Radyal kam mili mekanizmasında, kam profilinin hesabı için kullanılan analitik yaklaşımın çıkış noktası bir eşdeğerlik prensibine dayanmaktadır. Hareket fonksiyonunun açığa göre türevi olan hız fonksiyonunun ani mutlak değeri basma açısının izleyici merkezi ile oluşturduğu doğrunun, izleyicinin öteleme hareketi eksenine dik olan eksen kestiği nokta ile kam merkezi arasında oluşan uzunluğa eşit olmaktadır. Bu eşitlikse kam mekanizmasının dört kol mekanizmasına mevzu bahis eşdeğerliğinden elde edilmektedir. Bu eşdeğerlik salınım hareketi yapan izleyicili kam mekanizmasında şekli sürekli değişen krank-biyel dört kol mekanizması, öteleme hareketi yapan izleyicili kam mekanizmasında ise şekli sürekli değişen kol-sarkaç dört kol mekanizması şeklinde eşdeğerlik olarak tanımlanmaktadır (Norton, 2002). Şekil 5.1, a'da verilen kam mekanizması eşdeğerliğinde etkin bağlantılar belirtilmektedir. Şekil 5.1,b'de ise etkin uzuvlara dayanarak ötelemeli hızın taşınması işlemi görülmektedir. Etkin uzuv 1 ve 4 sonsuzda kesişmektedir.



Şekil Ek-1: a) Kam mekanizması - dört kol mekanizması eşdeğerliği (Norton, 2002)
b) İzleyici öteleme hareketinin taşınması

F noktasına taşınan V_f hızı l uzunluğunda bir yarıçapa ait dairenin çevresel hızına eşittir. V_f hızı ile sabit olan w açısal hızı arasındaki ilişki Eşitlik 5.1’de verilmektedir. V_f hızı burada aynı zamanda S hareket fonksiyonunun zamana göre türevidir.

$$V_f = wl = \frac{ds}{dt} \quad [5.1]$$

Eşitlik 5.2’de verildiği şekilde zincir kuralı uygulanarak hareket fonksiyonunun açıya göre türevi olan v hızı ile kam profili üzerinde oluşan l uzunluğunun birbirine eşit olduğu elde edilir.

$$\frac{dS}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} = \frac{dS}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = vw = wl \quad [5.2]$$

$$v = l \quad [5.3]$$

Ek-: Örneklerde kullanılan S fonksiyonu verisi

Tez çalışmasında birçok başlık altında çizdirilen grafikler, profil şekilleri ve veri kümesi üzerine c-spline eğrilerinin uydurulduğu S fonksiyonu kaynaklarda da belirtilen çalışmada kullanılan sikloid fonksiyonu ile üretilmiştir (Közkurt, Ertaş, & Yücel, 2017). İlgili eğrinin hareketi, 8 mm yükseklikten başlayan ve 70° sonunda sikloid fonksiyonu ile kapama yapan, 220° boyunca alt ölü konumda seyreden ve kapamaya simetrik olarak 70° sonunda sikloid açma eğrisiyle 8 mm yüksekliğe geri tırmanan bir senaryodan oluşmaktadır. İlgili senaryoya ait veriler Çizelge Ek-2’de verilmektedir. 0 mm’ye karşılık gelen açma değerleri çizelgeye dâhil edilmemiştir.

