

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## TAKIM YOLU OLUŞTURMA ALGORİTMALARI

Endüstri Mühendisi Hasan ÖZÇELİK

F.B.E Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında  
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erhan ALTAN (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mesut ÖZGÜRLER

Doç. Dr. Ferhat DİKMEN

İSTANBUL, 2006

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. CNC TEKNOLOJİSİ .....	3
2.1 CAD/CAM Sistemleri .....	5
2.2 Programlama .....	6
2.2.1 İş Akışı .....	6
2.2.2 Programların Yapısı .....	7
2.2.3 Koordinat Sistemleri ve Ölçüler .....	9
2.2.3.1 CNC Tezgahlarda Koordinat Sistemleri - Referans Noktası .....	9
3. TAKIM YOLU VE OLUŞTURULMASI .....	12
3.1 Takım Yolu Nedir? .....	12
3.2 Takım Yolu Oluşturmada Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar .....	15
3.2.1 İşleme Toleransı .....	15
3.2.2 Uygunluk .....	16
3.2.3 İnterpolatör Uyumluluğu .....	16
3.2.3.1 Pozisyonlama .....	16
3.2.3.2 Lineer (Doğrusal) İnterpolasyon .....	17
3.2.3.3 Dairesel İnterpolasyon .....	18
3.2.3.4 Helisel İnterpolasyon .....	20
3.3 Takım Yolu Oluşturma Algoritmaları .....	21
3.3.1 İzoparametrik Takım Yolları .....	21
3.3.2 İzoplaner Takım Yolları .....	24
3.3.3 Sabit Çıkıntı Yüksekliğine Göre Takım Yolları .....	25
3.3.4 Cep Boşaltma .....	27
3.3.5 Alan Doldurma Eğrileri .....	29
3.3.5.1 Moore Alan Doldurma Eğrileri .....	30
3.3.5.2 Sierpinski Alan Doldurma Eğrileri .....	31
3.3.5.3 Hilbert Alan Doldurma Eğrileri .....	31
3.3.5.4 Peano Alan Doldurma Eğrileri .....	32

3.4	İş Parçası İşleme Stratejileri .....	33
3.4.1	Kaba İşleme .....	33
3.4.1.1	Ofset Alan Temizleme .....	34
3.4.1.2	Profil Alan Temizleme .....	34
3.4.1.3	Raster Kaba İçin Otomatik Açı .....	35
3.4.1.4	Gereksiz Hareketleri Filtreleme.....	35
3.4.1.5	Paket İşleme.....	36
3.4.1.6	Skim Özelliği.....	36
3.4.1.7	Tam Ağız Kesmeleri Minimize Etme.....	37
3.4.1.8	Küçük Alan Filtresi .....	37
3.4.1.9	Kaba Talaşta Kalan Yerleri İşleyebilme.....	37
3.4.1.10	Yay Fit Etme.....	38
3.4.2	Finiş İşleme.....	38
3.4.2.1	Raster İşleme .....	38
3.4.2.2	Sabit Z İşleme .....	38
3.4.2.3	Shallow Region İşleme .....	39
3.4.2.4	Spiral İşleme .....	40
3.4.2.5	Radyal İşleme .....	40
3.4.2.6	Projeksiyon İşleme .....	40
3.4.2.7	Dönel İşleme.....	41
3.4.2.8	Rest İşleme .....	41
3.4.2.9	Köşe İşleme .....	42
3.4.2.10	Üç Boyutlu Ofset Finiş İşleme .....	42
3.4.2.11	Üç Boyutlu Ofset Spiral Finiş İşleme.....	43
3.4.2.12	Üç Boyutlu Ofset Pattern İşleme .....	43
3.4.2.13	Pencil İşleme.....	43
4.	TAKIM YOLU OLUŞTURMA ALGORİTMALARI ÜZERİNE YAPILAN ÖNEMLİ ÇALIŞMALAR.....	44
4.1	Üç Eksen Yüzey İşlemede Sabit Çıkıntı Yüksekliğine Göre Takım Yolu Oluşturma .....	44
4.2	Takım Yolu Oluşturma Algoritmalarında Alan Doldurma Eğrileri .....	50
4.3	Beş Eksenli NC İşleme İçin Alan Doldurma Eğrileri Kullanılarak Takım Yolu Oluşturma .....	58
4.4	Kalıp İşlemede C-Alan Yöntemi .....	66
4.4.1	CC Nokta Yaklaşımı.....	69
4.4.2	Direk Konumlandırma Yaklaşımı .....	69
4.5	Takım Temas Noktası Hızına Bağlı Takım Yolu Oluşturma .....	75
4.5.1	Doğrusal İnterpolatöre Bağlı Yöntem .....	80
4.5.2	Eğri İnterpolatörüne Bağlı Yöntem .....	82
4.5.3	Yüzey İnterpolatörüne Bağlı Yöntem.....	82
4.6	Cep İşlemede Takım Yolu Tabanlı Köşe Yuvarlama.....	83
4.7	Takım Yolu Oluşturma Algoritmaları Üzerine Yapılan Diğer Çalışmalar .....	87
4.7.1	Ölçülen Veriler ile Takım Yolu Oluşturma.....	87
4.7.2	Serbest Şekilli Yüzeylerin Finiş İşlenmesi İçin İzoparametrik Olmayan Üç Eksen Takım Yolu Oluşturma .....	88
4.7.3	Farklı Takım Yollarını Birleştirerek Takım Yolu Oluşturma .....	89
4.7.4	Takım Yolu ve Kesme Parametreleri ile Bir Dikey İşleme Merkezinde CNC Programlarının Süre Olarak Kısaltılması .....	91
5.	CEPLERİN KABA BOŞALTILMASI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR..	94

5.1	Alan Doldurma Eğrileri ile Geleneksel Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	94
5.2	İşleme Süresi Üzerine Yapılan Uygulama.....	100
6.	SONUÇLAR.....	105
KAYNAKLAR.....		107
İNTERNET KAYNAKLARI.....		109
ÖZGEÇMİŞ.....		110

## SİMGE LİSTESİ

$G$	Hazırlık fonksiyonu
$M$	Yardımcı fonksiyon
$N$	Blok sıra numarası
$n$	Mertebe
$S$	Hız fonksiyonu
$X$	Koordinat eksen
$Y$	Koordinat eksen
$Z$	Koordinat eksen

## KISALTMA LİSTESİ

ACW	Anti clockwise
APT	Automatically programmed tools
ATC	Otomatik takım değiştirme
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CAM	Bilgisayar destekli imalat
CNC	Bilgisayarlı sayısal kontrol
CPC	Sürekli iz kontrolü (Continuous path control)
CRT	Cathode ray tube
CW	Clockwise
DLS	Double loop strategy
EOB	Blok sonu (End of block)
HSS	Yüksek hız çeliği
IGES	Initial graphics exchange specification
MCU	Tezgah kontrol ünitesi
MIT	Massachusetts institute of technology
NC	Sayısal kontrol
NURBS	Nonuniform rational B splines
ROM	Read only memory
SLS	Single loop strategy
UMO	Unit machining operation

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Mutlak koordinat sistemi.....	10
Şekil 2.2 Artımlı koordinat sistemi .....	11
Şekil 3.1 Takım pozisyonlama .....	17
Şekil 3.2 Değişik düzlemlerde dairesel interpolasyon.....	19
Şekil 3.3 Yay koordinatları.....	19
Şekil 3.4 Yay üzeri kesim işlemi .....	20
Şekil 3.5 İzoparametrik takım yolu .....	22
Şekil 3.6 İleri artış miktarı için giriş yaklaşımı .....	22
Şekil 3.7 İzoparametrik ve adaptif izoparametrik takım yolları.....	24
Şekil 3.8 İzoplaner takım yolları .....	24
Şekil 3.9 Sabit çıkıntı yüksekliğine göre takım yolları .....	26
Şekil 3.10 Cep boşaltma .....	28
Şekil 3.11 Mertebelerine göre Moore eğrileri (a) Mertebe 1 (b) Mertebe 2 (c) Mertebe 3.....	30
Şekil 3.12 Mertebelerine göre Sierpinski eğrileri (a) Mertebe 1 (b) Mertebe 2 (c) Mertebe 3	31
Şekil 3.13 Mertebelerine göre Hilbert eğrileri (a) Mertebe 1 (b) Mertebe 2 (c) Mertebe 3 (d) Mertebe 4.....	32
Şekil 3.14 Mertebelerine göre Peano eğrileri (a) Mertebe 1 (b) Mertebe 2 (c) Mertebe 3.....	33
Şekil 3.15 Ofset alan temizleme .....	34
Şekil 3.16 Profil alan temizleme .....	34
Şekil 3.17 Raster kaba için otomatik açılış .....	35
Şekil 3.18 Gereksiz hareketleri filtreleme .....	35
Şekil 3.19 Paket işleme.....	36
Şekil 3.20 Skim özelliği .....	36
Şekil 3.21 Kaba talaşta kalan yerleri işleyebilme.....	37
Şekil 3.22 Raster işleme .....	38
Şekil 3.23 Sabit Z işleme.....	39
Şekil 3.24 Shallow region işleme .....	39
Şekil 3.25 Spiral işleme .....	40
Şekil 3.26 Radyal işleme .....	40
Şekil 3.27 Projeksiyon işleme .....	41
Şekil 3.28 Dönel işleme.....	41
Şekil 3.29 Rest işleme .....	41
Şekil 3.30 Köşe işleme .....	42

Şekil 3.31 Üç boyutlu ofset finiş işleme.....	42
Şekil 3.32 Üç boyutlu ofset spiral finiş işleme.....	43
Şekil 3.33 Pencil işleme .....	43
Şekil 4.1 İşleme yüzeyi üzerindeki geometrik unsurlar .....	45
Şekil 4.2 Çıkıntı noktası belirleme .....	46
Şekil 4.3 Tipik komşu CL yolları ve çıkıntı eğrileri.....	47
Şekil 4.4 CL yolu boyunca iş koordinat sistemi (WCS) .....	48
Şekil 4.5 (a) İzoparametrik takım yolu, (b) İzoplaner takım yolu, (c) Sabit çıkıntı yüksekliğine göre oluşturulan takım yolu .....	49
Şekil 4.6 Alan doldurma eğrileri (a) Peano (b) Hilbert (c) Dragon.....	51
Şekil 4.8 Temel eğrilerde köşe kırma (a) Palmer eğrisi (b) Moore eğrisi.....	53
Şekil 4.9 Köşe mertebeleri (a) Mertebe 0,25 (b) Mertebe 0,5 (c) Mertebe 0,75 .....	54
Şekil 4.11 Moore eğrisine uygulanan köşe kırma mertebeleri (a) Mertebe 0,25 (b) Mertebe 0,5 (c) Mertebe 0,75.....	54
Şekil 4.12 İşleme esnasında gerçekleşen çarpma .....	55
Şekil 4.13 İşlenecek alan .....	56
Şekil 4.14 Takım yolunun işlenecek alana uygulanması.....	56
Şekil 4.15 Bezier yüzeyine uygulanan takım yolları (a) Moore eğrisi (b) Geleneksel yol (c) Çift yönlü geleneksel yol .....	56
Şekil 4.16 (a) v yönlü izoparametrik takım yolu (b) v yönlü izoparametrik takım yolu (c) İki yönlü izoparametrik takım yolu (d) Bulunan kafes .....	60
Şekil 4.17 Komşu takım yollarının üst üste gelmesi .....	61
Şekil 4.18 (a) Direk olmayan G grafiği küçük dolaşım ile sarılması (b) Sonuç grafik.....	61
Şekil 4.19 (a) Küçük karelerin birleştirilmesi ile elde edilen Hamiltonian yolu (b) Karşı gelen en küçük uzunluk ağacı (c) Oluşturulan takım yolu .....	63
Şekil 4.20 SFC kullanımı ile komşu takım yolu üzerindeki izler.....	63
Şekil 4.21 Takım yolu değişimi (a) Köşe dönüşü (sol yada sağ) (b) U dönüşü.....	64
Şekil 4.22 X-Y Düzleminde takımın kesici kenarının izleri .....	65
Şekil 4.23 SFC Takım yolu kullanılarak işlenen parça (a) Doğrulama kullanılmış (b) Doğrulama kullanılmamış .....	65
Şekil 4.24 İkinci uygulama için oluşturulan SFC takım yolu .....	66
Şekil 4.25 Birim talaş kaldırma yüzeyleri .....	68
Şekil 4.26 CL noktaları ve CL yüzeyi .....	68
Şekil 4.27 Dalma ve işlenmeyen alan bırakma.....	68
Şekil 4.28 Üç eksen işleme için C- Alan yapısı .....	70

Şekil 4.29 Ters Takım Ofset Yüzeyi (ITO).....	73
Şekil 4.30 Takım yolu oluşturmada mevcut yaklaşım .....	76
Şekil 4.31 İki boyutlu dairesel sınırların işlenmesi .....	78
Şekil 4.32 Dönel yüzey ve istenen CC yolları.....	79
Şekil 4.33 Belirlenmiş bir CC yolu ve karşılık gelen CL yolu.....	79
Şekil 4.34 CC ve CL hızları.....	80
Şekil 4.35 Önerilen takım yolu türetme yöntemi (Birinci ve ikinci yöntem).....	81
Şekil 4.36 Yüzey işleme komutlarını kabul eden bir yüzey interpolatörü .....	82
Şekil 4.37 Takım yolu geometrileri, (a) Doğru, (b) ACW Yay, (c) CW Yay .....	84
Şekil 4.38 Farklı köşe şekilleri .....	85
Şekil 4.39 İki nokta arası köşe açılımları.....	85
Şekil 4.40 Köşe açılımları ile kesme döngüleri arası ilişki, (a) SLS, (b) DLS .....	86
Şekil 4.41 Mevcut ve önerilen yaklaşım, (a) Geleneksel yaklaşım, (b) Önerilen yaklaşım.....	88
Şekil 4.42 İçbükey bölgelere takım dalması veya malzeme kalması .....	89
Şekil 4.43 Takım hareketleri .....	90
Şekil 4.44 Mevcut takım yolu oluşturma yaklaşımı .....	90
Şekil 4.45 İşleme için örnek parça .....	91
Şekil 4.46 Türetilen programın genel yapısı .....	92
Şekil 4.47 Kod editöründeki CNC parça programı .....	93
Şekil 5.1 MultiCam 48 Plus isimli router tezgahı .....	95
Şekil 5.2 Hilbert alan doldurma eğrisi ile oluşturulan takım yolu .....	95
Şekil 5.3 Hilbert alan doldurma eğrisi ile işlenen akrilik parça .....	96
Şekil 5.4 Peano alan doldurma eğrisi ile oluşturulan takım yolu .....	96
Şekil 5.5 Peano alan doldurma eğrisi ile işlenen akrilik parça.....	97
Şekil 5.6 Tek yönlü izoparametri ile oluşturulan takım yolu .....	97
Şekil 5.7 Tek yönlü izoparametri ile işlenen akrilik parça .....	98
Şekil 5.8 Ofsetleme ile oluşturulan takım yolu .....	98
Şekil 5.9 Ofsetleme ile işlenen akrilik parça .....	99
Şekil 5.10 Solid edge programında modellenen parça .....	101
Şekil 5.11 Çap 4mm'lik takım kullanılarak elde edilen takım yolu.....	101
Şekil 5.12 Çap 4mm'lik takım kullanılarak işlenen parça.....	102
Şekil 5.13 Çap 4mm ve 8mm'lik takımların kullanıldığı işleme için edilen takım yolu .....	102
Şekil 5.14 Çap 4mm ve 8mm'lik takımların kullanılması ile işlenen parça .....	103

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Dairesel interpolasyonda kullanılan komutlar.....	18
Çizelge 4.1 Toplam takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması .....	50
Çizelge 4.2 Takım yolu oluşturma yöntemlerinin karşılaştırılması .....	58
Çizelge 4.3 SFC takım yolunun izoparametrik takım yollarına göre performansı.....	66
Çizelge 4.4 Farklı takım yolları türetme yöntemlerinin karşılaştırılması.....	74
Çizelge 5.1 Uygulama yapılan takım yollarının karşılaştırılması .....	100
Çizelge 5.2 Farklı çaplı takımların kullanıldığı uygulamaların karşılaştırılması .....	103

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yapılmasında ve tezin hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerinden yararlanmam için elinden gelen her türlü yardımı yapan Sayın Prof.Dr.Erhan ALTAN Bey'e öncelikle teşekkür ederim. Ayrıca Standart Reklam firması Genel Müdürü Murat UYSAL Bey ve T.İ.M Reklamcılık İmalat Müdürü Tamer ÖZCAN Bey ile Çağ CAD/CAM çalışanlarından İlker TÛTEN Bey'e çalışmamda destek sağladıkları için teşekkürü borç bilirim. Bunun yanında aynı dönemde tez yapmış olduğum değerli okul arkadaşım Araş.Görv.Kerem ASMAZ Bey'e de her türlü lojistik desteğinden dolayı teşekkür ederim.

## ÖZET

Takım yolu oluşturma algoritmaları CAM uygulamalarında oldukça önemli bir yere sahip olup günümüzde maliyet ve verimliliği direk olarak etkileyen bir faktör olduğundan dolayı her geçen gün bu konuya verilen önem artmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle CNC ve CAM sistemleri üzerine değinilmiş daha sonra ise günümüzde en çok kullanılan takım yolu algoritmaları anlatılmıştır. Konu ile ilgili daha önce yapılmış olan önemli araştırmalara çalışma içinde yer verilmiş olup çalışmanın asıl amacı kaba frezelemede cep boşaltma için takım yolu yöntemlerini karşılaştırarak farklı bir işleme yöntemini incelemektir. Çalışmada özellikle farklı çaplı takımların işleme süresi üzerine olan etkilerine bakılmıştır.

Yapılmış olan ilk çalışmada Hilbert ve Peano alan doldurma eğrileri ile tek yönlü izoparametri ve ofsetleme yöntemlerini içeren dört farklı takım yolu oluşturma yöntemi karşılaştırılmış olup ofsetleme yöntemi burada olumlu sonuç vermiştir. İkinci çalışmada ise ofsetleme yöntemi üzerinde farklı çaplı takımlar kullanılmıştır. Bu uygulamalar ile önerilen yöntemin takım yolu algoritmalarında etkili olarak kullanılabilmesine karar verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Takım Yolu Oluşturma Algoritmaları, Bilgisayar Destekli İmalat (CAM)

## **ABSTRACT**

Toolpath generation algorithms have an important place under CAM applications. Nowadays it's getting wider the importance which is given to the toolpath generation algorithm. Because toolpath generation algorithms directly affect the productivity and production cost.

In the presented study, after CNC and CAM subjects have been looked over, the most important toolpath generation algorithms have been studied. Paper includes the related studies with toolpath generation algorithms. The main goal of the thesis is examination of the different toolpath generation method in rough machining of pockets. In this study it's especially studied the machining time of the tools which have different diameters.

Related with main goal, two applications have been examined. In the first application four different toolpath generation methods which are Hilbert, Peano space filling curves and isoparametric, offsetting tool paths have been compared. Offsetting method has been selected which has the shortest toolpath length. In the second application an aluminium part has been machined with two different tools that have different diameters and it's decided that proposed method can be employed in the toolpath applications.

**Keywords:** Toolpath Generation Algorithms, Computer Aided Manufacturing (CAM)

## 1. GİRİŞ

Bir ürünün imal edilip son kullanıcıya kadar gitmesi tasarım, proje, imalat ve sevkiyat gibi aşamalardan oluşmaktadır. Günümüz rekabet şartlarında şüphesiz ki bu aşamalar arasında geçen süre maliyet açısından en önemli unsurdur. Üretim teknolojilerindeki gelişmeler göstermektedir ki bu aşamalar için çeşitli bilgisayar destekli teknikler çok faydalı olabilmektedir.

Tasarım işlerinde kullanılan bilgisayar programları sürecin sonraki aşamasını takip eden projelendirmede girdi oluşturmakta ve yine proje aşamasında kullanılan bilgisayar destekli teknikler imalat aşamasındaki üretim yöntemlerine büyük ölçüde faydalı olabilmektedir.

Dünya rekabet şartlarında belli bir noktaya ulaşıp orada kalmak için üretici kuruluşlar rakiplerine göre daha hızlı, daha kaliteli ve daha düşük maliyette ürün imal etmek isteği ile her geçen gün değişik teknikler geliştirmektedirler. Tasarım, proje, imalat ve sevkiyat aşamalarından hız, kalite ve maliyeti etkileyen en önemli aşama şüphesiz ki üretim süreçleridir.

Üretim süreçleri üzerine geliştirilmiş teknolojiler hız ve kaliteyi arttırmakta bununla beraber müşteri memnuniyeti iyileşmekte ve tedarik süresi kısalmaktadır. Üretim süreçlerinde kullanılan teknolojiler arasında şüphesiz CNC (Computer Numerical Control) tezgahlarının yeri büyüktür. Bu tür tezgahlardan yararlanarak imal edilen ürünlerin kalitesi geleneksel yöntemlere göre çok daha iyi olmaktadır. Bu nedenle bu tezgahların üretim süreçlerinde belli bir yer alması kaçınılmaz olmuştur.

CNC tezgahlardan yararlanmak çoğu zaman en ekonomik yöntem olup, yüksek üretim hızı sağlamada, takım maliyetinin düşürülmesinde, hazırlık zamanlarının kısaltılmasında, fire miktarının azaltılmasında çok etkilidir. Parça üzerinde istenen hassasiyet bilgisayar programı tarafından sağlandığı için tezgahlar usta bir operatör gerektirmeksizin uzun süre çalışabilmektedir.