Çizelge Ek-2: Hareket fonksiyonu verileri

θ (°)	Konum S (mm)		θ (°)	Konum S (mm)		θ (°)	Konum S (mm)	
	Kapa	Açma		Kapa	Açma		Kapa	Açma
0	8.000	8.0000	24	6.319	6.3198	48	1.343	1.3435
1	7.999	7.9998	25	6.138	6.1383	49	1.189	1.1891
2	7.998	7.9988	26	5.948	5.9489	50	1.044	1.0444
3	7.995	7.9959	27	5.752	5.7520	51	0.909	0.9097
4	7.990	7.9902	28	5.548	5.5484	52	0.785	0.7852
5	7.981	7.9810	29	5.338	5.3388	53	0.670	0.6709
6	7.967	7.9673	30	5.123	5.1239	54	0.566	0.5669
7	7.948	7.9484	31	4.904	4.9045	55	0.473	0.4730
8	7.923	7.9234	32	4.681	4.6816	56	0.389	0.3891
9	7.891	7.8917	33	4.455	4.4559	57	0.314	0.3149
10	7.852	7.8526	34	4.228	4.2284	58	0.250	0.2502
11	7.805	7.8055	35	4.000	4.0000	59	0.194	0.1945
12	7.749	7.7498	36	3.771	3.7716	60	0.147	0.1474
13	7.685	7.6851	37	3.544	3.5441	61	0.108	0.1083
14	7.610	7.6109	38	3.318	3.3184	62	0.076	0.0766
15	7.527	7.5270	39	3.095	3.0955	63	0.051	0.0516

16	7.433	7.4331	40	2.876	2.8761	64	0.032	0.0328
17	7.329	7.3291	41	2.661	2.6612	65	0.019	0.0190
18	7.214	7.2148	42	2.451	2.4516	66	0.009	0.0098
19	7.090	7.0903	43	2.248	2.2480	67	0.004	0.0041
20	6.955	6.9556	44	2.051	2.0511	68	0.001	0.0012
21	6.810	6.8109	45	1.861	1.8617	69	0.000	0.0002
22	6.656	6.6565	46	1.680	1.6803	70	0.000	0.0000
23	6.492	6.4926	47	1.507	1.5074	71	0.000	0.0000

Ek-3 Şekil 2.11'in (C-spline, alt polinomlar ve polinomların sürekli olduğu uç noktalar) oluşturulmasında kullanılan MATLAB® komutları

```
load sikloid70
S80=S(1:80);
thetaR80=thetaR(1:80);
cs80=csapi([thetaR80(1:10:70);thetaR80(71:end)],...
[S80(1:10:70);S80(71:end)]);
SS80=fnval(cs80,thetaR80);
plot(thetaR80,SS80,'linewidth',3);
hold on
P1=cs80.coefs(1,:);
P2=cs80.coefs(2,:);
P3=cs80.coefs(3,:);
P4=cs80.coefs(4,:);
P5=cs80.coefs(5,:);
P6=cs80.coefs(6,:);
P7=cs80.coefs(7,:);
y1n=polyval(P1,thetaR(1)-pi/9:pi/180:thetaR(11)+pi/9);
P2n=poltrns(P2,[0 thetaR(11)],[thetaR(11) thetaR(21)]);
y2n=polyval(P2n,thetaR(11)-pi/9:pi/180:thetaR(21)+pi/9);
P3n=poltrns(P3,[0 thetaR(11)],[thetaR(21) thetaR(31)]);
y3n=polyval(P3n,thetaR(21)-pi/9:pi/180:thetaR(31)+pi/9);
P4n=poltrns(P4,[0 thetaR(11)],[thetaR(31) thetaR(41)]);
y4n=polyval(P4n,thetaR(31)-pi/9:pi/180:thetaR(41)+pi/9);
P5n=poltrns(P5,[0 thetaR(11)],[thetaR(41) thetaR(51)]);
y5n=polyval(P5n,thetaR(41)-pi/9:pi/180:thetaR(51)+pi/9);
P6n=poltrns(P6,[0 thetaR(11)],[thetaR(51) thetaR(61)]);
y6n=polyval(P6n,thetaR(51)-pi/9:pi/180:thetaR(61)+pi/9);
P7n=poltrns(P7,[0 thetaR(11)],[thetaR(61) thetaR(71)]);
y7n=polyval(P7n,thetaR(61)-pi/9:pi/180:thetaR(71)+pi/9);
plot(thetaR(1)-pi/9:pi/180:thetaR(11)+pi/9,y1n)
plot(thetaR(11)-pi/9:pi/180:thetaR(21)+pi/9,y2n)
plot(thetaR(21)-pi/9:pi/180:thetaR(31)+pi/9,y3n)
plot(thetaR(31)-pi/9:pi/180:thetaR(41)+pi/9,y4n)
plot(thetaR(41)-pi/9:pi/180:thetaR(51)+pi/9,y5n)
```

```
plot(thetaR(51)-pi/9:pi/180:thetaR(61)+pi/9,y6n)  
plot(thetaR(61)-pi/9:pi/180:thetaR(71)+pi/9,y7n)
```

```
plot(thetaR(1:10:71),S(1:10:71),'ko')
```



Ek-4 Kam profiline parametrik eğri uydurmak için kullanılan örnek MATLAB® komutları

```
load sikloid70

%% chord length parameterization in 10 degrees
prof=thetaS2XYrlr(thetaD,S,Rc,Rf);
X10=prof(1:10:end,1)';
Y10=prof(1:10:end,2)';
xy=[X10;Y10];
df=diff(xy,1,2);
t=cumsum([0, sqrt([1,1]*(df.*df))]);
cs10=csapi(t,xy);
fnplt(cs10), hold on, plot(prof(:,1),prof(:,2)),
plot(X10,Y10,'o')
axis equal
XY=fnval(cs10,ti);
figure, plot(XY(1,:),XY(2,:),'.');
axis equal

%% angle parameterization with 20 degrees
t=0:20:360;
X20=prof(1:20:end,1)';
Y20=prof(1:20:end,2)';
xy=[X20;Y20];
cs20=csapi(t,xy);
figure, fnplt(cs20), hold on, plot(prof(:,1),prof(:,2)),
plot(X20,Y20,'o')
axis equal
```

Ek-5 Kinematik analizde analitik yaklaşım yoluyla elde edilen eğrilerin MATLAB® komutları

```
theta=0:pi/180:2*pi;
beta=2*pi;
h=8;
%% sikloid
Kin.Skl.S=h/pi*(pi*theta./beta-
1/2*sin(2*pi*theta./beta));
Kin.Skl.v=h/beta*(1-cos(2*pi*theta./beta));
Kin.Skl.a=2*pi*h/beta^2*(sin(2*pi*theta/beta));
Kin.Skl.j=4*pi^2*h/beta^3*cos(2*pi*theta/beta);
subplot(4,1,1)
plot(theta,Kin.Skl.S), axis tight
title('Sikloid')
subplot(4,1,2), axis tight
plot(theta,Kin.Skl.v)
subplot(4,1,3), axis tight
plot(theta,Kin.Skl.a)
subplot(4,1,4), axis tight
plot(theta,Kin.Skl.j)

%% harmonik
Kin.Hrm.S=h/2*(1-cos(pi*theta/beta));
Kin.Hrm.v=pi*h/(beta*2)*sin(pi*theta/beta);
Kin.Hrm.a=pi^2*h/(beta^2*2)*cos(pi*theta/beta);
Kin.Hrm.j=-pi^3*h/(beta^3*2)*sin(pi*theta/beta);
figure, subplot(4,1,1)
plot(theta,Kin.Hrm.S, 'k')
title('Basit Harmonik')
subplot(4,1,2), axis tight
plot(theta,Kin.Hrm.v, 'k')
subplot(4,1,3), axis tight
plot(theta,Kin.Hrm.a, 'k')
subplot(4,1,4), axis tight
plot(theta,Kin.Hrm.j, 'k')
```

```

%% harmonik 2
Kin.Hrm2.S=1/4-1/2*cos(pi*theta)+1/4*cos(2*pi*theta);
Kin.Hrm2.v=pi/2*(sin(pi*theta)-sin(2*pi*theta));
Kin.Hrm2.a=pi^2*(1/2*cos(pi*theta)-cos(2*pi*theta));
Kin.Hrm2.j=pi^3*(2*sin(2*pi*theta)-1/2*sin(pi*theta));
figure, subplot(4,1,1)
plot(theta,Kin.Hrm2.S,'k'), axis tight
title('Çift Harmonik')
subplot(4,1,2), axis tight
plot(theta,Kin.Hrm2.v,'k')
subplot(4,1,3), axis tight
plot(theta,Kin.Hrm2.a,'k')
subplot(4,1,4), axis tight
plot(theta,Kin.Hrm2.j,'k')