CNC tezgahların genel amacı, hammadde halinde bulunan bir malzemeye istenilen şekli vermektir. İstenilen şekil tezgah türüne bağlı olarak takım hareketi, parça hareketi veya takım ile parçanın beraber hareket etmesi sonucu verilebilir. CNC tezgahlar bu hareketlerin “G” ve “M” kodları ile gösterildiği programlar ile istenilen işlemleri gerçekleştirirler. “G” ve “M” kodlarından oluşan programlar takımın geçeceği yolları tezgaha tarif etmektedir. Bundan dolayı takım yolları CNC tezgahlarda önemli bir konuma sahiptir.

İşlenecek hammaddeye, parçaya, ve şekle bağlı olarak değişik takım yolu stratejileri seçilebilir. Seçilecek strateji ürünün maliyetini direk olarak etkileyeceği için bu aşamada oldukça dikkatli olunmalıdır.

## 2. CNC TEKNOLOJİSİ

Günümüz imalatında insan iş gücü gereksinimini azaltmak ve seri imalata yani fabrikasyona geçebilmek için makineler ve bu makineler için takım tezgahları tasarlanmıştır. Burada tasarımcıların amacı başta da değindiğimiz gibi insan gücünü daha hızlı, güvenilir ve verimli aletlerle değiştirmek olmuştur. Uzun yıllar bu tezgahlarda köklü bir değişiklik olmamıştır. Ama sürekli bir gelişme kaydedilmiştir. Çağımız bilgisayar teknolojisine bürünerek, metal kesme işlerinde bir çağ açmış olmaktadır. Bu olay genellikle “Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol” olarak isimlendirilir ve kısaca CNC olarak adlandırılır. Bu tür takım tezgahları diğer sanayi kollarından sonrada tarım makineleri sanayine sıçramış ve üreticileri bu tezgahlara yatırıma sevk etmiştir. Aşağıda CNC tezgahların tanıtılması, tezgah çeşitleri ve programlama teknikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Nümerik kontrol fikri II. Dünya savaşının sonlarında ABD hava kuvvetlerinin ihtiyacı olan kompleks uçak parçalarının üretimi için ortaya atılmıştır. Çünkü bu tür parçaların o günkü mevcut imalat tezgahları ile üretilmesi mümkün değildi. Bunun gerçekleştirilmesi için Parsons Corporation ve MIT (Massachusetts Institute of Tecnnology) ortak çalışmalara başlamıştır. 1952 yılında ilk olarak bir Cincinnati-Hydtrotel freze tezgahını Nümerik Kontrol ile kombine ederek bu alandaki ilk başarılı çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Bu tarihten itibaren pek çok takım tezgahı imalatçısı Nümerik Kontrollü tezgah imalatına başladı. İlk önceleri NC takım tezgahlarında vakumlu tüpler, elektrik röleleri, komplike kontrol ara yüzleri kullanılıyordu. Ancak bunların sık sık tamirleri hatta yenilenmeleri gerekiyordu. Daha sonraları NC takım tezgahlarında daha kullanışlı olan minyatür elektronik tüp ve yekpare devreler kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler Nümerik Kontrollü sistemleri de etkilemiştir. Artık günümüzde NC tezgahlarda daha ileri düzeyde geliştirilmiş olan entegre devre elemanları, ucuz ve güvenilir olan donanımlar kullanılmaktadır. ROM (Read Only Memory) teknolojisinin kullanılmaya başlanmasıyla da programların hafızada saklanması mümkün olmuştur. Sonuç olarak bu sistemli gelişmeler CNC'nin doğmasına öncülük etmiştir. CNC daha sonra torna, matkap vb. takım tezgahlarında yaygın olarak kullanılmaya başlandı.

Bilgisayarlı Sayısal Kontrol takım tezgahlarının bilgisayar yardımlı sayısal komutlarla kontrol edilmesi mantığı CNC olarak isimlendirilmektedir. CNC Tezgahlarda, NC tezgahlardan farklı olarak bir bilgisayarlı kontrol ünitesi bulunur. Böylece NC programları, kesicilerle ilgili bazı teknik ve ofset bilgiler kalıcı olarak tezgah hafızasında saklanabilir. Ayrıca imalatın her aşamasında programa müdahale edilir ve programda istenilen değişiklikler yapılır.

Bilgisayardaki programda, tezgahların hareketlerini kontrol etmek için harfler ve sayılardan oluşan komutlar kullanılır. (G ve M harfleri). Örneğin programda “G00” kodu, takımın talaş kaldırmadan, koordinatları belirtilen noktaya gitmesini sağlamak için kullanılır. Aynı şekilde “M03”; takımın bağlı bulunduğu mili, saat yönünde harekete başlatır ve belirli bir devirde dönmelerini sağlar. “M05” kodu ise, takımın bağlı bulunduğu milin durmasını sağlar.

Endüstride kullanılan tüm CNC tezgahlarda, “G” ve “M” kodları olarak ifade edilen bu özel kodlar ISO tarafından standartlaştırılmıştır.

İlk CNC freze tezgahından günümüze NC teknolojisi hemen her alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalardan bazıları şunlardır; tornalama, frezeleme, delme, taşlama, alevle kesme, bükme, form verme, üç boyutlu ölçme, elektro erozyon ve robot uygulamaları.

Bilgisayarlı nümerik kontrolde temel düşünce takım tezgahlarının sayı, harf vb. sembollerden meydana gelen ve belirli bir mantığa göre kodlanmış komutlar yardımıyla işletilmesidir.

Bilgisayarlı nümerik kontrolde tezgah kontrol ünitesinin bilgisayarlaştırılması sonucu programların muhafaza edilebilmelerinin yanında parça üretiminin her aşamasında programı durdurma, programda gerekli olabilecek değişiklikleri yapabilme, programa kalınan yerden tekrar devam edebilme ve programı son şekliyle hafızada saklamak mümkündür. Bu nedenle programın kontrol ünitesine bir kez yüklenmesi yeterlidir.

CNC tezgahların günümüzde oldukça yaygın kullanılmasının nedeni olarak aşağıda verilen avantajları sıralayabiliriz.

- Programların Kaydedilmesi
- Düzenleme
- Çevrim Fonksiyonu
- Alt Programlar
- Kesici Bilgileri
- İdeal İşleme Koşulu
- Simülasyon
- Diğer Üniteler İle İletişim
- Arızanın Bulunması
- Kesicilerin Otomatik Değişimi

Her sistemde olduğu gibi CNC tezgah ve sistemlerinin avantajları yanında bazı dezavantajları mevcuttur. Bunlar şunlardır;

- Detaylı bir imalat planı gereklidir.
- Pahalı bir yatırımı gerektirir.
- Tezgahın saat ücreti yüksektir.
- Geleneksel tezgahlara kıyaslandığında daha titiz kullanım ve bakım isterler.
- Kesme hızları yüksek ve kaliteli kesicilerin kullanılması gerekir.
- Periyodik bakımları uzman ve yetkili kişiler tarafından düzenli olarak yapılmalıdır.

## 2.1 CAD/CAM Sistemleri

Tezgah üreticileri, işgücü kaybını en aza indirmek, programlama maliyetlerini düşürmek amacı ile, birçok işlemi tezgah üzerinde, yardımcı programlara gerek kalmadan yapabilecek özel programlar geliştirmektedirler. Karmaşık iş parçalarının üretilmesi amacı ile geliştirilen bilgisayar programları, karmaşık profil ve yüzeylerin tasarlanmasında oldukça etkin olmalarına karşın, yüksek tasarım ve imalat bilgisi beklemektedirler (CAD/CAM sistemleri gibi). Özellikle seri üretim şartlarında tasarım ve kullanım maliyetleri yüksek olan CAM sistemlerine alternatif olarak iş parçası üretim metotlarını belirleyen programlar, zaman ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Basit geometrilerin bir dizi matematiksel ifade ve standart kalıpların kullanılması ile CNC tezgah için gerekli iş parçası üretim kodları oluşturulabilmektedir. Bu tür yöntemleri, özellikle tezgah üreticileri “Diyalog Yöntemi” veya “İnteraktif Programlama” yöntemleri adı altında tezgah işletim sistemlerinde kullanmaktadır.

CAD/CAM sistemleri, işletmelerdeki verimliliği arttırmak için tasarım ve imalat sürecinin bilgisayar ortamında birleştirilmesi işlemidir. CAD/CAM kullanıcısı, tasarım ve üretim yazılımlarını kullanarak, önce ürünün teknik resmini ve modellemesini gerçekleştirir. Daha sonra bu çizimden yararlanarak parça üretimi için gerekli olan NC kodlarını bilgisayar yardımıyla üretir.

CAD/CAM sistemleri ayrıca üç boyutlu modellerin montajını görme ve analiz etme kolaylığı sağlar böylece, iş parçasının, üretimine geçmeden önce güvenilirliği ve dayanıklılığı test edilerek olası hatalar baştan düzeltilebilir.

CAD/CAM sistemlerinde model yüzeyi, matematiksel temsiller ile oluşturulmaktadır. Parçanın kabuğu (shell) bir çadırın sıkıca bağlanarak gerilmiş bezine benzetilebilir. Bu bezin oluşturduğu yüzey, yüzlerce düz yüzey ile tanımlanır. Eğri yüzeyleri tanımlamak için

kullanılan düz yüzeylerin hesaplanmasında CAM sistemleri, NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) gibi çeşitli eğrilerden yararlanır.

CAD/CAM sistemlerindeki gelişmeler 1950'li yıllarda MIT'in NC tezgahı üretimi çalışmaları sırasında başlamıştır. MIT, televizyona benzeyen ilk grafik ekranı (CRT- cathode ray tube) Whirlwind bilgisayara bağlayarak basit resimler üretmiştir. Bunu, en yaygın programlama dili APT'nin (Automatically programmed tools) geliştirilmesi izlemiştir.

Ivan Sutherland'ın 1962 yılında tez olarak yayınladığı Sketch pad sistem, CAD'in kilometre taşıdır. Çeşitli grupların bu tez üzerinde yaptıkları geliştirme çalışmaları sonucu Bilgisayar destekli Tasarım (CAD) kavramı ortaya çıkmış ve kullanılmaya başlanmıştır. 1970 yıllardaki gelişmeler arasında IGES (Initial Graphics Exchange Specification) kullanımı da yer almıştır. 1970'ler ayrıca bilgisayar tasarım uygulamaları olarak bilinir. Turnkey (Hazır) sistemler, tasarımcılara model ve çizim yapabilmeleri için üç boyutlu merkezleştirilmiş veri tabanları sağladı. Bu sistemler başlangıçta tel çerçeve (wireframe) modellemeye destek vermekte, yüzey (surface) uygulamaları ise kısıtlı kalmaktaydı. Bu nedenle yalnız temel tasarım uygulamaları yapılabilmekteydi, ama endüstrinin gerçek tasarım sorunlarını çözmekten uzaktı. 1980'li yıllar CAD/CAM teknolojisinin başını çektiği yıllar olarak sayılabilir. Bu dönemde yeni teoriler ve algoritmalar geliştirildi. Temel hedef, geleceğin fabrikasını kurmak için tasarım ve imalatın değişik öğelerini bütünleştirerek otomasyona geçmektir.

## **2.2 Programlama**

NC tezgahların bilgisayarlar ile bütünleştirilmesi sonucu ortaya çıkan CNC tezgahlar, parçayı istenen şekle getirebilmesi için bazı komutlara ihtiyaç duymaktadır. Bu komutlar bilgisayar vasıtası ile tezgaha aktarıldığından belirli bir mantık sınırları içerisinde olmalıdırlar. Aşağıda parçaya istenen şekli vermek için gerekli olan programın nasıl yazıldığı hususunda bilgiler verilmektedir.

### **2.2.1 İş Akışı**

CNC tezgahı kullanarak parça işlemek için parçanın NC programını yapmak ve bu programdaki komutlara göre tezgahı çalıştırmak gereklidir. Aşağıda kısaca ilgili iş akışı verilmiştir;

- Parçanın teknik resmi tezgah koordinatlarına göre hazırlanır.
- Parçanın teknik resmine göre operasyon planı yapılır.

- Operasyon planı ve resme göre parça programı yazılır.
- Program direk kablo bağlantısı yada elle tuşlayarak tezgahın kontrol ünitesinin hafızasına aktarılır.
- İş parçası ve takımlar tezgaha bağlanır.
- İş parçası ve takımların ölçümleri yapılır.
- Programdaki komutlara göre tezgah çalıştırılır ve parça işlenir.

### 2.2.2 Programların Yapısı

Tezgahı çalıştırmak için CNC üniteye verilen komutlara program denir. Programda verilen komutların sırasına göre takımlar hareket eder, yardımcı fonksiyonlar çalışır.

Bir işlemi yapmak için verilen komutlar dizisine blok denir. Her programın başında program numarası bulunmaktadır. Program numarası "O" harfi ile birlikte dört rakamlı bir sayıdan meydana gelmiştir ve programların birbirlerinden ayırt edilmesine yarar.

Her programın sonunda ise Program sonu komutu olan "M30" veya "M02" bulunur.

Hafızaya yüklenebilecek program sayısı kullanılan kumanda ünitesine ve hafızanın kapasitesine bağlıdır. Yapılan bir programda bulunan blok yapısında aşağıdaki unsurlar bulunabilir.

N: Blok (sıra) numarası

G: G-(hazırlık) fonksiyonu

X, Z: Pozisyon komutları

M: M-(yardımcı) fonksiyonu

S: S-(hız) fonksiyonu

T: T-(takım) fonksiyonu

; : Blok sonu kodu (işareti)

Bir blok diğerlerinden blok sonu kodu işareti ile ayrılır. Blok sonu kodu için (E.O.B.=End of the block) " ; " işareti kullanılır. Ancak bu işaret bazı normlarda değişmektedir.

Ana ve alt programın yapısı ise aşağıda anlatıldığı gibidir;

Aynı işlemler bir programın değişik yerlerinde aynen tekrarlanıyorsa alt programlar kullanılır. Alt programın başında ana programda olduğu gibi “O” harfi ve dört rakamlı sayıdan meydana gelmiş bir program numarası, sonunda ise alt program sonu komutu olan “M99” bulunur. Ana programda işlemler yapılırken M98 “P” alt program çağırma komutu okununca, alt programların işlemleri yapılmaya başlanır. Alt program işlenip bitirilince “M99” komutu ile ana programa dönülür. Ana programın işlemlerine kalındığı yerden devam edilir. Örnek olarak

M98 P- - Q - - L- -; Komutunda;

P : Alt programın numarası

Q : Alt programın blok numarası

L : Alt programın tekrarlanma sayısı

Bu komut ile “P” alt program numarası çağırılır. Alt program “Q” numaralı bloktan itibaren işlenmeye başlanır. Alt program L defa işlendikten sonra ana programa dönülür. Burada “P” değerine bir şey yazılmazsa, ana programdaki alt program çağırma bloğundan sonra gelen blok numarası alt program numarası olarak alınır. “Q” değerine bir şey yazılmazsa, alt program başından itibaren işlenir. “L” değerine bir şey yazılmazsa, alt program bir defa işlenir. Örneğin;

M99 P-- ;

Alt program sonunda bu komut kullanılırsa, ana programdan blok numarası “P” olan bloğa dönülür.

M-99 ;

Komutu ana programda kullanılırsa, ana programın başına dönülür.

M99 P-- ;

Bu komut ana program içerisinde kullanılırsa, ana programda “P” numaralı bloğa dönülür.

### 2.2.3 Koordinat Sistemleri ve Ölçüler

Koordinatlar (X, Y, Z) CNC tarafından koordinat sistemlerinin tanımlanmasına yarayan ve takımların, eksenler boyunca ilerlemesini sağlayan komutlardır. Koordinatlar, eksenlerin adreslerini bildiren harfler ile ilerlemenin yön ve miktarını bildiren sayılardan meydana gelmiştir.

#### 2.2.3.1 CNC Tezgahlarda Koordinat Sistemleri - Referans Noktası

CNC Tornalarda iki çeşit koordinat sistemi vardır:

- Tezgah koordinat sistemi
- İş parçası koordinat sistemi

Tezgahın mutlak sıfır noktası, tezgahın üzerinde imalatçısı tarafından seçilmiş sabit bir noktadır. Tezgahın mutlak sıfır noktasını orijin (başlangıç) alan koordinat sistemine, tezgah koordinat sistemi denir. Ayrıca CNC Tezgah üzerinde Referans Noktası denilen standart bir nokta tanımlanmıştır. Referans noktasının, mutlak sıfır noktasına göre uzaklıkları, tezgah imalatçıları tarafından her makine için ayrı ayrı tezgah parametreleri ile belirtilmiştir.

Tezgah, referans noktasına iki şekilde gönderilebilir:

- Elle referans noktasına gönderme işlemi, tezgah kumanda şalteri, referansa gitme modunda (konumunda) eksen tuşlarına basılarak yapılır. Genellikle tezgaha enerji verilip çalışmaya başlanacağı zaman kullanılır.
- Otomatik referans noktasına gönderme ise G28 program koduyla yapılır.

Tezgah bir defa referans noktasına gönderildiğinde, tezgah koordinat sistemi kumanda ünitesi tarafından tanınmış olur. Bu tanıma tezgahın enerjisi kesilinceye kadar devam eder. Yani reset veya iş parçası koordinatlarının tanımlanması gibi işlemlerle değişmez. Genellikle tezgahın mutlak sıfır noktası ile referans noktası farklı noktalardır.

Parçanın teknik resminin koordinatlarını kullanarak hazırlanan program komutları ile kontrol ünitesi, takımları hareket ettirir. Bunun sonucunda da iş parçası teknik resme göre işlenir. Ancak iş parçasının doğru işlenebilmesi için her iki koordinat sisteminin çakışması yada arasındaki farkın tespit edilmesi gereklidir.

CNC tornalarda, iş parçası koordinat sistemi genellikle iki şekilde seçilebilir:

- İş parçasının koordinat sisteminin sıfır noktası, tezgahın ayna yüzeyinde olabilir. Yani aynanın (iş milinin) merkezi  $x = 0.0$ , aynanın alın yüzeyi ise  $z = 0.0$  alınır

- İş parçasının koordinat sistemlerinin sıfır noktası olarak parçanın alın yüzeyi alınır. Yani ayna merkezi  $X = 0.0$ , iş parçasının finiş işlenmiş alın yüzeyi  $Z = 0.0$  alınır.

Parçanın teknik resmi çizilirken CNC Tornaların çalışma mantığı düşünülmelidir. Programlama sırasında tüm bilgiler teknik resim üzerinden alınacağından bu çok önemlidir. Bu nedenle resim çizilirken aşağıdaki kurallara uyulmalıdır.

- İş parçasının teknik resmi üzerinde, ölçme ve toleranslara uygun bir koordinat sistemi sıfır noktası belirlenmelidir. Bu nokta yukarıda anlatıldığı gibi iş parçasının alın ya da arka yüzeyinde olmalıdır. Ölçüm kolaylığı için kısıtlayıcı bir durum yok ise finiş işlenmiş alın yüzeyinin alınması uygundur.
- İş parçası üzerindeki tüm koordinat noktaları (ölçülerin değiştiği noktalar) tespit edilmelidir.
- İş parçasının koordinat sistemi sıfıra göre tüm ölçüler, resim üzerinde gösterilmelidir.
- Resim üzerinde ölçümlendirme yapılırken tolerans bindirmelerinin hesaplanması gereklidir. Yani toleransı bulunan iki uzunluk ölçüsünün toplam değeri gösterildiğinde, her iki tolerans değeri göz önüne alınmalıdır.
- CNC Tezgahın özelliklerine göre, açı ve dairesel işlemlerin başlangıç-bitiş noktalarının koordinatları hesaplanmalıdır. Tezgahların kontrol ünitesindeki isteğe bağlı ilave fonksiyonlar bu ihtiyacı doğurmayabilir.

Bu sistemde belirli bir nokta, başlangıç Noktası (0,0,0) olarak belirlenir ve takımın hareket edeceği noktaların başlangıç noktasına olan uzaklıkları dikkate alınır.

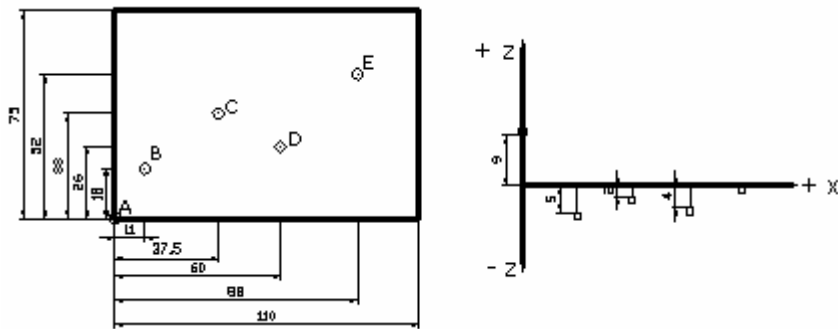
A noktasının yeri :  $X = 0, Y = 0, Z = 9$

B noktasının yeri :  $X = 11, Y = 18, Z = -5$

C noktasının yeri :  $X = 37,5, Y = 38, Z = -2$

D noktasının yeri :  $X = 60, Y = 26, Z = -4$

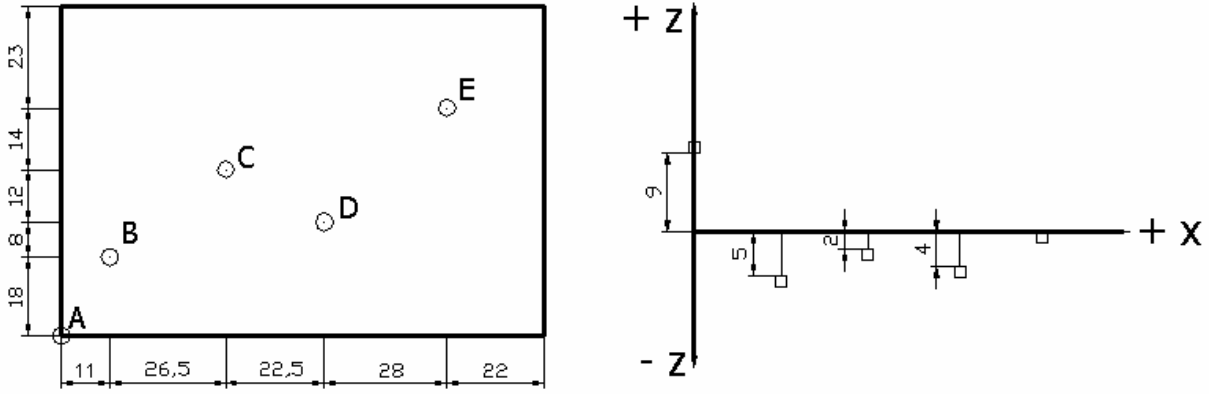
E noktasının yeri :  $X = 88, Y = 52, Z = 0$



Şekil 2.1 Mutlak koordinat sistemi

Artırlı-Kademeli (Incremental) Koordinat Sisteminde takımın hareket edeceği nokta, bir önce bulunduğu noktaya göre belirlenir. Başka bir ifade ile takımın bir önce bulunduğu nokta, başlangıç noktası (0,0,0) olarak kabul edilir ve bulunan noktanın bir önceki noktaya olan uzaklığı, noktanın sağında veya solunda yada yukarı veya aşağısında olmasına göre belirlenir.

Örnek olarak aşağıdaki şekilde takımın hareket ettiği noktaların koordinatlarını belirlersek:



Şekil 2.2 Artırlı koordinat sistemi

A noktasının başlangıç noktasına göre koordinatları:

A noktasının yeri :  $X = 0$ ,  $Y = 0$ ,  $Z = 9$

B noktasının yeri ( A noktasına göre ) :  $X = 11$ ,  $Y = 18$ ,  $Z = -14$

C noktasının yeri ( B noktasına göre ) :  $X = 26$ ,  $Y = 14$ ,  $Z = +3$

D noktasının yeri ( C noktasına göre ) :  $X = 20$ ,  $Y = -6$ ,  $Z = -2$

E noktasının yeri ( D noktasına göre ) :  $X = 28$ ,  $Y = 24$ ,  $Z = +4$

### 3. TAKIM YOLU VE OLUŞTURULMASI

#### 3.1 Takım Yolu Nedir?

Günümüzün endüstriyel ve bilimsel araştırmalarında sert çeliklerin iŐlenmesine büyük ilgi duyulmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda iyi dayanıma sahip olan sert çelikler genellikle otomotiv, uzay ve elektronik endüstrisinin de içinde olduğu ilgili ürünlerin ve kalıplarının malzemesi olarak kullanılırlar.

Kalıp imalatçıları günümüzün rekabet ortamında müşteri isteklerini tam olarak karşılayabilmek için tedarik sürelerini kısaltma ve maliyetleri azaltmayı sürekli olarak ön planda bulundurmaktadırlar. Üretim maliyetlerinin önemli bir kısmını genellikle işleme, tolerans limitleri içinde ürün elde etme ve yüzey düzgünlüğu gibi unsurlar oluşturmaktadır. Bütün bu gereksinimler kısa tedarik sürelerinde ve rekabet ortamının direk olarak etkilediği maliyetler içerisinde yapılmalıdır. Bu yüzden kalıpların yüksek hızda işlenmesi gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yüksek hızda işleme ile çok fazla miktarda malzeme kaldırılır, aynı zamanda işçilikten de avantaj sağlayarak yüzey pürüzlülüğu çok daha iyi olur. Diğer yararları olarak montaj kolaylığı sağlanması ve ürün tekrarlanabilirliğinin sağlanması vurgulanabilir.

Parçaya istenilen Şeklin verilmesi, iş parçası ve takımın birbirlerine göre izafi hareketleri ile olmaktadır. Bu hareketler esnasında takımın parça üzerinde izlediği yollara takım yolu denmektedir. Takım yolu ile seçilen takımın parça yüzeyinden hangi yükseklikte, hangi yönde ve hangi açı ile hareket edeceği gibi bilgiler tezgaha aktarılmaktadır. Bu bilgi aktarımı Şüphesiz belli bir bilgisayar programı yardımı ile olmaktadır. Bu programlar “G” ve “M” kodlarını içeriyor olup tezgaha çeşitli ara yüzler ile aktarılabilir.

Takım yolları iş parçasının tamamı ile ham geometrisi, bitmiŐ ürün geometrisi ve her operasyonda deĐiŐecek olan geometri bilgilerini taşıyan boyutsal bilgilerden oluşmaktadır. Günümüzde takım yollarını oluşturmada bir çok bilgisayar destekli teknikler geliştirilmiş olup bu teknikler yardımı ile istenen parametreler girildiğinde takım yolu rahatlıkla bilgisayar tarafından oluşturulmaktadır.

İŞlenmesi istenen parça öncelikle bilgisayar yardımı ile modellendirilebilir. Bu işleri yapan bilgisayar programlarına verilen genel isim CAD (Computer Aided Design, Bilgisayar Destekli Modelleme)‘dir. CAD programları ile oluşturulan modeller 2 veya 3 boyutlu olabilmektedir. Bilgisayar ortamında modellenen parçalar belli baŐlı bazı dönüŐtirme işlemlerinden sonra CAM (Computer Aided Manufacturing, Bilgisayar Destekli İmalat)

programlarına aktarılabilmektedir. CAD ve CAM arasında dönüştürme işlemleri için DXF ve IGES uzantısına sahip programlardan yararlanılabilir. Bazı bilgisayar programları CAD ve CAM ortamlarını aynı anda ihtiva ettiğinden dolayı dönüştürme programlarına ihtiyaç olmayabilir. CAM programlarında programın arayüzü kullanılarak istenilen parametreler girilir ve takım yolu oluşturma bu parametrelere bağlı kalınarak bilgisayar tarafından gerçekleştirilir. Bir takım yolu oluşturmak için kullanılan CAM programını oluşturmada ilk işlem CAD ile oluşturulan parçanın CAM ortamına alınmasıdır.

Entegre CAD – CAM sistemlerinde bu işlem ayrı bir dönüştürme işlemi gerektirmeksizin kolaylıkla yapılabilir. Birbirinden ayrı CAD ve CAM programları ile çalışılması halinde, CAD programından CAM programına çizimin aktarılması aşamasında DXF, IGES, STEP VDA vb. dosya aktarma programlarından faydalanılır. Özellikle kompleks yüzeyler içeren parçaların, oluşturduğu CAD dosya uzantısından aktarma formatına ve aktarma formatından CAM programı formatına dönüşümleri sırasında bazı veri kayıpları (yüzeylerde bozulma vb.) söz konusu olabilmektedir. Bu durumda CAM programında parça çiziminin bazı düzeltmelerden geçirilmesi gerekmektedir. Çizim tamamen CAM programına uygun hale getirildikten sonra programın NC modülüne geçilir ve yapılacak işlem seçilir. Parça üzerinde işlenecek yüzeylerin CAM programı ara yüzünün gerektirdiği şekilde belirtilmesi gerekir. Daha sonra işleme koşulları açıklanır. İşleme koşulları genelde şu faktörleri içerir:

- Kaba talaş parametrelerinin ayarı : Burada kaba talaşta paso şekilleri tayin edilir. Buna göre örneğin 0 derece girildiğinde kaba talaş kaldırma, cebin sol alt köşesinden başlar ve yatay pasolar ile yukarıya doğru ilerler, 90 derece girildiğinde talaş kaldırma cebin sağ alt köşesinden yukarıya doğru başlar ve dikey pasolarla cebin sol kenarına ilerler. Ayrıca pasolar arası ve takım yolu ile geometri arasındaki mesafeler tayin edilir.
- İşleme yöntemi belirlenir : Burada karşıt, geleneksel, zig-zag, spiral-dış, spiral-iç gibi yöntemler vardır. Karşıt yöntem takımın ilerleme yönü dönme yönüne ters olduğu yöntemdir. Geleneksel yöntemde takımın ilerleme yönü dönme yönü ile aynı olduğu yöntemdir. Zig-zag verilen kaba talaş paso şekillerine göre cep doğrusal hareketler ile işlenir; Spiral-dış cebi ortasından spiral hareketle duvarlarına doğru işler; spiral-iç cebi duvarlarından spiral hareketle ortasına doğru ilerler.
- Takımın işleme girme yöntemi ayarlanır : Burada girme şekli; helisel, eğik veya zig-zag şeklinde olabilir. Ayrıca cep duvarları konik olarak işlenebilir.
- Nihai işleme parametreleri ayarlanır : Kaba işlemden sonra cebin tabanından ve duvarlarında nihai işlem için, nihai işlem payları denilen belirli kalınlıkta malzeme bırakılır. Bunlar

nihai işlem ile işlenir. Burada; nihai paso sayısı ile bir pasonun boyutu tayin edilir. Ayrıca nihai pasolarına takımın girişi, çıkışı belirlenir ve başka ayarlar yapılır. Bunun yanı sıra bazı CAM sistemleri nihai pasoların optimum bir sırada yapılmasını sağlar. İşleme koşullarının belirlenmesine müteakip takım ile ilgili bilgilerinin açıklanmasına geçilir. Takım bilgileri genelde NC parametreleri adı altında ayrı bir diyalog kutusu ile ayarlanır. Burada genelde program numarası NC programındaki takım numarası olup program numarası, NC programında başlama bloğunun numarası ve ekleme sayısı belirlenir. Örneğin başlama sayısı 10 ve ekleme sayısı 2 verilirse bloklar 10 numarası ile başlar ve 12, 14, ... vb. şeklinde devam eder. Her iki seçeneğe 0 gelirse blok numaraları yazılmaz. NC programındaki takım numarasında ise çap telafisi numarası ve uzunluk telafisi numarası belirlenir. Ayrıca; takım çapı ve takım köşe yarıçapı girilir. Bunun yanı sıra; bırakılacak işleme payı, çabuk hareket derinliği, ilerleme hızı, Z eksenini doğrultusunda dalma oranı, kesme hızı belirlenir.

- Takım yarıçap telafisi tayin edilir : Burada sağ, sol ve telafi yok seçenekleri vardır. Ayrıca telefî takım merkezine veya takım ucuna göre yapılabilir, kesme sıvısı tipi seçilir ve bunun açık veya kapalı olması sağlanır.
- Kaba ve nihai paso sayıları : Kaba paso derinliği, nihai paso derinliği tayin edilir. Ayrıca dizi şeklinde birbirinden ayrı ceplerin işlenmesini yani takım yolunun bir dizi içerisinde tekrarlanması ayarlanabilir.
- Takım değiştirme yeri : Güncel operasyon için takım düzlemi, takım orijini ve takım yolunun giriş / çıkış şekli belirlenir.

Bunların yanı sıra post-prosesörde NC programı oluşturulurken ekranda takımın görüntülenme şeklinin ayarlanmasını sağlayan bir takım seçenekleri olabilir. Burada takım parmak frezeyi temsil eden bir daire gibi, parmak frezenin merkezini temsil eden bir çizgi gibi görünebilir. Bu ayarlara göre takım, takım yolu boyunca görünüp sönen, takım yolunun her noktasında, belirlenen aralıklarda, seçilen elemanın son noktalarında, takım yolu bitinceye kadar gözükür.

Genelde CAM sistemlerinin gerek işleme parametreleri gerekse takım bilgileri ile ilgili kütüphaneleri vardır. Buradan özellikle takımlar ile ilgili her çeşit bilgiler çağrılabilir. Ayrıca operatörde kendi kütüphanesini oluşturabilir. Bunun yanı sıra çeşitli malzemelerin mekanik özelliklerini içeren parça malzemeleri ile ilgili bir kütüphane bulunur.

Yukarıdaki ayarlamalar bittikten sonra belirli bir komut seçerek, takım yolu hesaplanmaya

başlanır ve hesaplar bittikten sonra takım yolu görüntülenir. Oluşturulan takım yolları bilgisayarın belleğinde bir dosya halinde saklanır. Dosyanın uzantısı CAM sistemine bağlı olarak değişebilir.

Oluşturulan takım yolu APT veya buna benzeyen bir program dili ile ifade edilmektedir. CNC tezgahları bu program dilinden anlamazlar, sadece “G” ve “M” kodunda yazılan programları anlarlar dolayısı ile takım yolunun bu kodlara dayanan bir programa dönüştürülmesi gerekir. Bu işlem post-prosesör yardımı ile yapılır. Burada şu hususu belirtmekte yarar vardır. Post-prosesör bir donanım değil bir programdır. Diğer taraftan CNC takım tezgahları, birbirinden kod ve çalışma bakımından farklı olan kontrol üniteleri ile donatılmıştır. Bu nedenle post-prosesörler genel değil, kontrol sistemine yöneliktir. Örneğin Fanuc kontrol sistemi ile donatılmış tezgahlar için Fanuc, Heidenhaim kontrol sistemine Heidenhaim vb. post-prosesörü gerekir.

Genel bir açıklama ile post-prosesör; takım yolu dosyalarını, NC kontrol sisteminin istediği özel kod formatına dönüştüren bir programdır. Esasen bir post-prosesör iki dosyadan meydana gelmektedir. Bu dosyalardan birisi icra dosyası ve diğeri ASCII özelleştirme dosyasıdır.

### **3.2 Takım Yolu Oluşturmada Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar**

Herhangi bir takım yolu oluşturma esnasında aşağıdaki hususlara dikkat etmek faydalı olacaktır.

#### **3.2.1 İşleme Toleransı**

İşlenen parça yüzeyindeki hatalar, istenilen toleranslar içerisinde sınırlandırılabilirdir. Genel olarak işleme hatalarının iki kaynağı vardır. Bunlardan ilki, takım yolu oluşturma işleminin geometri ile uyumsuzluğudur. Geometrik uyumsuzluğa etki eden en büyük etkenler, takım şekli ile parça yüzeyi arasındaki farklılık, ardışık devam eden ileri takım hareketi ve kesikli yan takım hareketidir. İkinci hata kaynağı ise çalışma sırasında kullanılan sistemden gelmektedir. Kullanılan sistem hataları titreşim, takımın esnemesi, aşınma, izleme hatası vb. hataları içerir. Fakat bu hatalar geometrik kompanzasyon yada otomatik kontrol ile azaltılabilir. Geometrik uyumsuzlukta oluşan hatalar ise takım yolu oluşturulduğu anda tespit edilebilir.

### 3.2.2 Uygunluk

Elde edilen takım yolu, dalma veya yanal çarpma içermemelidir. Takım ile işleme yaparken, yüzey eğrilik yarıçapı takımın yarıçapından küçük ise dalma meydana gelmektedir. Yanal çarpma ise, herhangi bir yüzey parçası ile kesici takım çakıştığı zaman meydana gelir.

### 3.2.3 İnterpolatör Uyumluluğu

Farklı interpolatörler farklı veri formatları istediğinden dolayı takım yolu oluşturma metodu interpolatöre uygun veriler üretmelidir. Örneğin doğrusal interpolatör, yolu tanımlamak için başlama ve bitiş noktalarına gerek duyar. Dairesel interpolatör ise daireysel bir yolun tanımlanabilmesi için başlama noktası, bitiş noktası, merkez noktası, yarıçap ve daireysel yolun doğrultusuna ihtiyaç duyar. Aşağıda interpolasyon fonksiyonları hakkında genel bilgiler verilmiştir.

#### 3.2.3.1 Pozisyonlama

“G00” kodu takımı iş parçası koordinat sisteminde mutlak veya artımsal kodlar ile verilen pozisyona hızlı hareket ile taşır. Pozisyon değeri mutlak komut olarak verilmiş ise iş parçası koordinat sistemi orijinine (program sıfırına) göre bitiş noktasının koordinat değerleri belirtilir. Pozisyon değeri artımsal olarak verildiği takdirde takımın mevcut bulunduğu konumdan verilen noktaya varması için daha ne kadar mesafe gitmesi gerektiği belirtilir.

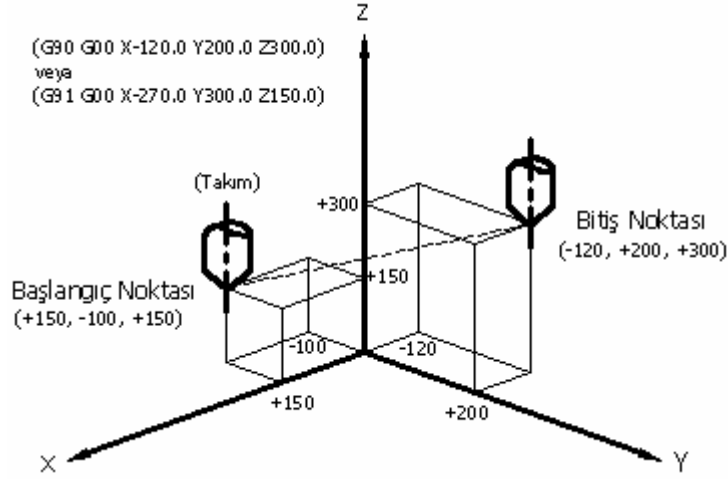
“G00” kodu bir kez belirtildiği zaman, başka bir “G” fonksiyonu ile değiştirilene kadar veya 01 kod grubundaki “G01, G02, G03” kodları ile hareket verilene kadar geçerli kalır. Eğer belirtildiği bloktan sonraki bloktaki hareket de “G00” ile yapılacak olan bir hareket ise, “G00”ın yazılmasına gerek yoktur, sadece gidilecek olan noktanın koordinat değerlerinin belirtilmesi yeterlidir.

Takımın verilen noktaya mevcut konumdan ulaşması için lineer veya lineer olmayan bir yol boyunca gidip gitmeyeceği parametreler vasıtasıyla belirlenir. Genel olarak lineer olan yol takımın her üç eksene ait olan en yüksek hareket hızı değerini kullandığından dolayı en kısa zaman alan yoldur. Tezgahların çoğunda takımın pozisyonlandırılması bu şekilde yapılır.

“G00” kodundaki hızlı hareket değeri her bir eksen için 518...520 parametreleri ile belirtilir. “G00” ile yapılan pozisyonlandırma bloğunda takım mevcut konumdan ivmelendirilir ve bitiş noktasına ulaşmadan evvel yavaşlatılır. İcra işlemi pozisyon hassasiyeti sağlanınca bir sonraki bloğa geçer. Bu aralık takım tezgahı imalatçısı tarafından belirlenir ve bu değerler 500...503

parametreleri vasıtasıyla belirtilir. Hızlı ilerleme değeri “F” ile belirtilemez.

Aşağıda “G00” kodunun “G90” ve “G91” ile kullanımına dair bir örnek gösterilmektedir. Takım başlangıç noktasından bitiş noktasına “G00” kodu ile hızlı bir şekilde hareket ettirilmek istenmektedir.



Şekil 3.1 Takım pozisyonlama (Akkurt, 1996)

### 3.2.3.2 Lineer (Doğrusal) İnterpolasyon

Bu kod koordinat değerleri ve ilerleme hızı ile birlikte kullanılır. Takımın mevcut konumundan koordinat değerleri ile belirtilen bitiş konumuna F ile verilen ilerleme değeri ile doğrusal olarak (başlangıç noktası ile bitiş noktasını birleştiren doğru boyunca) interpolasyon yapmasını sağlar. Bu durumda F ile verilen ilerleme takım merkezinin hareket doğrultusundaki ilerleme değeridir. Aşağıda bu tür interpolasyon için kullanılan örnek komut satırı yer almaktadır.

Komut Formatı;

G01 X xp Y yp Z zp F f; şeklindedir.

Burada xp, yp ve zp ile bitiş noktası koordinat değerleri artımsal ve mutlak mod durumuna göre belirtilir. F ile ise mm/dk cinsinden takımın ilerleme miktarı değeri. İlerleme değeri yeni bir ilerleme verilene kadar geçerlidir. Bu sebeple her bir blokta ilerlemenin belirtilmesine gerek yoktur.

Döner eksen için ilerleme değeri derece/dakika cinsinden belirtilir. Lineer eksen a ile döner eksen b aynı anda interpolasyona tabi tutulacak ise, bu durumdaki ilerleme a ve b ile oluşturulan kartezyen koordinat sistemine teğet olan ilerleme değeri mm/dak cinsinden verilir.

### 3.2.3.3 Dairesel İnterpolasyon

Dairesel interpolasyon takımın bir yay boyunca hareket ettirilmesine imkan tanır. Bu tür interpolasyon için değişik düzlemlerde kullanılacak örnek komut satırları aşağıda verilmiştir.