```

Ek-6 Polinom taşıma fonksiyonu ve örnek uygulama için MATLAB® komutları

```
function P=poltrns(Q,q,p)
% finds new coeffs of transformed 3rd degree polynomial
% in x axis
% Q is coefficients of the polynomial and size of 1x4
% which is form of
%  $Q(x)=a_3q^3+a_2q^2+a_1q+a_0$ 
% q is interval of the polynomial and size of 1x2 |  $x(1) < x(2)$ 
% p is interval of new polynomial and size of 1x2 |  $p(1) < p(2)$ 
% Pn is coefficients of new polynomial.
%
% Cemil KÖZKURT, All rights reserved
% 15.04.2017
% Tokat / TURKEY
% Example:
% q=[3 6]; p=[0 1];
% x=[3 4 5 6]; y=[1 2 5 10];
% Q=polyfit(x,y,3);
% xplot=q(1):0.01:q(end);
% yplot=polyval(Q,xplot);
% plot(x,y,'ok')
% hold on
% plot(xplot,yplot)
% P=poltrns(Q,q,p);
% pplot=p(1):0.01:p(end);
% pyplot=polyval(P,pplot);
% plot(pplot,pyplot)
% legend(strvcat('Points','Fitted Polynomial','Translated Polynomial'))
q0=q(1);
q3=q(2);
q1=q0+(q3-q0)/3;
q2=q0+2*(q3-q0)/3;
p0=p(1);
```

```

p3=p(2);
p1=p0+(p3-p0)/3;
p2=p0+2*(p3-p0)/3;
b3=Q(1); b2=Q(2); b1=Q(3); b0=Q(4);
b=[b3; b2; b1; b0];
A=[p0^3 p0^2 p0 1; p1^3 p1^2 p1 1; p2^3 p2^2 p2 1; p3^3
p3^2 p3 1];
c=[q0^3 q0^2 q0 1; q1^3 q1^2 q1 1; q2^3 q2^2 q2 1; q3^3
q3^2 q3 1]*b;
x=inv(A)*c; % Solution of Ax=c form linear equation.
P=x';

```



Ek-7 Şekil 2.17'nin (C-spline eğrisine ait alt polinomların PL ekseninde görünümü) oluşturulmasında kullanılan komutlar

```
load thesisSikloid70
S80=S(1:80);
thetaR80=thetaR(1:80);
cs80=csapi([thetaR80(1:10:70);thetaR80(71:end)],...
[S80(1:10:70);S80(71:end)]);
SS80=fnval(cs80,thetaR80);
plot(thetaR80,SS80,'linewidth',1);
hold on
P1=cs80.coefs(1,:);
P2=cs80.coefs(2,:);
P3=cs80.coefs(3,:);
P4=cs80.coefs(4,:);
P5=cs80.coefs(5,:);
P6=cs80.coefs(6,:);
P7=cs80.coefs(7,:);
y1n=polyval(P1,thetaR(1):pi/180:thetaR(11));
y2n=polyval(P2,thetaR(1):pi/180:thetaR(11));
y3n=polyval(P3,thetaR(1):pi/180:thetaR(11));
y4n=polyval(P4,thetaR(1):pi/180:thetaR(11));
y5n=polyval(P5,thetaR(1):pi/180:thetaR(11));
y6n=polyval(P6,thetaR(1):pi/180:thetaR(11));
y7n=polyval(P7,thetaR(1):pi/180:thetaR(11));
plot(thetaR(1):pi/180:thetaR(11),y1n,'linewidth',2)
plot(thetaR(1):pi/180:thetaR(11),y2n,'linewidth',2)
plot(thetaR(1):pi/180:thetaR(11),y3n,'linewidth',2)
plot(thetaR(1):pi/180:thetaR(11),y4n,'linewidth',2)
plot(thetaR(1):pi/180:thetaR(11),y5n,'linewidth',2)
plot(thetaR(1):pi/180:thetaR(11),y6n,'linewidth',2)
plot(thetaR(1):pi/180:thetaR(11),y7n,'linewidth',2)
plot(thetaR(1:10:71),Sg(1:10:71),'ko')
xd=thetaR(1:10:71);
```