Format;

XpYp düzleminde yay

G17 G02 (G03) Xp\_ Yp\_ R\_ ( I\_ J\_ ) F\_ ;

ZpXp düzleminde yay

G18 G02 (G03) Xp\_ Zp R\_ ( I\_ K\_ ) F\_ ;

YpZp düzleminde yay

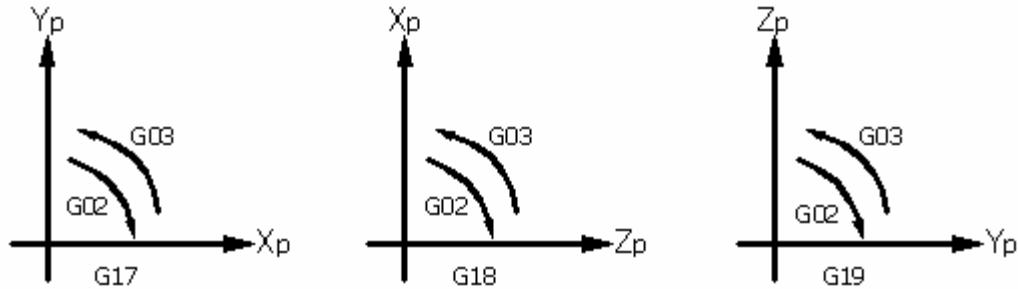
G19 G02 (G03) Yp\_ Zp\_ R\_ ( J\_ K\_ ) F\_ ;

Çizelge 3.1 Dairesel interpolasyonda kullanılan komutlar (Akkurt, 1996)

G17	XpYp düzlemi
G18	ZpXp düzlemi
G19	YpZp düzlemi
G02	Dairesel interpolasyon Saat yönü (CW)
G03	Dairesel interpolasyon Saat yönü tersi (CCW)
Xp_	X eksen komut değeri
Yp_	Y eksen komut değeri
Zp_	Z eksen komut değeri
I_	Yay başlangıç noktasından yay merkezine X ekseninde olan mesafe (işareti ile birlikte)
J_	Yay başlangıç noktasından yay merkezine Y ekseninde olan mesafe (işareti ile birlikte)
K_	Yay başlangıç noktasından yay merkezine Z ekseninde olan mesafe (işareti ile birlikte)
R_	Yay yarıçapı işareti ile birlikte belirtilir
F_	Yay boyunca ilerleme

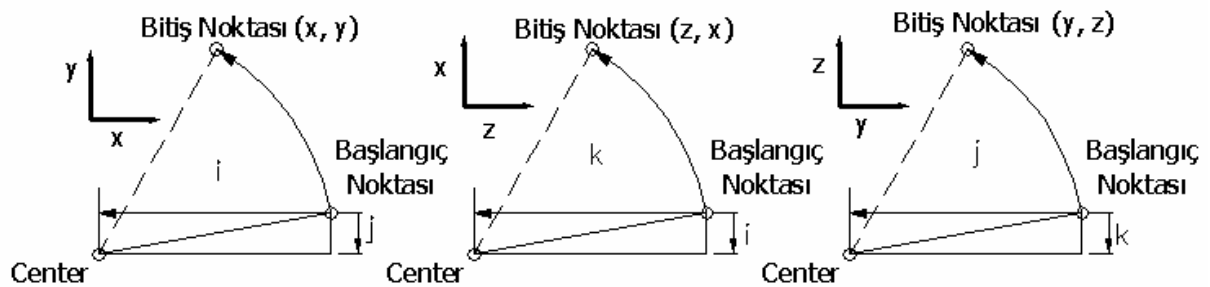
G02 veya G03 kodu G1, G0 kodları belirtilene kadar aktif olarak kalır. Yay bitiş noktası koordinatları hem mutlak hem de artımsal olarak da belirtilebilir. Buna mukabil yay merkezi koordinatları (I, J ve K) artımsal olarak belirtilir. Yay yarıçapının artı veya eksi işaretli belirtilmesine göre dairesel interpolasyon yönü değişmektedir.

Dairesel interpolasyonun değişik düzlemlerde kullanılma durumuna yardımcı olmak maksadıyla aşağıda bir şekil verilmiştir.



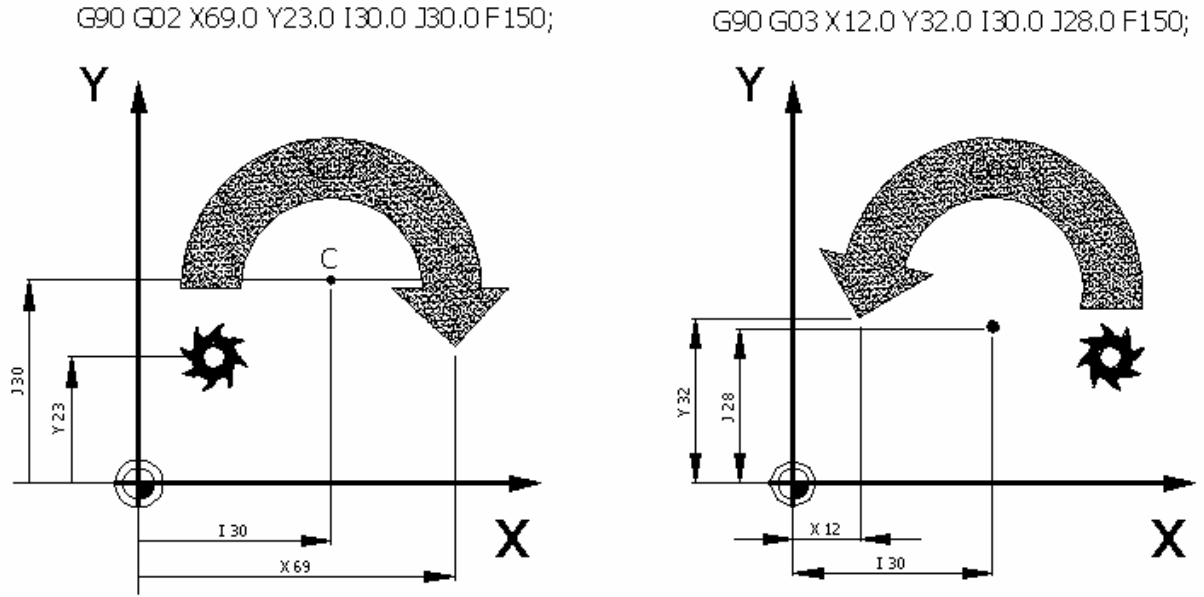
Şekil 3.2 Değişik düzlemlerde dairesel interpolasyon (Akkurt, 1996)

Yay bitiş noktası koordinatları  $X_p$ ,  $Y_p$  veya  $Z_p$  değerleri ile belirtilir, ve G90 veya G91 modunun durumuna göre artımsal veya mutlak olarak verilebilir. Artımsal değerler yay başlangıç noktasından gözlemlenen bitiş noktası koordinatları olarak belirtilir. Yay merkezi I, J ve K ile  $X_p$ ,  $Y_p$  ve  $Z_p$  'ye uygun düşecek şekilde belirtilir. Buna mukabil I, J ve K adreslerini takip eden sayısal değer bir vektör bileşenidir, ve yay başlangıç noktasından yay merkezine çizilen doğrunun bileşenlerine sahiptir ve daima artımsal değerler cinsinden belirtilir. I, J ve K değerleri doğrultusuna göre işaretlere sahip olacak şekilde belirtilmelidir.



Şekil 3.3 Yay koordinatları (Akkurt, 1996)

Eğer I, J veya K değerlerinden herhangi bir tanesi sıfır ise, bunlar belirtilmeden geçilebilir.  $X_p$ ,  $Y_p$  veya  $Z_p$  değerleri belirtilmediği takdirde (bitiş noktası başlangıç noktası ile aynı olduğu durumda) ve yay merkezi I, J ve K değerleri ile belirtilir ise takım 360 derecelik bir yay üzerinde kesme işlemi yapar.



Şekil 3.4 Yay üzeri kesim işlemi (Akkurt, 1996)

### 3.2.3.4 Helisel İnterpolasyon

G02 ve G03 komutları, G17, G18 veya G19 ile seçilen düzlemde dairesel interpolasyona ek olarak bu düzleme dik olan üçüncü ekseninde lineer hareketin aynı anda yaptırılması suretiyle helisel interpolasyon fonksiyonu yerine getirir. Aşağıda helisel interpolasyon için komut formatı görülmektedir.

Komut formatı;

Xp Yp düzleminde helisel interpolasyon

G17 G02 (G03) Xp\_ Yp\_ R\_ ( I\_ J\_ )  $\alpha$  \_ F\_ ;

Zp Xp düzleminde helisel interpolasyon

G18 G02 (G03) Xp\_ Yp\_ R\_ ( I\_ K\_ )  $\alpha$  \_ F\_ ;

YpZp düzleminde helisel interpolasyon

G19 G02 (G03) Xp\_ Yp\_ R\_ ( J\_ K\_ )  $\alpha$  \_ F\_ ;

$\alpha$  ... Dairesel interpolasyon işleminin yapıldığı düzleme dik olan eksen

Helisel interpolasyonun programda kullanılması dairesel interpolasyon komutuna sadece ek

bir lineer eksen eklenmesi suretiyle kolayca yerine getirilebilir. Helisel interpolasyonda F ile verilen ilerleme değeri dairesel yay üzerindeki ilerleme değeri olarak belirtilmektedir. Bu sebeple lineer eksenindeki ilerleme miktarı

(F) X (Lineer esken boyu) / (Dairesel yayın uzunluğu)

Dairesel yay uzunluğu  $((2 \times 3.14) X (\text{yay yarıçapı}))$  formülü ile kolaylıkla bulunabilir. 393#4 parametresi ayarlanmak suretiyle helisel kesme işleminde lineer eksen hızının azami değeri #527 numaralı parametre düzenlenmek suretiyle ayarlanabilir.

Helisel interpolasyonda takım yarıçap telafisi sadece dairesel hareket için tatbik edilebilir. Helisel interpolasyon kodunun kullanıldığı blok içinde takım boyu kompanzasyonu ve takım telafileri belirtilemez.

### 3.3 Takım Yolu Oluşturma Algoritmaları

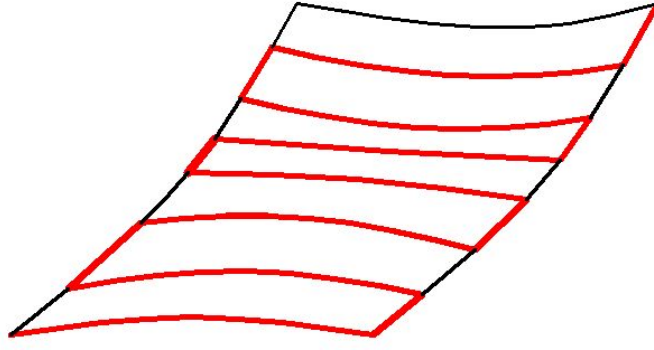
Günümüzde kullanılan takım yolu oluşturma yöntemleri genellikle üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, parça geometrisi ve bu parçanın gerektirdiği işleme ihtiyaçları belirlenerek takım yolu oluşturulur. İkinci aşamada ise oluşturulan takım yolunun problemleri fark edilerek ortadan kaldırılır. Son aşamada ise oluşturulan takım yolu “G” kodlarına dönüştürülür.

Yukarıda anlatılan aşamaları kullanan çeşitli takım yolu yöntemleri vardır. Bu yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- İzoparametrik Takım yolları
- İzoplaner Takım Yolları
- Sabit Çıkıntı Yükseklikli Takım Yolları
- Cep Boşaltma
- Alan Doldurma Eğrileri

#### 3.3.1 İzoparametrik Takım Yolları

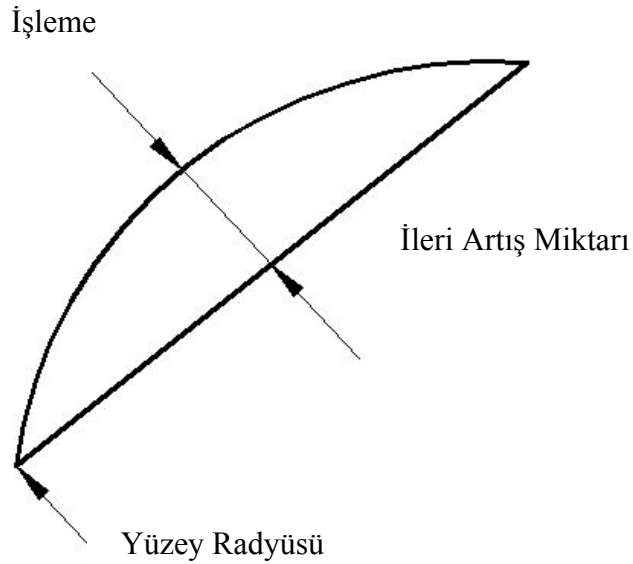
Mevcut CAM sistemlerinde İzoparametrik takım yolu oluşturma yöntemi oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu yöntem ile takım yolu “u” ve “v” ile ifade edilen yüzey üzerindeki izoparametrik eğriler üzerindedir.



Şekil 3.5 İzoparametrik takım yolu

Bu yöntem ile ilgili bir çok çalışma yapılmış olup Broomhead ve Edkins (1986), ardışık doğru parçalarını izoparametrik eğriye yaklaşmak için kullanmıştır. Doğru parçasının uzunluğunu (ileri artış miktarı), eğri ve doğru parçaları arasındaki giriş yüksekliği toleranslar içerisinde kalacak şekilde hesaplamışlardır.

Bromhead ve Edkins (1986), yan artış miktarını ise ardışık yollar arasındaki çıkıntı yüksekliği toleranslar içerisinde kalacak şekilde hesaplamışlardır. Önerilen bu çözüm karmaşık şekilli yüzeylerde çok kötü bir çıkıntı oluşturmaktadır.



Şekil 3.6 İleri artış miktarı için giriş yaklaşımı

Yan artış miktarını hesaplamak için yinelemeli bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım bazı problemler içermektedir. İlki, en kötü çıkıntı durumu dikkate alındığında bir çok yüzeyin gerekenden daha dar toleranslarda frezelenmesi gerekecektir. Bu ise işleme verimini

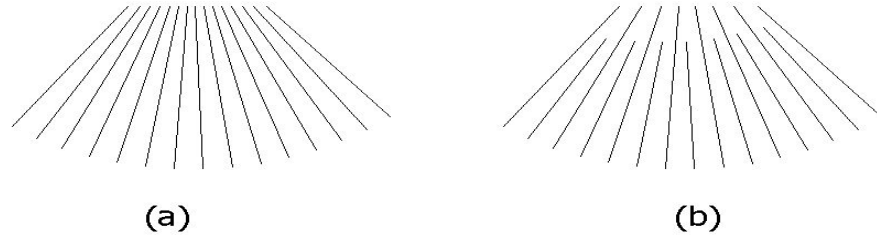
düşürmektedir. İkincisi ise, yan artış miktarının hesaplanmasında kesme doğrultusunun yüzey yarıçapına dik olduğunu kabul etmişlerdir. Bununla birlikte, böyle bir yarıçapın nasıl hesaplandığına dair bir açıklama yapılmamıştır.

Loney ve Özsoy (1987), yan artış miktarını değiştirerek işleme verimini arttırmışlardır. İki ardışık yol arasındaki en kötü çıkıntı yüksekliği toleransla kısıtlanmıştır. En kötü çıkıntının konumu şu adımlarla hesaplanmaktadır.

- Yol üzerinde eşit aralıklarla noktalar seçilmektedir. Örneğin  $v = 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1$  gibi
- Diğer izoparametrik eğri boyunca seçilen her bir nokta için yan artış miktarları hesaplanmaktadır. Örneğin  $v$  parametrik eğri.
- Tüm yol için minimum yan artış miktarı hesaplanır ve bu değer yan artış miktarı olarak alınır.

Yan artış miktarını değiştirme yaklaşımı Li (1990) ve Cavendish (1992) tarafından da geliştirilmiştir. Broomhead ve Edkins'in yaklaşımına benzer tarzda, ileri artış miktarını kiriş sapmasına göre hesaplamışlardır. Fakat bu yaklaşımda birkaç problem vardır. Bu problemlerden ilki, parametrik koordinat ve uygun kartezyen koordinat arasındaki ilişki düzgün olmadığı için yan artış miktarı en kötü çıkıntı miktarına göre hesaplanmaktadır. Bu durumda, bir çok yüzey gereğinden daha az çıkıntı yüksekliği ile işlenmektedir. Karmaşık şekilli yüzeylerde en kötü çıkıntı yüksekliği yaklaşımı işleme verimini düşürmektedir. İkinci problem ise, çıkıntı yüksekliğini parametrik eğri boyunca ölçmüş olmalarıdır. Bu durumda gerçek çıkıntı yüksekliği daha düşük bir değerde ölçülür ve hassasiyet düşer Üçüncü problem ise, yan artış miktarının hesabında parametrik eğri birbiri ile örtüşen eğrilere yaklaştırılmaktadır. Bu yaklaşımın hassasiyeti analiz edilememiştir.

Elber ve Cohen (1994), verimsiz işleme problemini gereksiz işlemeye neden olan izoparametrik eğri kısımlarının budanması ile azaltmışlardır. Budanan bu yollar adaptif izoparametrik yollar olarak isimlendirilmektedir. Bu metot gereksiz işlemleri azaltır, fakat takım yollarının çok parçalı olmasına neden olmaktadır. Haung ve Oliver (1992) ileri artış miktarının hesaplanmasını, kiriş son noktasında takım genelde takım yoluna dik olmadığı gerçeğini göz önünde tutarak geliştirdiler. Böylece kesme çizgisi, temas noktalarını bağlayan çizgiden öte, kesici ucun yoludur. Haung ve Oliver daha hassas bir işleme yapabilmek için yinelemeli bir algoritma sunmuşlardır. Genel olarak izoparametrik metot iyi bir hesaplama verimine sahiptir, fakat işleme verimi ve yüzey düzgünlüğü kötüdür.

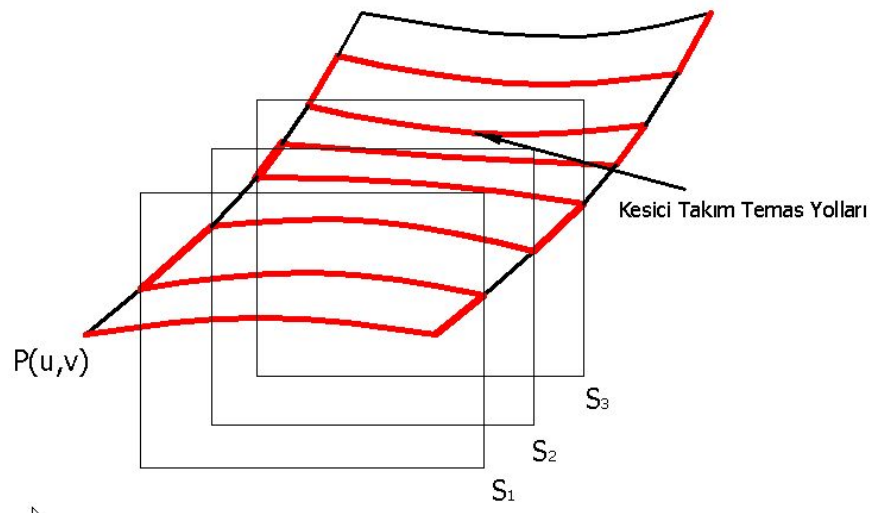


Şekil 3.7 İzoparametrik ve adaptif izoparametrik takım yolları

### 3.3.2 İzoplaner Takım Yolları

Diğer bir takım yolu oluşturma metodu ise, takım yolu olarak serbest şekilli yüzeyler ve paralel yüzeyler arasındaki arakesit eğrilerini kullanan izoplaner metottur. İzoparametrik metoda benzer tarzda, doğru parçaları arakesit eğrisine yaklaşmak için kullanılmaktadır ve yan artış miktarının hesaplanması en kötü çıkıntı yüksekliği temel alınarak tespit edilmektedir.

Babrow (1985) izoplaner takım yolu oluşturma metodunu kullanarak CSG (Constructive Solid Geometry – Yapısal Katı Geometri) katı modelden direkt olarak takım yollarının oluşturulmasıyla ilgili çalışmalar yapmıştır. Takım yolları model üzerinde paralel süpürmeler şeklinde oluşturulmaktadır. CSG modelde sınırlı sayıda ilkel katı modeller olduğundan, arakesit eğrileri ancak özel model denklemlerinin analitik olarak çözülmesiyle elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, bu metot sadece CSG'nin desteklediği serbest şekilli yüzeylere uygulanabilmesi gibi sınırlamalar getirmesi nedeniyle çok tartışılmaktadır.



Şekil 3.8 İzoplaner takım yolları

Huang ve Oliver (1992) serbest şekilli yüzeylerde izoplaner takım yolu oluşturmak için algoritmalar sunmuşlardır. Yaptıkları çalışmalarda ileri ve yan artış miktarının hesabına ait detaylar vermişlerdir. Hassas bir ileri artış miktarının hesaplanmasına katkılarına ilaveten, yan artış miktarını kesme düzlemine dik bir düzlem ile parça yüzeyinin arakesit eğrisinin eğrilik yarıçapını kullanarak hesaplamışlardır.

Ayrıca yaptıkları çalışmada direkt dalma eliminasyonu işlemini de vermişlerdir. Fakat kesme düzlemi ve parça yüzeyi arasında arakesit eğrilerinin nasıl oluştuğunu açıklamamışlardır.

Hwang (1992), izoplaner metodunu parametrik yüzeylere uygulamıştır. Bu metot iki aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada, parametrik yüzeyler üçgen polihedronlara (çok yüzlü olan) dönüştürülmektedir. Sonra her bir polihedrondan takım yolları oluşturulmaktadır.

Huang ve Oliver'e benzer tarzda, optimal ileri artış miktarını tespit etmek için yoğun bir hesaplama yaklaşımı kullanmıştır, fakat yan artış miktarını en kötü çıkıntı durumuna göre hesaplamışlardır. Bu polyhedron yaklaşım metodu pratiktir ve herhangi bir serbest şekilli yüzeye uygulanabilir.

İzoplaner metodun diğer bir konusu ise, süpürme oryantasyonunun tespitidir. Prabhu ve arkadaşları (1990) optimal süpürme oryantasyonu seçimi için daha detaylı bir araştırma stratejisi geliştirmişlerdir.

Öncelikle bir başlangıç oryantasyonunda sabit bir yan artış miktarı ile iki takım yolu oluşturulmaktadır. Yol uzunluğu hesaplanmakta ve bir optimum olarak saptanmaktadır. Daha sonra, oryantasyon değiştirilmekte ve yeni takım yolu oluşturulmaktadır.

Yeni yolun uzunluğu mevcut optimumla karşılaştırılmakta, kısa ise yeni yol saklanmaktadır. Bu işlem bütün oryantasyonlar kontrol edilinceye kadar devam etmektedir. Bu metot temel olarak sezgisel bir yaklaşımdır.

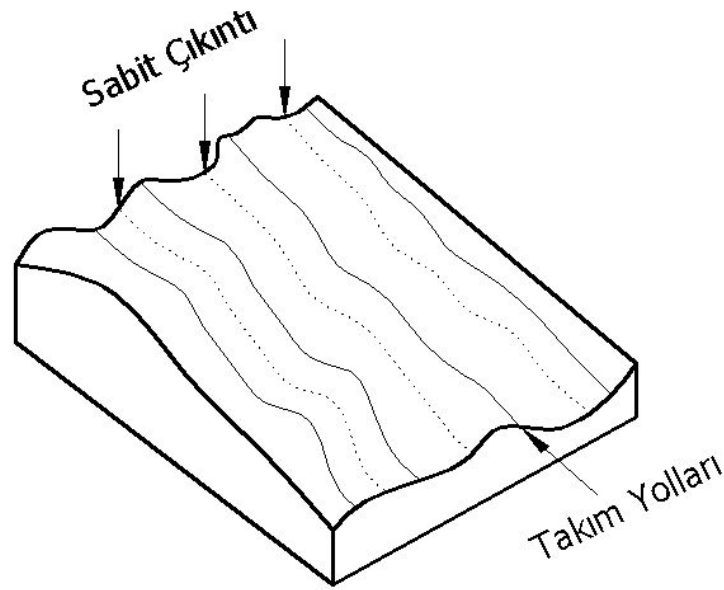
### 3.3.3 Sabit Çıkıntı Yüksekliğine Göre Takım Yolları

İzoparametrik ve izoplaner işlemenin tersine, sabit çıkıntı yüksekliğine göre işlemede çıkıntı yüksekliği her yerde aynı kalmaktadır. Sabit çıkıntı yüksekliğine göre işlemede elde edilen belirgin avantajlar aşağıdadır.

- Parça yüzeyindeki gereksiz işlemler ortadan kaldırılır, böylece işleme verimi arttırılır.
- Çıkıntı yüksekliği her yerde aynı olduğundan ince işlemeden sonra kaliteli bir yüzey elde edilmektedir.

Bu metot ilk olarak Suresh ve Yang (1994) tarafından ortaya konmuştur. Diferansiyel geometri teorisini kullanarak, yan artış miktarını kesici takım yarıçapına, çıkıntı yüksekliğine ve eğrilik yarıçapına bağlı olarak bulmuşlardır. Eğrilik yarıçapını, bir yüzeyde en yakın iki nokta arasındaki en kısa eğri olan jeodezik eğri olarak da isimlendirilen eğri doğrultusunda hesaplamışlardır. Çıkıntı yüksekliğinin jeodezik eğri boyunca ölçülmesi varsayılmaktadır, ama diğer doğrultulara göre daha hassas olduğu kanıtlanmamıştır.

Bu metotta, bir mastır takım yolu ilk olarak bir sınır eğrisinin seçilmesi ile belirlenir. Mastır yol üzerindeki her bir yol için, çıkıntı yüksekliğine uygun bir şekilde paralel noktalar oluşturulmaktadır. Bu noktalardan geçen bir spline eğri uydurularak ileri artış miktarı tespit edilmektedir. Daha sonra bu spline eğri, yeni bir mastır takım yolu gibi kullanılmakta, bu yol sonraki yolun oluşturulması için tekrarlama metodunun bir başlangıç noktası olarak alınmakta ve tüm parça yüzeyi tarandıktan sonra işlem sona ermektedir.



Şekil 3.9 Sabit çıkıntı yüksekliğine göre takım yolları

Bu metot herhangi bir yüzey tipine uygulanabilmektedir. Bu metodun bazı serbest şekilli yüzeylere uygulanması ile kesici takım verilerinin boyutunda önemli bir azalma olduğu Suresh ve Yang tarafından belirtilmiştir. Bu metodun hesaplama karmaşıklığı probleminden başka diğer bir eksikliği ise, nümerik hatalara eğilimli olmasıdır. Yeni takım yolunun oluşturulması önceki takım yolunu temel aldığı için, nümerik bir hata yeni yola da taşınabilir ve hata artabilir.

Genelde, sabit çıkıntı yüksekliğine göre işleme izoparametrik yada izoplaner işlemeye göre daha yüksek işleme verimine sahiptir. Buna rağmen, hesaplama karmaşıklığı, optimal başlangıç mastır takım yolunun seçimi, birleşik yüzeylere uygulanması gibi problemleri ileriki çalışmalara bir konu teşkil etmektedir.

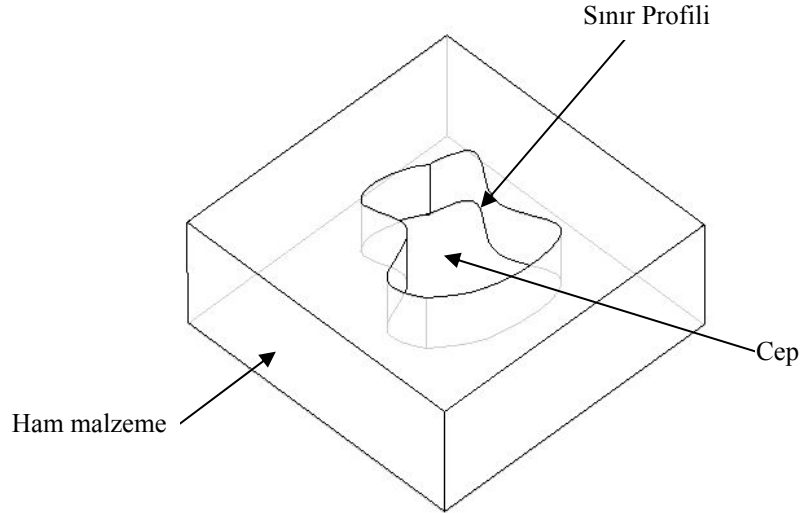
### 3.3.4 Cep Boşaltma

Cep boşaltma işlemi, verilen bir kapalı şekle uygun şekilde fazla malzemenin kaldırılmasında kullanılır. Takım yolu sınır eğrilerin kaydırılmasıyla oluşturulmaktadır. Bu işleme metodu, daha çok kalıp boşluklarının işlenmesinde kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmalar arasında Persson'un ilk çalışması (1978) konkav ve konveks ceplerin nasıl frezelenebileceğine ait bir prosedür içermektedir. Persson, yolları oluşturmak için iki aşamalı bir prosedür kullanmıştır. İlk aşamada, tüm cep alanı bir alt alan içerisindeki her bir nokta, en yakın cep kenarını paylaşacak şekilde parçalara ayrılır. Eşit mesafeli eğri iki sınır eğrisine eşit mesafede olan bir eğridir. Eğer iki sınır eğrisi yay ise eşit mesafeli eğri bir yay olacaktır. Sınır eğrisi yay ve doğru parçası ise eşit mesafeli eğri yay olacaktır. Sınırlar doğru parçalarından oluşuyorsa bu durumda eşit mesafeli eğri doğru parçası olacaktır. Alt alanların oluşturulmasından sonra, her bir kenar eğrisi alt alanı uygun şekilde takım yolunun oluşturulması için kaydırılır.

Ne yazık ki Persson metodu, bu metodu detaylı olarak açıklamamıştır. Bu çalışmada ileri ve yan artış miktarlarının düşünülmediği görülmektedir. Ayrıca, eşit mesafeli eğrinin hesabı için geliştirilen bu metot sadece dairesel yay ve doğru parçalarından meydana gelen sınır profilleri ile sınırlıdır.

Suh ve Lee (1990) yaptıkları araştırma sonucu serbest şekilli bir yüzey üzerinde iki uzaysal eğri arasındaki eşit mesafeli eğrinin hesaplanmasının güç olduğunu belirtmişlerdir. Cep sınırlarını B-Spline eğrileri şeklinde tanımlanmasını mümkün kılan bir cep işleme metodu geliştirmişlerdir. Persson'un tersine, takım yolunu cep sınır eğrilerin içe doğru büzülmesiyle, ada profillerinin ise dışa doğru genişlemesi ile oluşturmuşlardır. Bir cebin 3B sınır eğrisi 2B eğriye iz düşümü alınarak dönüştürülmektedir.



Şekil 3.10 Cep boşaltma

Tiller ve Hanson'un alt bölme metodunun bir modifikasyonunu, 2B kaydırma eğrilerini oluşturmak için kullanmışlardır. Çıkıntı yüksekliği temel alınarak kaydırma değeri hesaplanmaktadır. Daha sonra 2B kaydırma eğrileri belirli bir kurala bağlanmış yüzey şekli için Z eksenine doğrultusunda süpürülmektedir. Son olarak, takım yolunun oluşturulması için parça yüzeyi ve rulet yüzeyin ara kesit eğrileri hesaplanmaktadır. Bu çalışma ile ilgili bazı problemler vardır. İlk problem, Marshall ve Griffiths'in (1994) belirttiği gibi, kullandıkları ofset tekniği çok adalı cepler için uygun değildir. İkinci problem ise tek bir ada durumu için kesme sırasının tespit edilmiş olmasıdır. Karmaşık parçalar için yeni bir işleme sırası algoritması gereklidir.

Held (1994) ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Voronoi diyagramı, Monotonic cepler gibi hesaplanabilir belirli geometri kavramlarını kullanarak çok sayıda ada içeren 2B ceplerin kaydırma eğrilerini oluşturmaktadır. Voronoi diyagramı bölgelere ayrılmış cep şekillerini içermektedir.

Voronoi diyagramının temel fikri aslında Persson'un alan bölme yöntemi ile aynıdır. Bununla birlikte, geometrik hesaplamaların kullanılması ile Held'in bu yaklaşımı daha somut görülmektedir. Held, işleme sırasını bu şekilde tanımlamaktadır. İlk olarak, her bir takım yolu bir düğüm noktası olarak düşünülmektedir. İkinci adımda, komşuluk ilişkileri temel alınarak, düğüm noktaları bir grafik oluşacak şekilde birleştirilir. Üçüncü adımda ise, cep sınır eğrileri istenilen miktar kadar kaydırılmakta, Voronoi diyagram verileri ile kesiştiği noktalar tespit edilerek takım yolu elde edilmektedir. Held güvenilir bir 3B Voronoi diyagramı olmadığı için bu yaklaşımının hala 2B cep işlemleri için sınırlı olduğunu itiraf etmektedir.

Genel olarak cep boşaltmaları için olan takım yolları sadece cep özelliklerine uygundur. Hesaplama karmaşıklıklarından dolayı, mevcut cep işleme algoritmaları yüzey tipleri ile sınırlıdır. Takım yollarının oluşturması için oldukça önemli olan 3B Voronoi diyagramı oluşturma algoritmalarının hala geliştirilmesi gerekmektedir.

### 3.3.5 Alan Doldurma Eğrileri

NC takım yolu oluşturmada alan doldurma eğrileri ilk defa Griffiths isimli araştırmacı tarafından 1994 yılında önerilmiştir. Griffiths takım yolu oluşturmada Hilbert eğrilerinin faydalı olacağını önermiş ve üç eksenli tezgahlarda konu üzerine denemeler yapmıştır. Bu esnada Cox isimli araştırmacı ise Moore doldurma eğrilerini kullanarak araştırmalar yapmıştır.

Alan doldurma eğrilerinin bilgisayarlaştırılmış olarak türetilmesi için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Sayısal kontrollü makine takımları daha hassas işlenmiş yüzeyler elde etmek için endüstriyel uygulamalarda kullanılmışlardır. Genellikle alan doldurma eğrileri düzgün yada düzenli pürüzlülükte yüzeyler elde etmek istenildiğinde kullanılmaktadır. Bununla beraber bazen düzenli olmayan yüzeylerde (Örn. tribün bıçakları, uçak kanatları yada otomobil tamponları) işlem gerektirmektedir. Geleneksel takım yolları yüzey boyunca paralel ilerleyen çizgi çizgi yapıları izlemektedir. Bu genellikle başarılı sonuçlar verir Fakat bu verimsizlik ve yüzey için istenmeyen sonuçlar doğurur.

Çizgi çizgi yaklaşımı istenen boşluğu doldurmada çok kolay bir algoritmadır. Bununla beraber bir şekli boyayan bir ressamı veya boyama kitabını boyayan bir çocuğu izleyen birisi doğru yapısındaki çizgilerin bir alanı doldurmada gereksiz olduğunu görebilir. Alan doldurma eğrilerinin matematiksel teorisi sadece bir uygulama olarak kullanılabilir. Alan doldurma eğrileri yinelemeli algoritmalar ve bilgisayar grafikleri için rahatlıkla kullanılabilir.

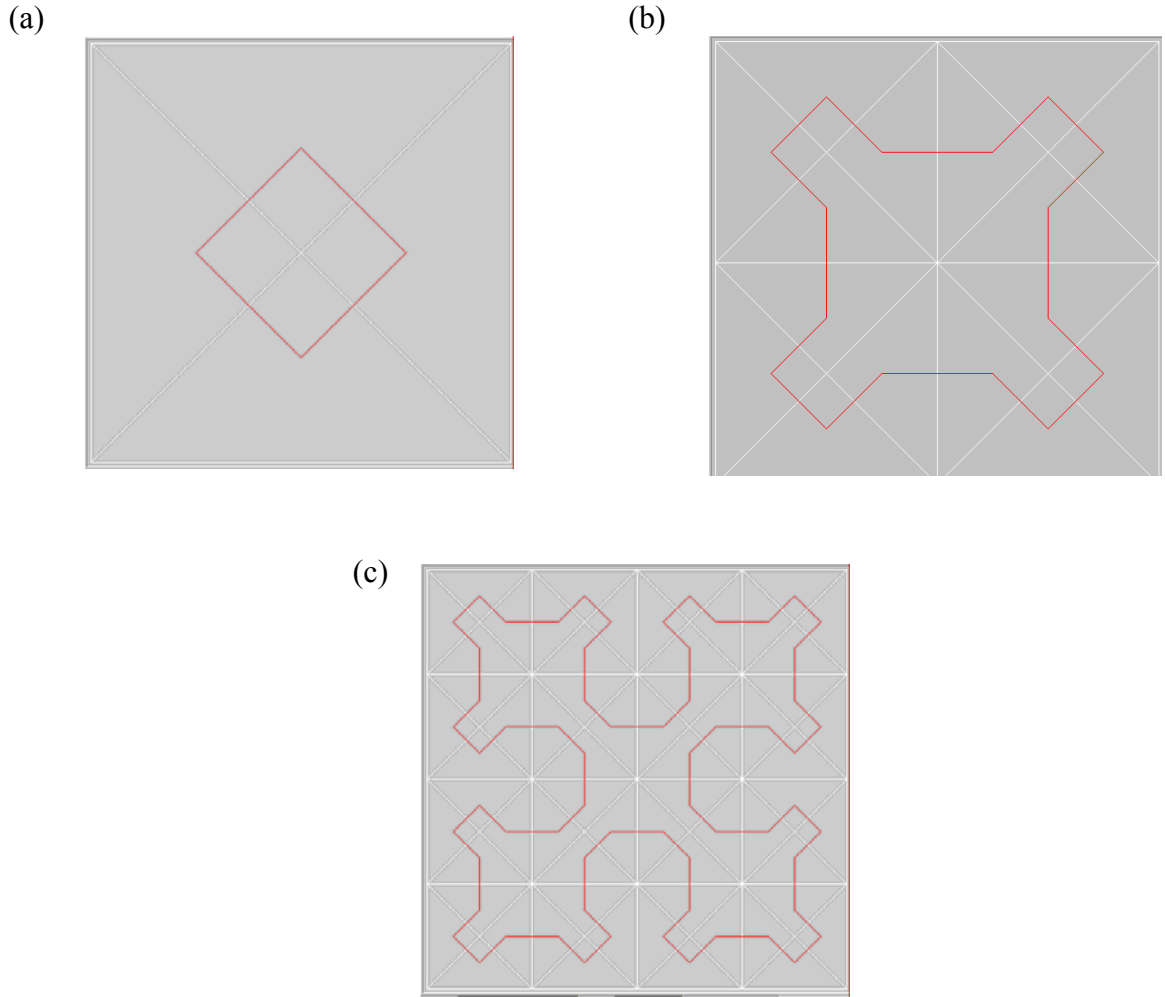
Bir alan doldurma eğrisi iki boyutlu birim kare içerisindeki her noktayı kapsaması nedeni ile dikkate değerdir. Böylece, Bir freze takımı alan doldurma eğrisini takip ettiğinde, tüm parça yüzeyi istenilen toleranslarda frezelenabilir.

Alan doldurma eğrileri mertebelerine göre belirlenir. N mertebeli bir eğri dört tane N-1 mertebeli eğrilerden meydana gelmektedir. Alan doldurma eğrilerinin mertebesi işleme hatalarının toleranslar içerisinde kalmasını sağlayacak şekilde tespit edilmektedir. Bununla birlikte, takım yolu parçaları kısa ve komşu parçalarla arasında keskin dönüşler var ise, alan doldurma eğrileri çeşitli dinamik problemlere neden olmaktadır. Bu takım yolu tipi



### 3.3.5.2 Sierpinski Alan Doldurma Eğrileri

Sierpinski alan doldurma eğrilerinde eğrinin kullanılacağı alan üçgenler ile bölünür ve bu üçgenlerin ağırlık noktalarından birim çizgi geçirilerek Sierpinski Alan doldurma eğrisi elde edilir. Aşağıda konu ile ilgili birden üçüncü mertebeye kadar olan alan Sierpinski alan doldurma eğrileri verilmiştir.

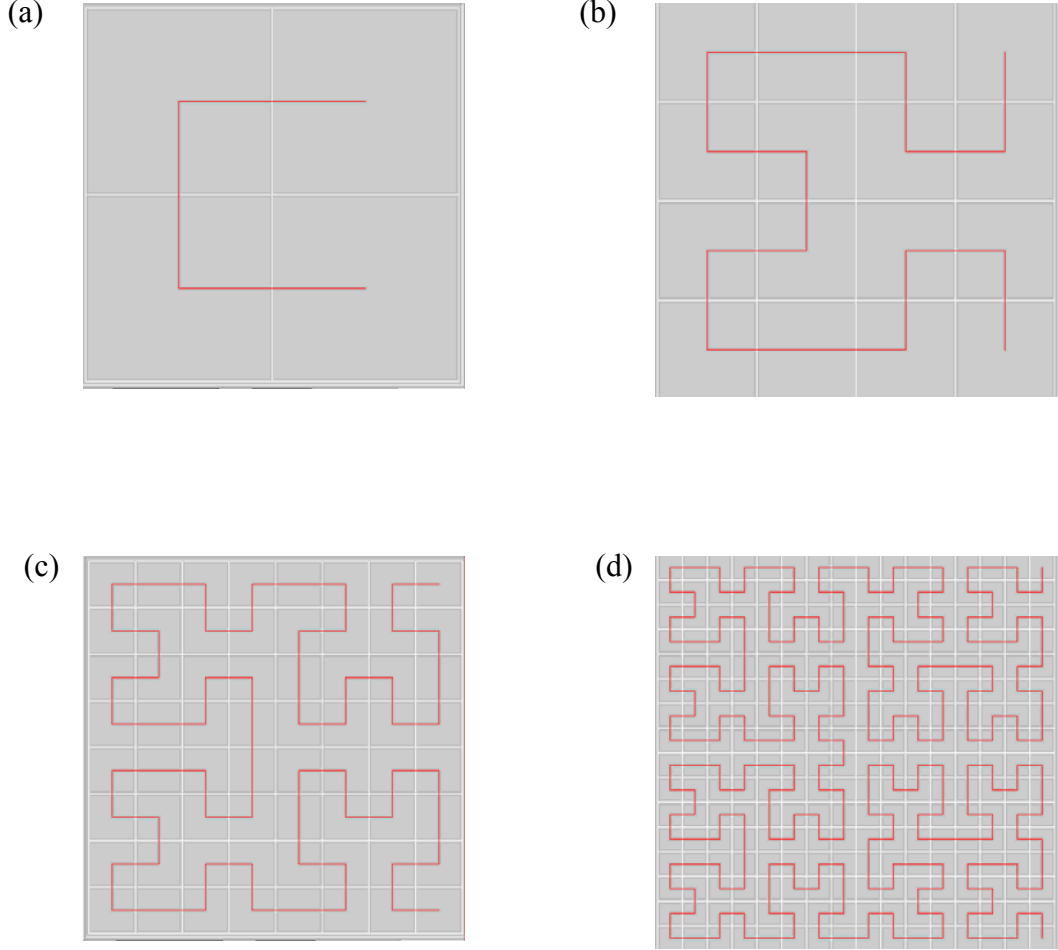


Şekil 3.12 Mertebelerine göre Sierpinski eğrileri (a) Mertebe 1 (b) Mertebe 2 (c) Mertebe 3

### 3.3.5.3 Hilbert Alan Doldurma Eğrileri

Hilbert eğrilerini ilk defa 1994 yılında Griffiths isimli araştırmacı kullanmıştır. Bu tip eğriler özellikle ince işleme gereken yerlerde takım yoğunluğunu arttırdığından dolayı kullanılır. Takım yoğunluğu arttığından dolayı düşük işleme verimliliği ve uzun takım yolları meydana gelmektedir. Bunların yanında Hilbert eğrileri takımın yönünün sürekli değiştirilmesini

gerektirdiğinden buda işleme süresini arttırmakta ve büyük kinematik problemlere yol açmaktadır.