Ek-8 Düz izleyicili mekanizmada ters dönüşüm için komut bütünü

```
for n=1:length(Y)

    Sinv(n)=max(Ym)-Rc;

    Xf=[-5;-5;-Rc;-Rc;Rc;Rc;5;5];
    s=max(Ym);
    Yf=[s+30;s+10;s+10;s;s;s+10;s+10;s+30];
    plot(Xf,Yf)
    hold on
    plot(Xm,Ym,'r')
    axis([-30 30 -30 50])
    N(n)=getframe;
    hold off
    XY=rotd([X Y],n*t);
    Xm=XY(:,1);
    Ym=XY(:,2);
end

figure
plot(thetaD,S,'r')
hold on
plot(thetaD,Sinv)
%      plot(thetaD,Sinv,'m')
figure, bar(abs(Sinv-S))
```

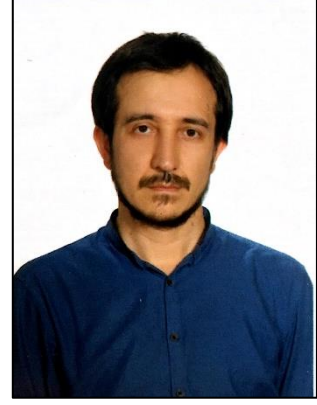
Ek-9: Yuvarlak izleyicili mekanizmada ters dönüşüm için komut bütünü

```
load sikloid70
Rg=50;
d=1;
[X,Y,~,~]=thetaS2XYrlr_anlt(thetaR,S,Rc,Rf);
X=X(1:end-1);
Y=Y(1:end-1);
Og=zeros(size(S));
for m=0:359
    XY=rotd([X Y],d);
    X=XY(:,1);
    Y=XY(:,2);
    Xp=X(X>=Rc);
    Yp=Y(X>=Rc);
    Xp=Xp(abs(Yp)<Rg);
    Yp=Yp(abs(Yp)<Rg);
    XOg=[Xp Yp];
    for n=1:numel(Xp)
        XOg(n,:)=roots([1 -2*Xp(n) Xp(n)^2+Yp(n)^2-
Rg^2]);
    end
    XOg=XOg(XOg>=0);
    D=zeros(size(XOg));
    for n=1:numel(XOg)
        D(:,n)=sqrt((XOg(n)-Xp).^2+(0-Yp).^2);
    end
    mnD=abs(Rg-min(D));
    Og(m+1)=XOg(mnD==min(mnD));
end
Og(end)=Og(1);
Sg=Og-Rg-Rc;
```

Ek-10: NC komutlarında kullanılan c-spline polinomlarının karşılaştırma amacıyla çizdirilmesinde kullanılan MATLAB® komut bütünü

```
load thesisSikloid70
Sn=Sg([181:end 2:181]);
S5=Sn(1:5:361);
thetaR5=thetaR(1:5:361);
cs5=csapi(thetaR5,S5);
coefs=cs5.coefs;
coefs=round(coefs*10000)/10000;
SS5=fnval(cs5,thetaR5);
plot(rad2deg(thetaR5),SS5,'ko');
hold on
plot(thetaD,Sn,'*-')
P=zeros(size(coefs));
Pn=P;
yn=[];
for n=1:length(coefs)
    P(n,:)=coefs(n,:);
    Pn(n,:)=poltrns(P(n,:),[0 thetaR(6)],...
        [thetaR((n-1)*5+1) thetaR(n*5+1)]);
    y(n,:)=polyval(Pn(n,:),...
        thetaR((n-1)*5+1):pi/180:thetaR(n*5+1));
    yn=[yn y(n,1:end-1)];
end
yn=[yn yn(1)]';
plot(thetaD,yn,'rx-')
figure,bar(abs(Sn-yn))
```

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Cemil KÖZKURT
Doğum Yeri ve Tarihi	Bursa, 23.04.1980
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, 60250 Merkez / TOKAT
E-posta Adresi	cemilkozkurt@gmail.com, cemil.kozkurt@gop.edu.tr

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Tophane Anadolu Teknik Lisesi, Elektronik Bölümü, 2000
Lisans-1	Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Mekatronik Eğitimi Bölümü Mekatronik Öğretmenliği Pr. 2008
Lisans-2	Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi/Mekatronik Mühendisliği Bölümü/Mekatronik Mühendisliği 2014

Yüksek Lisans

Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği 2012

İş Tecrübesi

Gaziosmanpaşa
Üniversitesi

Araştırma Görevlisi, 2010 - ...