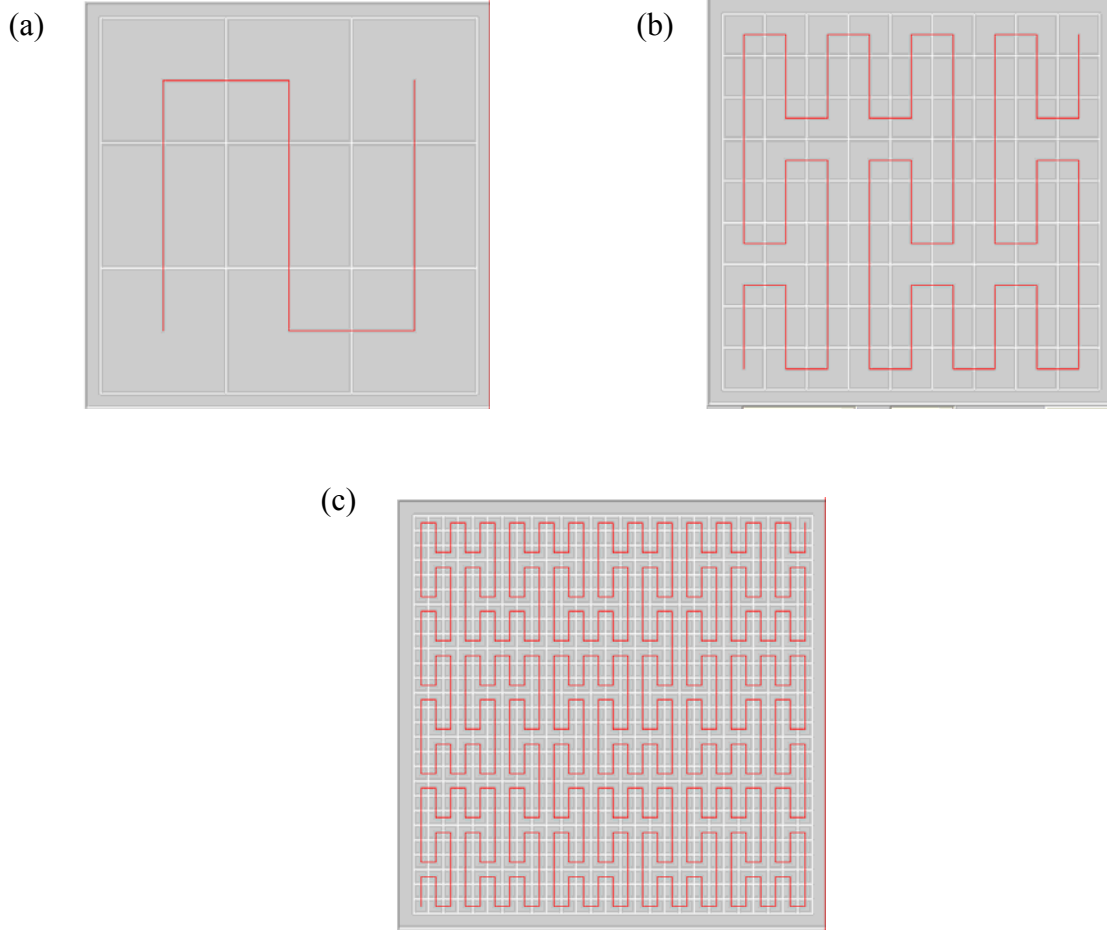


Şekil 3.13 Mertebelerine göre Hilbert eğrileri (a) Mertebe 1 (b) Mertebe 2 (c) Mertebe 3 (d) Mertebe 4

Hilbert eğrileri de Moore eğrilerinde olduğu gibi birim kareden oluşan hücreleri kullanır. N mertebeli bir eğri  $4^n$  adet hücreden ve  $4^n - 1$  adet çizgiden oluşmaktadır. Hilbert eğrilerinin özelliği başlamış oldukları hücrenin karşı tarafındaki en son hücrede son bulmalarıdır. Şekil 3.13'te örnek Hilbert eğrileri verilmiştir.

#### 3.3.5.4 Peano Alan Doldurma Eğrileri

Peano eğrileri kare biçimli hücreleri kullanmaktadır fakat Hilbert eğrilerinden farklı olarak her bir hücre 9 küçük kare biçimli hücreye bölünmüştür. Şekil 3.14'te Peano alan doldurma eğrisine ait örnekler verilmiştir.



Şekil 3.14 Mertebelerine göre Peano eğrileri (a) Mertebe 1 (b) Mertebe 2 (c) Mertebe 3

### 3.4 İş Parçası İşleme Stratejileri

Belirli bir parçayı işlerken parçanın kullanım alanına göre gerektirmiş olduğu çeşitli işleme toleransı ve yüzey kalitesi gibi özellikleri vardır. Bu toleransların ve özelliklerin tek bir takım ile karşılanması şüphesiz ki oldukça zaman alıcı ve maliyetli olabilmektedir. Bu yüzden iş parçalarını istenen yüzey kalitesinde ve toleranslarında imal edebilmek için çeşitli işleme stratejileri uygulanmaktadır. Bunlar genel anlamda kaba işleme ve finiş işleme olarak adlandırılır

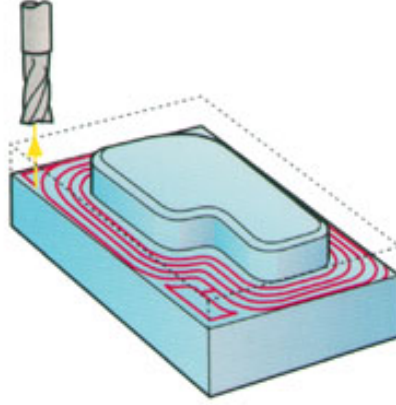
#### 3.4.1 Kaba İşleme

Günümüzde CAM programları içerisinde bulunan ve kullanıcıya kolayca uygulama kolaylığı veren birden çok kaba işleme stratejisi mevcuttur. Kullanıcı tarafından oluşturulan kaba işleme takım yolları üzerinde yapılacak değişiklikler çok fazla zaman almadan CAM programları tarafından sadece birkaç saniye içerisinde uygulamaya konulabilmektedir. Kaba işleme stratejileri kullanıcının zamandan ve maliyetten tasarruf etmesi açısından çok

önemlidir. Aşağıda günümüzde yaygın olarak kullanılan bazı kaba işleme stratejileri hakkında bilgiler verilmiştir.

#### 3.4.1.1 Ofset Alan Temizleme

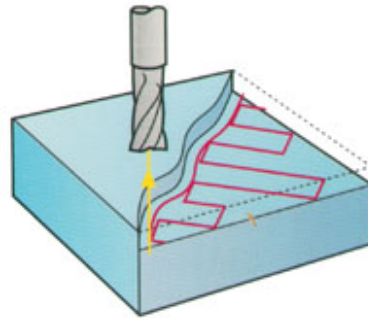
İçeriden dışarı, dışarıdan içeri gibi opsiyonlar ile modelinizi tanıyarak tezgah kesme zamanlarınızdan tasarruf sağlar. İşlenecek alanlardaki küçük bölgeleri en önce temizleyerek takımın zorlanacağı alanlar otomatik olarak ortadan kaldırılır. Model ofset tekniği ile de takımın tam kesme ağzı kullanılarak küçük yan geçişler ile modelin tamamen dışardan içeriye doğru işlenmesi sağlanabilir.



Şekil 3.15 Ofset alan temizleme [1]

#### 3.4.1.2 Profil Alan Temizleme

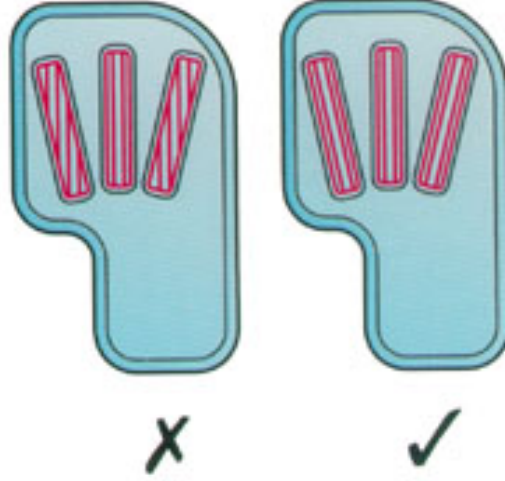
Bu özellik sayesinde, işleme yan adımından dolayı kalan malzemeyi temizleme veya döküm parçada alan temizleme yapmadan işlem yapabilme mümkündür.



Şekil 3.16 Profil alan temizleme [1]

### 3.4.1.3 Raster Kaba İçin Otomatik Açı

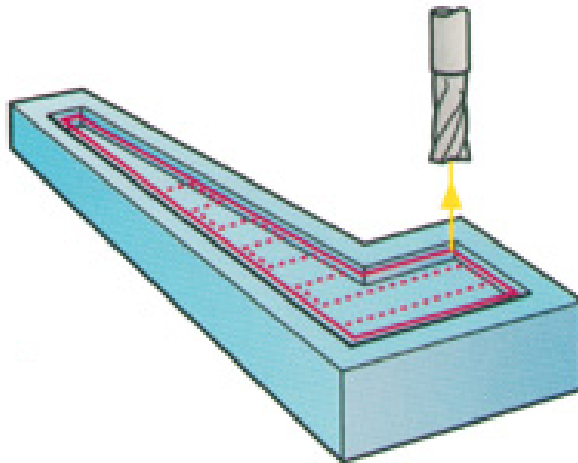
CAM programları kaba talaştaki geçiş açısını otomatik olarak hesaplar ve takımın havada dolaşmasını minimuma indirebilmek için takım yolunu optimize eder.



Şekil 3.17 Raster kaba için otomatik açı [1]

### 3.4.1.4 Gereksiz Hareketleri Filtreleme

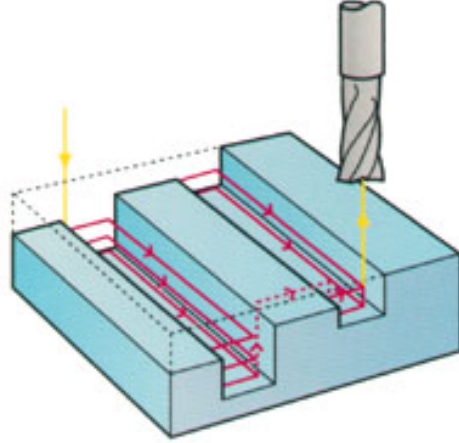
CAM programlarındaki bu özellik sayesinde takımın bir sonraki hareketinde kaldıracığı talaş otomatik olarak saptanır ve bu bölgeler için gereksiz takım yolu oluşturulmaz.



Şekil 3.18 Gereksiz hareketleri filtreleme [1]

### 3.4.1.5 Paket İşleme

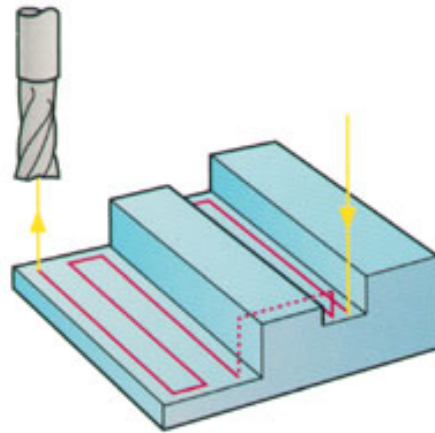
CAM programlarında takımın havada dolaşma zamanını minimize eden bu özellik ile model üzerinde bulunabilen ve otomatik olarak saptanan ceplerden ilk başlanan tamamıyla işlendikten sonra diğerine geçilir. Bu özellik finiş işleme takım yollarında da seçenek olarak yer almaktadır.



Şekil 3.19 Paket işleme [1]

### 3.4.1.6 Skim Özelliği

Bir çok CAM programının içerdiği bu özellik takımın bölgeler arası hareketleri nasıl yapacağını belirten opsiyonlardan bir tanesidir. Skim özelliği uygulandığında takım diğer bir bölgeye giderken minimum "Z" hareketi yaparak ulaşır. Bu da takımın her seferinde güvenli "Z" mesafesine çıkmasını minimize ederek parça işleme zamanlarını düşürür.



Şekil 3.20 Skim özelliği [1]

Kaba talaş kaldırma operasyonu esnasında, otomatik olarak yaratılan “Z” katmanları arasında takımın hareket şekli üç şekilde yaptırılabilir;

- Katmanlar arası direk inme,
- Kullanıcının istediği açıda rampa yaparak inme, rampa profili bir çizgi şeklinde, model profilini izleyerek veya helisel şeklinde yapılabilir.
- Daha önceden blok üzerinde delinmiş bir delik kullanarak,

#### 3.4.1.7 Tam Ağız Kesmeleri Minimize Etme

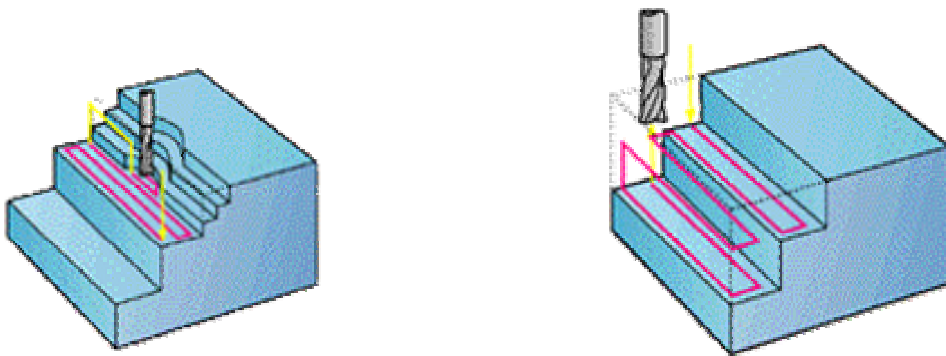
Kullanıcı tarafından verilen sabit yan adımlar CAM programı tarafından tekrar işlem den geçirilerek, takımın tam ağız kesme problemleri minimize edilir. Böylece takım tam genişliği ile pasoya girmeyeceğinden takım ömrü arttırılır.

#### 3.4.1.8 Küçük Alan Filtresi

Takım geometrisinden kaynaklanan veya takımın girmesinin sakıncalı bulunduğu alanları filtreleyebilme.

#### 3.4.1.9 Kaba Talaşta Kalan Yerleri İşleyebilme

Bu özellik sayesinde kaba talaşta da bir evvelki farklı takımdan kalan bölgeler otomatik olarak saptanarak kaliteli bir şekilde işlenebilme olanağı sağlanmaktadır.



Şekil 3.21 Kaba talaşta kalan yerleri işleyebilme [1]

### 3.4.1.10 Yay Fit Etme

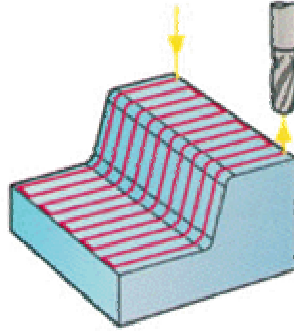
Model üzerinde bulunan köşe bölgelere kesici takımın zorlanmasını önlemek amacı ile isteğe bağlı olarak CAM programı tarafından yay konulur.

### 3.4.2 Finiş İşleme

Takım tezgahlarında işlenen parçaların gerektirdiği toleransların sağlanması için kaba işlemede kullanılan takımlardan çok daha küçük ve hassas takımlar kullanılması gerekmektedir. Bu takımlarla yapılan işlemler için de çeşitli işleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden önemli olan birkaçı aşağıda anlatılmıştır;

#### 3.4.2.1 Raster İşleme

Bu yöntemde kesme hareketleri X, Y eksenlerine veya kullanıcının belirlediği açığa paralel olarak tek yönde veya her iki yönde oluşturulabilir. CAM programlarının üstün takım yolu düzenleme teknikleri ile raster yaratılmış bir takım yolunun tek yönde kesmesi, istenilen açığa kadar sınırlanabilmesi vs. mümkündür.



Şekil 3.22 Raster işleme [1]

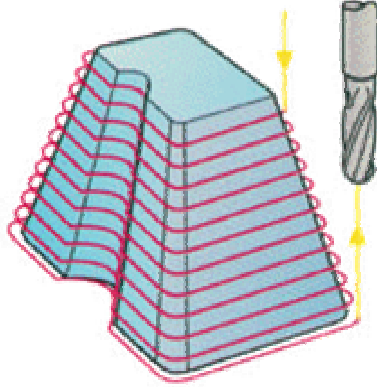
#### 3.4.2.2 Sabit Z İşleme

Bu yöntemde, kesici takım parçayı kademeli olarak değişen Z yüksekliklerinde dolaşarak kesme işlemini gerçekleştirmektedir.

Bu sayede dik duvarlarda kalemin hep sabit derinlikte (isteğe bağlı min-max. yükseklik kontrol edilebilir) çalışması sağlandığından hem talaş yükü kontrol edilir, hem de daha hassas dik yüzeyler elde edilir.

CAM programlarının kriterlerinde olduğu gibi bu kriterde de model üzerinde kőse bulunan bōlgelere yay fit edilerek bu bōlgelerde takımın zorlanması engellenir ve High Speed işleme için uygun kesintisiz kodlar üretilir.

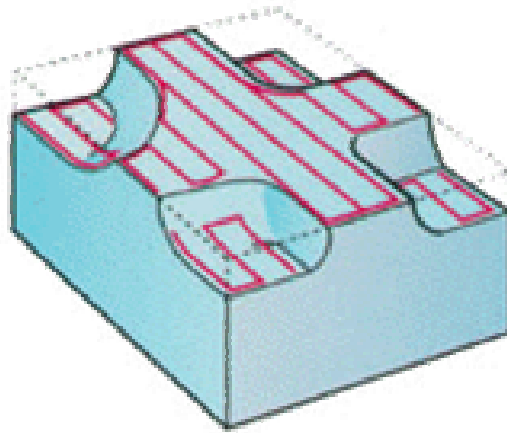
Bir ok CAM programı içerisinde sunulan ‘‘Spiral Sabit Z’’ ile de, model üzerinde takım yolunun normal kesme geçiőleri arasında dik adım hareketi olmayıp, neredeyse yüzeyden hiç kalkmayan sürekli spiral karakterli bir takım yolu elde edilmektedir.



Şekil 3.23 Sabit Z işleme [1]

### 3.4.2.3 Shallow Region İşleme

Shallow yōntemiyle istenilen alt ve st aı limitlerinde belirlenen bōlgeler işlenebilmektedir. Bu yōntem, genellikle ‘‘Sabit Z’’ yōntemi ile birlikte kullanılır ve daha evvel işlenmiş dik duvarları tekrar işlemeye gerek kalmadan yatay kısımlarda hassas yüzey kalitesi elde edilir. Ayrıca bu yōntem ile model üzerinde yatay bōlgeler bulunup işlenebilir.

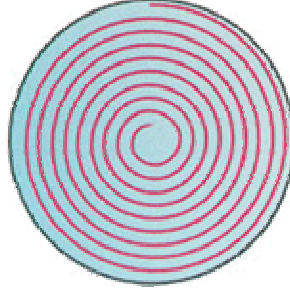


Şekil 3.24 Shallow region işleme [1]

#### 3.4.2.4 Spiral İşleme

Kesici takım merkezden dışa veya içe doğru bir spiral şeklinde hareket ederek kesme işlemini gerçekleştirmektedir.

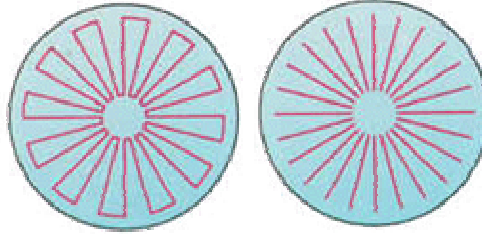
Spiral stratejileri çoğunlukla High-Speed işleme yöntemlerinde kullanılmakta ve dairesel parçalarda çok iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır.



Şekil 3.25 Spiral işleme [1]

#### 3.4.2.5 Radyal İşleme

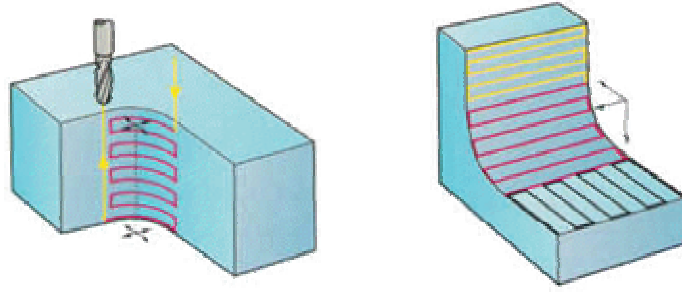
Yüksek yüzey kalitesinin istendiği dairesel parçalarda kullanılan bu yöntemde kullanıcı tarafından belirlenen bir merkezden 0-360 derece arasında belirlenen açılar arasında radyal takım yolları oluşturur.