FİGES A.Ş.

Uygulama ve Proje Mühendisi, Sistem modelleme
gurubu, 2008-2010

Yayınlar

Ulusal

CEMİL KÖZKURT, AHMET FENERCİOĞLU, MEHMET AKAR (2012).
Otomatik Depolama Sistemlerindeki Robotlar için Servo Motor Seçimi.
Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 1(1), 97-104.

SOYASLAN MÜCAHİT, **KÖZKURT CEMİL**, FENERCİOĞLU AHMET (2015).
Otomatik Depolama ve Boşaltma Sistemleri ODBS Depo Kurulumu ve Performans
Çalışmaları Üzerine Araştırma. Academic Platform Journal of Engineering and
Science

Uluslararası

SOYASLAN MÜCAHİT, **KÖZKURT CEMİL**, FENERCİOĞLU AHMET, A

New Truck Based Order Picking Model for Automated Storage and Retrieval System (AS/RS). Journal of Engineering Research (Accepted)

KÖZKURT CEMİL, ERTAŞ HACI ALİ, YÜCEL SERPİL (2017). Analysis of Graphical Approach for Cam Profile Determination. Journal of New Results in Science, 6(1), 32-46.

ÖZGÜVEN MEHMET METİN, TAN MUSTAFA, **KÖZKURT CEMİL**, YARDIM MUZAFFER HAKAN, ÖZSOY MUSTAFA, SABANCI ERAY (2016). Çok Amaçlı Tarım Robotunun Geliştirilmesi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 2016, 108-116.

Kongreler ve Bildiriler

Ulusal

Uluslararası

KÖZKURT CEMİL, SOYASLAN MÜCAHİT Euler Bilekli Scara Robot Kolu için Kinematik Analiz Yazılımı Geliştirilmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium, IATS 2011

SOYASLAN MÜCAHİT, FENERCİOĞLU AHMET, **KÖZKURT CEMİL** An Approach of Control System for Automated Storage and Retrieval System AS RS. International Conference on Electronics, Robotics and Mechatronics Engineering

KÖZKURT CEMİL, FENERCİOĞLU AHMET, SOYASLAN MÜCAHİT Structural Analysis of Warehouse Rack Construction for Heavy Loads. International Conference on Mechanical, Industrial and Manufacturing Engineering

FENERCİOĞLU AHMET, SOYASLAN MÜCAHİT, **KÖZKURT CEMİL** Automatic Storage and Retrieval System AS/RS Based on Cartesian Robot for Liquid Food Industry. 12th International Workshop on Research and Education in Mechatronics

FENERCİOĞLU AHMET, SOYASLAN MÜCAHİT, **KÖZKURT CEMİL** Project

Based Graduate Education in Mechatronics Engineering, A Good Practice in Turkey. International Conference on Education in Mechatronics

KÖZKURT CEMİL, AKAR MEHMET (2017). SIMULATION OF BROKEN ROTOR BAR FAULT IN INDUCTION MOTORS. 5th International Conference on Advanced Technology & Sciences

KÖZKURT CEMİL, FENERCİOĞLU AHMET (2017). MULTIDISCIPLINARY DESIGN APPROACH FOR VENTRICULAR ASSIST DEVICE. 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies

KÖZKURT CEMİL, ŞİMŞEK MİTHAT (2017). MOTOR SELECTION FOR ELECTRICAL VEHICLE ACCORDING TO RESULTS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS. 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies

Ödüller, Teşvikler ve Üyelikler

Efficiency Challenge Electromobile 2017, Jury Award, TÜBİTAK, 2017

BEST PAPER AWARD, 5th International Conference on Advanced Technology & Sciences, 2017