Şekil 3.26 Radyal işleme [1]

#### 3.4.2.6 Projeksiyon İşleme

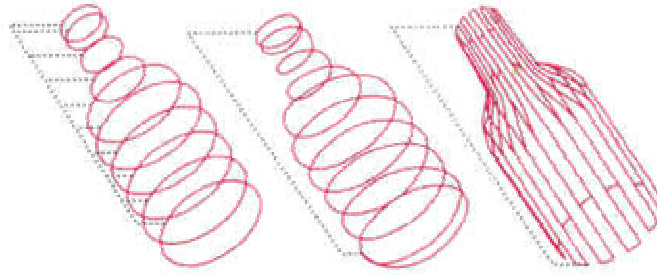
Kalıbın belli bir bölgesinin işlenmesinde tercih edilen bu yöntemde, kesici takım yolları seçilen bir düzlem, doğru veya bir noktada oluşturulan kılavuz izlerin parça üzerine yansıtılmasıyla belirlenir. Özellikle balkon altı diye tabir edilen, ters açığa düşen bölgelerin işlenmesinde uygundur. Ayrıca 3+2 eksen işlemlerde başarı ile kullanılabilir.



Şekil 3.27 Projeksiyon işleme [1]

### 3.4.2.7 Dönel İşleme

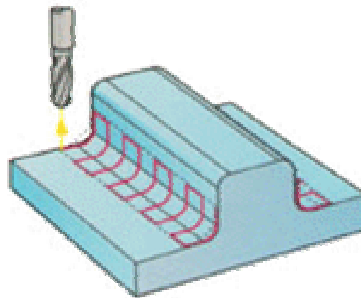
Döner tablaya sahip frezelerde, uygun parçaların işlenmesinde kullanılan bu yöntemde dairesel, spiral veya doğrusal işleme stratejileri ile “Sabit Z” yönteminden daha hızlı bir işleme sağlanmaktadır.



Şekil 3.28 Dönel işleme [1]

### 3.4.2.8 Rest İşleme

Bu yöntem bir evvelki büyük çaplı kesici takımından arta kalan yerlerin daha küçük çaplı kesici takım ile otomatik olarak temizlemesi için kullanılır. Böylece sadece işlenmeyen yerler işlenirken kesme zamanı azaltılmaktadır.

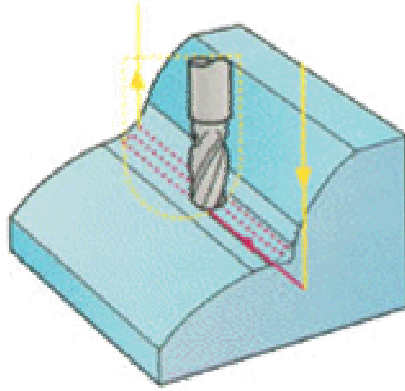


Şekil 3.29 Rest işleme [1]

### 3.4.2.9 Köşe İşleme

İç köşelerde kalan malzemeler, kesici takımın gidip-gelme ve boyuna kesme hareketleri yapmasıyla otomatik olarak temizlenmektedir.

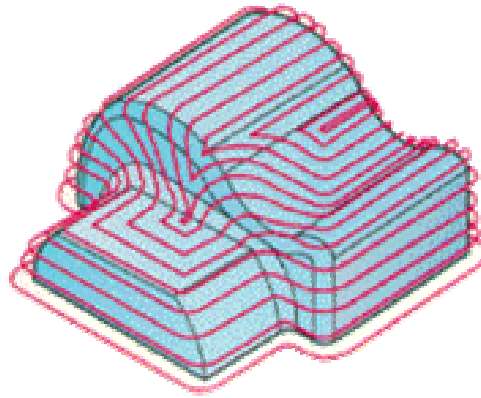
Parça üzerinde bir evvelki takımdan kalan dik ve yatay bölgeler istenilen ayırım açısında otomatik olarak saptanarak dik olan bölgelere sabit-Z, yatay olan bölgelere de ofset kriterli takım yolu CAM programları tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır.



Şekil 3.30 Köşe işleme [1]

### 3.4.2.10 Üç Boyutlu Ofset Finiş İşleme

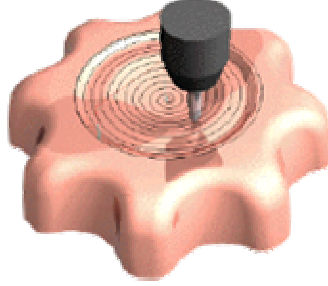
Bu işleme yöntemi ile takım hatvesi modelin yatay ve dik duvarlarında eşit miktarda yan adım kullanacağından süper finiş uygulamaları için uygundur.



Şekil 3.31 Üç boyutlu ofset finiş işleme [1]

### 3.4.2.11 Üç Boyutlu Ofset Spiral Finiş İşleme

3D Ofset finiş işlemeye benzer bu yöntem de yüzey üzerinde spiral şekilde adım atılmaktadır.



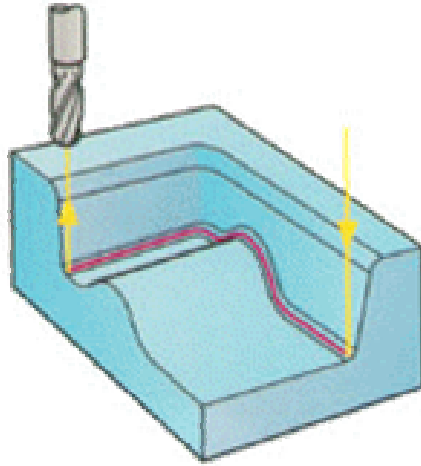
Şekil 3.32 Üç boyutlu ofset spiral finiş işleme [1]

### 3.4.2.12 Üç Boyutlu Ofset Pattern İşleme

Kullanıcı tarafından belirlenen bir profilin model üzerinde eşit aralıklarla veya istenen sayıda tekrarlanması sonucu elde edilen takım yolu tipidir.

### 3.4.2.13 Pencil İşleme

Bu yöntemde küçük çaplı kesici takım sadece iç köşeleri dolaşarak hem burulardaki fazla malzemeleri temizlemekte hem de 3 boyutlu profillerin işlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.33 Pencil işleme [1]

#### 4. TAKIM YOLU OLUŞTURMA ALGORİTMALARI ÜZERİNE YAPILAN ÖNEMLİ ÇALIŞMALAR

Takım yollarının kullanımı üzerine yapılan çalışmalar ilk defa CNC tezgahların endüstride kullanılması ile başlamış olup takım yolu algoritmaları günümüzde CNC tezgah sektörünün üzerinde durduğu en önemli konulardan biri haline almıştır. Şüphesiz ki bunun nedeni yöneylem araştırmalarında sürekli gelişen yeni tekniklerin çıkmasının çok büyük etkisi vardır. Herhangi bir problemde en iyi sonucu verebilecek çözüm teknikleri, istenilen iş parçasının en kısa sürede en kısa takım yolu uzunluğu ile ve en iyi yüzeyi elde edebilmek için oluşturulacak algoritmaların geliştirilmesinde kullanılabilir.

Aşağıda daha önce takım yolu geliştirme ile ilgili yapılmış olan çalışmalardan en önemlileri sırası ile verilmiştir.

##### 4.1 Üç Eksen Yüzey İşlemede Sabit Çıkıntı Yüksekliğine Göre Takım Yolu Oluşturma

Yung Feng tarafından 2001 yılında yapılan bu çalışmada üç eksenli tezgahlarda küresel uçlu takım kullanılarak yüzeylerin işlenmesinde etkili bir takım yolu oluşturma yaklaşımı bulunmaya çalışılmıştır. Çalışmanın amacı işlenen yüzey boyunca çıkıntı yüksekliğini sabit tutarak gereksiz takım yollarını minimize etmeye çalışmaktır. Önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada üç boyutlu kesme yüzeyinin varsayımlar kullanarak iki boyutlu olarak temsilleri kullanılmamıştır. Tasarlanan yüzeyin ofsetlenmiş yüzeyleri olan çıkıntı yüzeyi ve takım merkezinin yüzeyi bu çalışmanın yapılmasında kullanılmıştır. Bu yüzeyler çıkıntı eğrilerinin ve tasarlanan yüzeydeki kesici konum yollarının bulunmasında kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntemin etkinliği tipik bir model üzerinde uygulamaya alınarak izoparametrik ve izoplaner yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Burada önerilen yöntemden elde edilen sonuç işlenen yüzeylerde yüzey pürüzlülüğünün daha iyi ve kullanılan toplam takım yolu uzunluğunun ise daha kısa olmasıdır.

İşlenmesi gerekli olan karmaşık yüzeyler aerodinamik özellikleri ile beraber bir çok alanda kullanılırlar. Bu serbest şekilli yüzeyler genellikle üç eksenli tezgahlarda küresel uçlu takımlar kullanılarak işlenirler. CNC tezgahların bu tür parça imalatlarında kullanılması bir çok araştırma için konu olmuş olup bu konulardan biride takım yolu oluşturma algoritmalarıdır. Genellikle takım yolu oluşturmada iki kriter kullanılır. Bunlardan bir tanesi takım yolunun doğru olup olmaması diğeri ise takım yolunun optimal olup olmamasıdır. Araştırmalar takım yolunun optimalliği kriterinde iki karşıt konuyu gündeme getirmekte olup

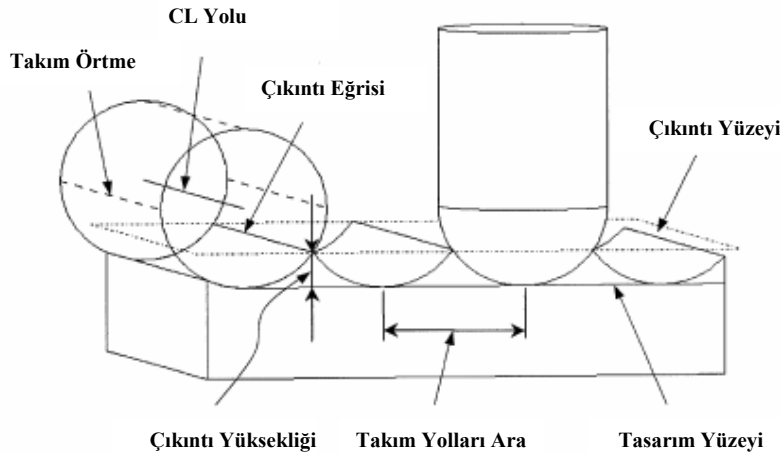
bunlar kalite ve verimliliktedir. Burada takım yolları arasındaki süre farkı da çok önemlidir.

Genel anlamda karmaşık yüzeylerin işlenmesinde kullanılan takım yolu oluşturma yöntemleri üç kategori altında toplanır. Bunlardan izoparametrik yöntem serbest şekilli yüzeylerin parametrik olarak temsil edilmesi avantajını kullanarak en çok kullanımda yer alan yöntemlerden biridir. İki parametreden bir tanesi sabit tutularak izoparametrik eğriler takım yolu olarak kullanılırlar. Takım yollarının türetilmesinde genellikle bu yöntemlerden yararlanılır. Parametrik uzaydaki takım yolları arasındaki mesafeden dolayı çıkıntı yükseklikleri oluşmaktadır. Bu yüzden İzoparametrik takım yolları serbest şekilli bir yüzeyde oldukça yoğundur. Bunun sonucunda değişik yüksekliklerde çıkıntılar oluşmakta ve bunların işlenen yüzeye dağılımlarından dolayı optimal olmayan sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

İzoplaner yöntem ise yüzeyi kesen paralel düzlemleri ele alarak takım yollarını oluşturmaya çalışır. Bu yöntemle takım yolları arasında düzgün mesafeler oluşturulmuş olur. Buradan da anlaşıldığı üzere izoplaner yöntem de optimal çözümü vermekte yetersiz kalabilmektedir.

Sabit çıkıntı yüksekliğine göre takım yolu oluşturma yöntemi ilk defa Suresh ve Yang tarafından ortaya atılmıştır. İzoparametrik ve izoplaner yöntemlerdeki gereksiz işlemler çıkıntı yüksekliği sabit tutularak minimize edilebilir. Bu yöntemde takım yolu uzunluğu diğer iki yöntem ile karşılaştırıldığında hayli kısadır.

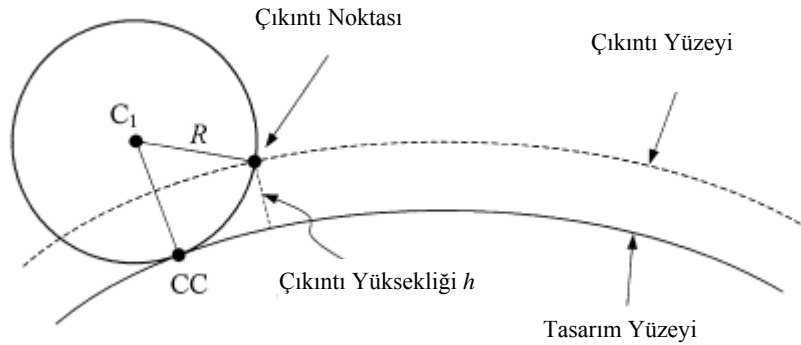
Sabit çıkıntı yüksekliği hakkında yapılmış olan ilk çalışma ile ilgili olarak iyileştirmeler daha sonra Lin ve Koren ile Sarma ve Dutta tarafından yapılmıştır. Burada anlatılan çalışmada çıkıntı yüzeyi ve takım merkez yüzeyi tasarım yüzeyine ve takım çapına bağlı kalarak tanımlanmıştır. Takım yolları varsayımlardan yararlanılarak üç boyutlu yüzeyi 2 boyutta temsil etme kullanılarak değil üç boyutlu yüzey geometrisi analiz edilerek oluşturulmuştur.



Şekil 4.1 İşleme yüzeyi üzerindeki geometrik unsurlar (Feng vd, 2001)

Burada anlatılan yöntem ile ilgili olan geometrik unsurlar Şekil4.1’de gösterilmiştir. Bir çok CAM ile ilgili literatürde de söz edildiği üzere kesici konumu (CL) takım yolundan geçen takımın merkezinin izlediği yoldur. Kesici temas (CC) yolu ise tasarım yüzeyi ve küresel uçlu takımın kesiştiği noktalardan oluşan yoldur. Üç boyutlu işlemede CL yüzeyi, tasarım yüzeyinin takım yarıçapı kadar yüzey normali doğrultusunda ofsetlenerek elde edilmesi ile oluşan yüzeydir. Ofsetleme ile oluşturulan bu yüzeye takım merkez yüzeyi denmektedir. Kesici takım, takım yolu boyunca hareket ettikçe takımın örttüğü bir yüzey oluşturulmuş olur. Bu örtme yüzeyi CL yolu boyunca hareket eden takımın çapından dolayı malzemeye temas eden yay olarak tanımlanabilir.

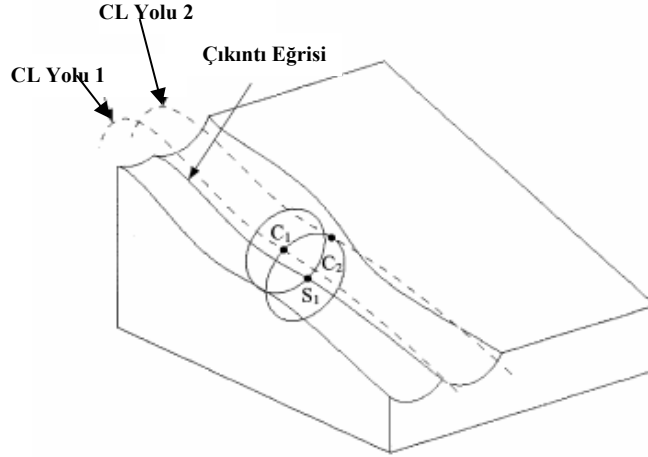
İki komşu takım yolu arasındaki yatay mesafe ise takım yolu aralığı olarak ifade edilmektedir. Çıkıntı eğrisi ise işlenen çıkıntı noktalarını takip eden üç boyutlu eğri olarak tarif edilebilmektedir. Sabit bir çıkıntı yüksekliği elde etmek için çıkıntı eğrileri belli bir değer ile yüzeyden ofsetlenerek oluşturulabilir. Gerçekte çıkıntı eğrisi iki komşu takım yolundan geçen takımın kesişim noktasının takip ettiği eğri ile temsil edilmektedir. Burada anlatılan çalışmada bu iki kavramdan yararlanarak yaklaşım ve varsayımlardan arındırılmış bir çalışma ortaya konulmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.2 Çıkıntı noktası belirleme (Feng vd, 2001)

Sabit çıkıntı yüksekliğine göre işleme yapabilmek için sunulan çalışmada iki sıralı adımı izlemek gereklidir. İlk önce verilen bir takım yolu ve çıkıntı yüksekliği gereksinimi kullanılarak ilgili çıkıntı eğrisi yanal doğrultuda belirlenir. İkinci olarak ise bilinen çıkıntı eğrisi sonraki takım yolunu oluşturmada kullanılır. Şekil 4.3 iki komşu CL yolu ile işlenecek yüzey için çıkıntı eğrisini göstermektedir. 1 numaralı CL yolu üzerindeki  $C_1$  noktası için bunun tanjantına dik olan düzlem çıkıntı eğrisi ile  $S_1$  noktasında kesişmekte olup  $S_1$  noktası  $C_1$  merkezli kesici takım çapı üzerinde yer almaktadır.  $S_1$  noktasındaki çıkıntı eğrisinin tanjantı  $C_1$  noktasındaki CL yolunun tanjantına genel olarak paralel değildir. Benzer olarak  $S_1$

noktasındaki çıkıntı eğrisine dik olan düzlem sonraki  $CL_2$  yolu ile  $C_2$  noktasında kesişmektedir.  $C_2$  noktasındaki  $CL_2$  yolunun tanjantı  $S_1$  noktasındaki çıkıntı eğrisinin tanjantına paralel değildir.



Şekil 4.3 Tipik komşu CL yolları ve çıkıntı eğrileri (Feng vd, 2001)

Daha önce tanımlandığı üzere takım örtme yüzeyi takım CL yolu boyunca hareket ettiği sürece oluşmaktadır. İlgili çıkıntı eğrisi takım örtme yüzeyi ile yanal doğrultudaki çıkıntı yüzeyinin kesişmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Yaygın olarak kullanılan parametrik  $P(u, v)$  yüzeyi için çıkıntı yüzeyi olan  $P_{SC}(u, v)$  aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

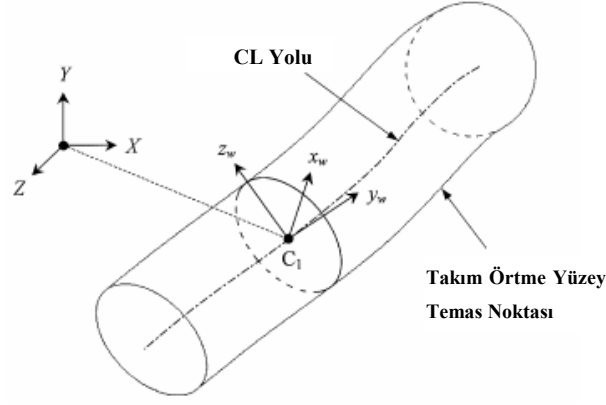
$$P_{SC}(u, v) = P(u, v) + nh \quad (4.1)$$

Burada  $h$  çıkıntı yüksekliği iken  $n$  ise normal vektörünün yönünü belirtmektedir. Normal vektörün yönü aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$n = \frac{P(u) \times P(v)}{|P(u) \times P(v)|} \quad (4.2)$$

Burada  $P(u)$ ,  $v$  parametresine bağlı olarak  $P$ 'den türetilmektedir. Aynı durum  $P(v)$  içinde geçerlidir. Üç eksenli takımı küresel uçlu takım ile işlemede verilen CL yolu ilgili  $P$  yüzeyindeki CC yolunun ofsetlenmesi ile elde edilir. Burada ofsetleme mesafesi takım çapı olan  $R$  ile ifade edilmektedir. Bu ilişki  $t$  parametresi kullanılarak aşağıdaki gibi açıklanabilir.

$$CL(t) = CC(t) + nR = P[u(t), v(t)] + \frac{P_u \times P_v}{|P_u \times P_v|} R = \begin{bmatrix} X_{CL}(t) \\ Y_{CL}(t) \\ Z_{CL}(t) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$



Şekil 4.4 CL yolu boyunca iş koordinat sistemi (WCS) (Feng vd, 2001)

Takım süpürme yüzeyinin parametrik eşitliği verilen bir CL yolu boyunca hareketli iş koordinat sisteminde (Work Coordinate System, WCS) türetilen eğrinin formüle edilmesi ile bulunabilir. Şekil 4.4 'de iş koordinat sistemi CL yoluna ve takım örtme yüzeyine bağlı olarak gösterilmektedir. Bu yerel kartezyen koordinat sistemi,  $x_w$ ,  $y_w$  ve  $z_w$  (1) CL yolu üzerindeki bir noktayı ( $C_1$  gibi) orijin kabul ederek, (2)  $C_1$  noktası ile ilişkili yüzey normali ( $n$ )  $z_w$  eksenini kullanarak ve (3)  $C_1$  noktasındaki CL yolunun tanjantının  $y_w$  eksenini kabul edilmesi ile oluşturulmuştur. Takım örtme yüzeyinde türetilen eğri takım yarıçapı olan  $R$  ile ilişkili bir halka olup, bu halka  $\theta$  parametresi kullanılarak aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$R_w(t, \theta) = \begin{bmatrix} R \cos \theta \\ 0 \\ R \sin \theta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Yukarıdaki eşitliğin model koordinat sistemine dönüştürülmesi ile takım örtme yüzeyinin parametrik olarak gösterimi bulunmuş olur.

$$\mathbf{R}_M(t, \theta) = {}^M_w [R] \cdot \mathbf{R}_w(\theta) + \mathbf{C}_1 \quad (4.5)$$

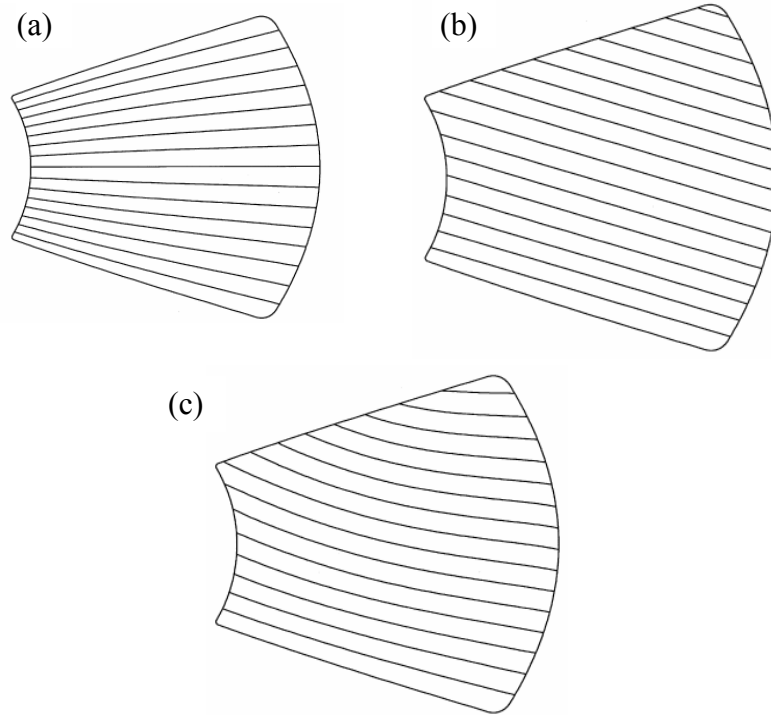
Burada,

$$\begin{aligned}
{}^M_w[R] &= \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} & C_1 &= \begin{bmatrix} X_{CL}(t) \\ Y_{CL}(t) \\ Z_{CL}(t) \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} t_{13} \\ t_{23} \\ t_{33} \end{bmatrix} &= \mathbf{n} = \mathbf{k}_w & \begin{bmatrix} t_{12} \\ t_{22} \\ t_{32} \end{bmatrix} &= \frac{CL'(t)}{|CL'(t)|} = \mathbf{j}_w \\
\begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{21} \\ t_{31} \end{bmatrix} &= \mathbf{j}_w \times \mathbf{k}_w = \mathbf{i}_w
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Yukarıdaki formüllerde  $\mathbf{i}_w$ ,  $\mathbf{j}_w$ ,  $\mathbf{k}_w$  pozitif olan  $x_w$ ,  $y_w$  ve  $z_w$  yönlerindeki birim vektörlerdir. Eşitlik (4.1) ve (4.5) kullanılarak çıkıntı eğrisi aşağıdaki eşitliğin çözülmesi ile bulunabilir.

$$P_{SC} - R_M = 0 \tag{4.7}$$

Buradan çıkan sonuçlar ile yapılmış olan uygulamada 25,4mm çaplı küresel uçlu takım kullanılmış olup çıkıntı yüksekliği 0,5mm ve tolerans 0,05mm olacak şekilde kabul edilmiştir. Aynı parça izoparametrik, izoplaner ve bu çalışmada anlatılan sabit çıkıntı yüksekliğine göre işleme yöntemi ile ayrı ayrı işlenmiş olup işlemede elde edilen takım yollarının şekilleri aşağıdaki çizimlerde sırası ile belirtilmiştir.



Şekil 4.5 (a) İzoparametrik takım yolu, (b) İzoplaner takım yolu, (c) Sabit çıkıntı yüksekliğine göre oluşturulan takım yolu (Feng vd, 2001)

Şekil 4.5'te görünen takım yolu türleri ile ilgili olarak elde edilen toplam takım yolu uzunlukları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.1 Toplam takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması

	İzoparametrik	İzoplaner	Önerilen Yöntem
Takım Yolu Uzunluğu (mm)	1828	1607	1507

Önerilen yöntem ile oluşturulan toplam takım yolu uzunluğu diğer iki yönteme göre %7 ile %21 arasında daha kısa bulunmuştur. (Feng vd, 2001)

#### 4.2 Takım Yolu Oluşturma Algoritmalarında Alan Doldurma Eğrileri

Alan doldurma eğrilerinin bilgisayarlaştırılmış olarak türetilmesi için bir çok yöntem geliştirilmiştir, fakat bu eğriler günümüze kadar olan süreçte NC işlemler için çok fazla kullanılmamıştır. Bu çalışma alan doldurma eğrilerinin serbest şekilli yüzeylerde takım yolu olarak kullanılıp kullanılmayacağını araştırmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle burada alan doldurma eğrileri ile tek yönlü konvansiyonel ve çift yönlü konvansiyonel takım yolları karşılaştırılmıştır. Sonuçta alan doldurma eğrilerinin verimliliği için daha fazla araştırma yapılabilir fakat bu çalışmada alan doldurma eğrilerinin kullanımda değerlendirilebileceği görülmektedir.

Sayısal kontrollü tezgahlar endüstriyel uygulamalarda daha iyi sonuçlar veren doğruluğu daha iyi olan parçaların imalatında kullanılmaktadır. Geleneksel NC takım yolları çizgi çizgi oluşan lineer doğru parçalarını izlemektedirler. Bu yöntem istenen parçayı elde etmek için genellikle başarılı olabilmektedir fakat çoğu zaman verimsizdir ve istenmeyen yüzey sonuçları verebilmektedir.

Çizgi çizgi yöntemi birçokları tarafından aşına olunan bir konu olup mühendislik uygulamalarında geniş bir alana sahiptir. Bununla beraber çok basit bir algoritması bulunmaktadır. Alan doldurma eğrilerinin matematiksel teorisi sadece bir yöntem olarak ortaya atılmıştır. Alan doldurma eğrileri yinelemeli algoritmalar ve karmaşık şekilli bilgisayar grafiklerinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Bu çalışma alan doldurma eğrilerinin NC uygulamalarında kullanılabileceği düşünülerek yapılmış olup serbest şekilli yüzeylerin

işlenmesinde alan doldurma eğrilerinin kullanılabileceği gösterilmiştir.

Peano bir çizgi segmentinin birim kare içerisinde sürekli çoğaltılarak alan doldurma eğrisinin elde edilebileceğini göstermiştir. (Bkz. Şekil 4.6)

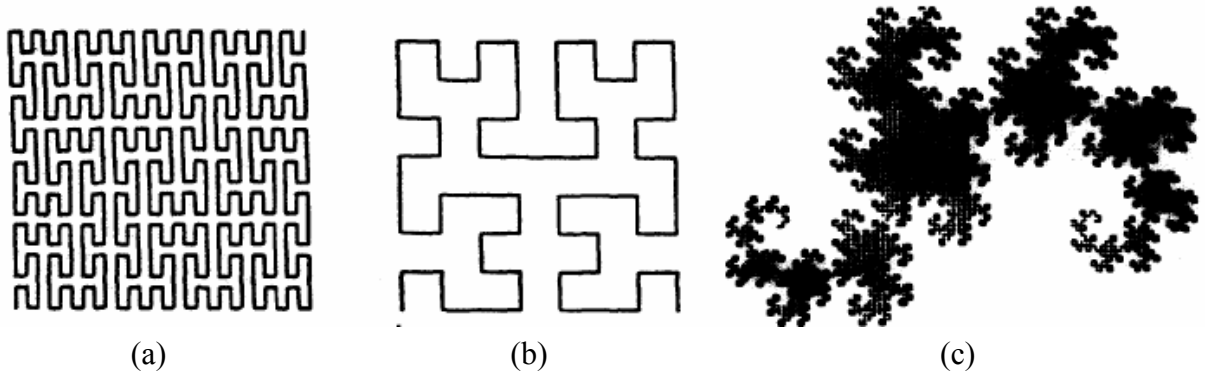
$$t = \sum_{n=1}^{\infty} A_n 3^{-n} \quad (4.8)$$

Bir eğri üzerindeki P(x,y) noktası parametrik olarak aşağıdaki gibi tanımlanır

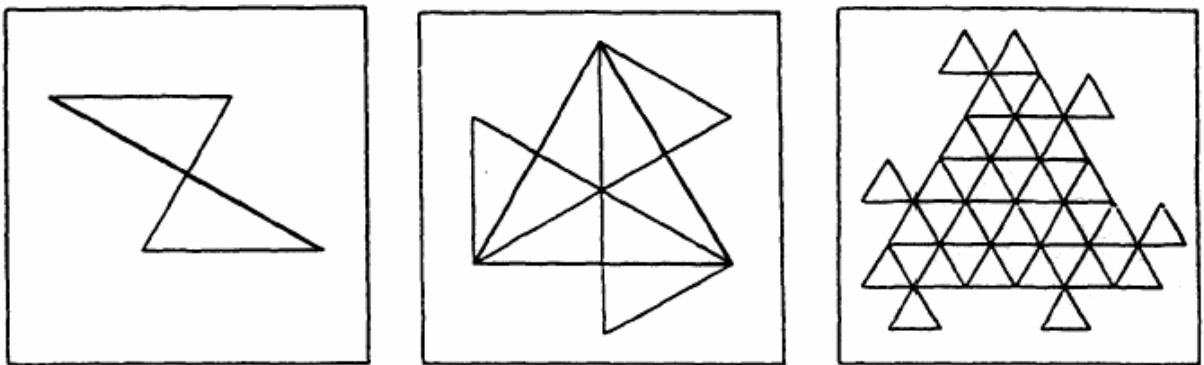
$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f\left(\sum_{r=1}^{n-1} A_{2r}, A_{2n-1}\right) 3^{-n} \quad (4.9)$$

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f\left(\sum_{r=1}^n A_{2r-1}, A_{2n}\right) 3^{-n}$$

Hilbert, alan doldurma eğrilerini kare içerisinde 4 adet birim kare belirterek birim çizgileri bu kareler içerisinde birleştirmiş ve kendi alan doldurma eğrisini oluşturmuştur. Aynı yöntemi 9 birim kare kullanarak Moore'da elde etmiştir.



Şekil 4.6 Alan doldurma eğrileri (a) Peano (b) Hilbert (c) Dragon (Cox vd, 1993)



Şekil 4.7 Alan doldurma desenleri elde etmek için şekillerin çoğaltılması (Cox vd, 1993)

Alan doldurma eğrilerinin bilgisayarlaştırılmış olarak türetilmesi için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan Null, yinelemeli olmayan bir algoritma geliştirmiş olup bunu FORTRAN IV ile uygulamaya dökmüştür. Wirth ve Goldschlager yinelemeli bir algoritmayı PASCAL ile uygulamışlardır. Cole ve Morrison isimli araştırmacılar, Peano, Hilbert ve Sierpinski eğrilerini yinelemeli algoritma kullanarak S-ALGOL isimli programda uygulamışlardır. Witter ve Wyvill interaktif grafik dili olan GROPER ile yinelemeli bir algoritma kullanmışlardır. Griffiths, Hilbert ve Sierpinski eğrilerini PASCAL'da döndürerek ve aynalayarak oluşturan bir algoritma kullanmıştır. Fisher, interaktif bir algoritmayı yeni bir programlama dili olan OCCAM'da kullanmıştır. Palmer, FORTAN'ın ilk versiyonlarında yinelemeli bir algoritma oluşturmuş olup Ackerman ise Hilbert eğrilerini Applesoft BASIC programı ile üretmeyi başarmıştır.

Bir alan doldurma eğrisi birim kare içerisinde sonsuz sayıda kıvrılarak her bir noktadan geçebilir. Bu çalışma yapılana kadar alan doldurma eğrilerinin uygulaması çok az yapılmaktaydı. Gerçekte alan doldurma eğrileri bilgisayar grafiklerinde kullanılan uygulamalardır. Null, Hilbert, Peano ve Sierpinski eğrilerini yazıcıları test etme amacı ile kullanmıştır. Diğer araştırmacılar ise bu eğrileri bilgisayarlarda resim tanımlama gibi maksatlarla kullanmış olup Davis ve Knuth Dragon eğrilerini eğlence maksatlı kullanmışlardır.

Bu çalışmada NC takım yollarından alan doldurma eğrilerinin kullanılabilirliği tartışılmış olup bu çalışmaya kadar henüz alan doldurma eğrileri imalat amaçlı kullanılmamıştır.

Takım yolarının geliştirilmesi için iki alan doldurma eğrisi seçilmiş ve araştırılmıştır. Bunlardan bir tanesi Palmer tarafından FORTRAN programının ilk versiyonlarında yazıcı kullanımı için uygulanmıştır. Bu yöntemde eşkenar üçgenler orijinal şekli elde edebilmek için kullanılmıştır. Birim kare kullanımının yerine bu yöntem kullanıldığı zaman Dragon eğrisine benzer şekiller ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden bu eğrinin kullanımı takım yolu oluşturmada hayli güç bulunmuştur.

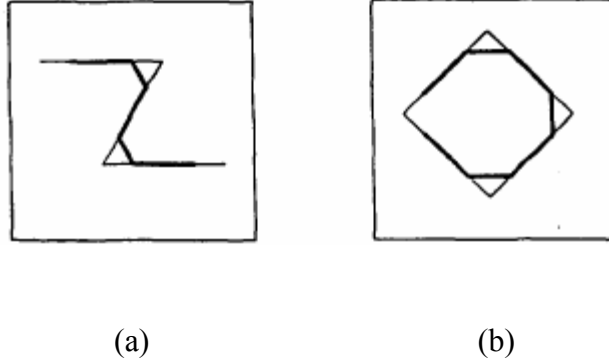
Alan doldurma eğrileri bazı noktaları iki kere kullanabilme gibi bir karakteristiğe sahip olup iyi bir takım yolu için bu istenen bir özellik değildir. İyi bir takım yolunda takımın bir noktadan bir kereden fazla geçmesi iyi sonuçlar vermez.

Takım yolunu kısaltma yeni noktaları oluşturmaktadır. Bu noktaların yardımıyla oluşturulan takım yolu orijinal yolu temsil etmelidir.

$$P_{N1} = \text{BEVEL} * P_1 + (1-\text{BEVEL}) * P_2 \quad (4.10)$$

$$P_{N2} = (1-\text{BEVEL}) * P_1 + \text{BEVEL} * P_2 \quad (4.11)$$

Burada  $P_1$  orijinal segmentin uç noktalarından bir tanesi iken,  $P_2$  diğer uç noktasıdır.  $P_{N1}$ ,  $P_1$ 'i temsil eden yeni nokta iken,  $P_{N2}$  ise  $P_2$ 'yi temsil eden yeni noktadır. Yeni segmentlerin uç noktaları tanımlandıktan sonra yeni segmentleri bağlayıcı çizgiler çizilmelidir.



Şekil 4.8 Temel eğrilerde köşe kırma (a) Palmer eğrisi (b) Moore eğrisi (Cox vd, 1993)

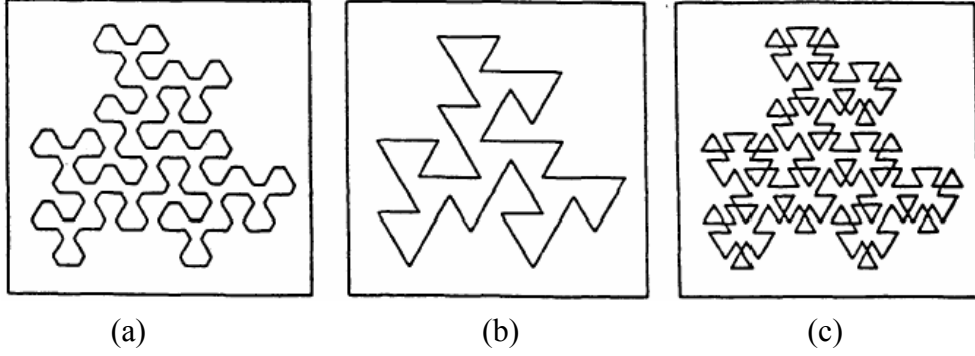
Takım yolu kısaltma işleminden önce  $3^{**}$  kadar çizgi varken kısaltma işleminden sonra çizgi sayısı iki katına çıkmaktadır.

Diğer seçilen eğri dokuz büküm operasyonu içeren Moore eğrisidir. Kısaltma işlemi öncesinde  $9^{**}$  çizgi bulunmakta iken sonrasında çizgi sayısı yine iki katına çıkmıştır.

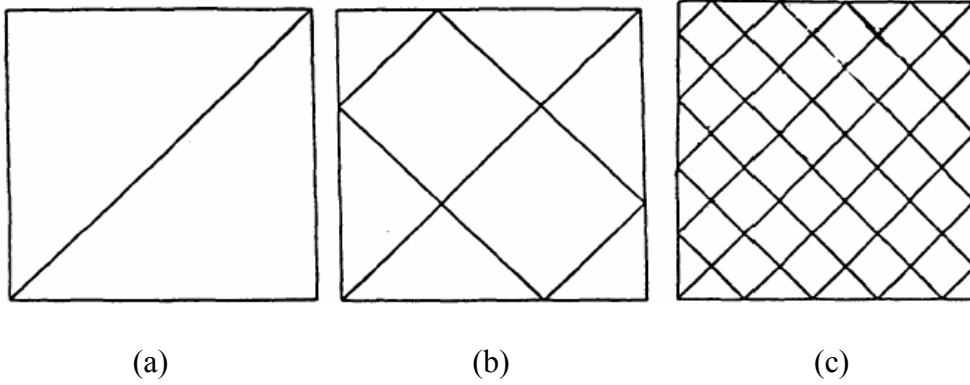
Serbest şekilli yüzeyler endüstride özellikle kalıp sektörü olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu tür parçalar genellikle işlediği yüzeyde yarıçap bırakabilen küresel uçlu takım ile işlenmektedirler. Her bir küresel uçlu takım yüzeyden geçtiği zaman komşu iki takım yolunun kesişiminden bayır şekilli çıkıntılar oluşmaktadır. Çıkıntı yüksekliğini takımın çapı ve komşu iki takım yolu arası mesafe belirlemektedir. Bu çıkıntı yüksekliğini daha büyük çaplı takım kullanarak yada takım yolları arası mesafeyi daraltarak azaltmak mümkündür. Her iki aksiyonda doğal engeller ile karşı karşıya kalabilmektedir. Takım çapı büyütüldüğünde son paso ile elde edilmek istenen yüzey pürüzlülüğü elde edilemeyebilir. Takım yolları arası mesafe azaltıldığında ise parçanın toplam işleme süresinde doğal olarak artış gözlemlenmektedir.

Takım yolları oluşturmayı etkileyebilecek bir sürü neden vardır. Bu nedenlerin sonucu parçanın yüzey pürüzlülüğünü ve toleranslarını etkileyebilmektedir. Parça işlendiği zaman

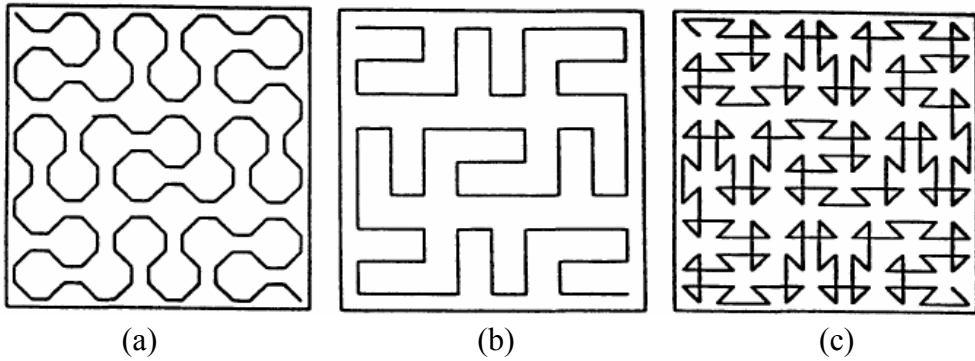
kalan çıkıntılar el ile işlenerek parça yüzeyinden kaldırılabilir. Yeni bir takım yolu geliştirmek parça yüzeyindeki bu çıkıntıları azaltabilir ve işlem süresini kısaltabilir. Bu problem için çözümlerden bir tanesi küresel uçlu takım yerine düz uçlu takım kullanmak olabilir. Cui düz uçlu takım kullanarak 3 çeşit takım yolunu ve bu takım yollarının ilgili takım merkezinden geçen yollarını türetmeyi araştırmıştır. Jensen ve Anderson düz uçlu takım ile son yüzeyi elde etmek için diferansiyel geometriyi 5 eksenli tezgahta kullanmışlardır.



Şekil 4.9 Köşe mertebeleri (a) Mertebe 0,25 (b) Mertebe 0,5 (c) Mertebe 0,75 (Cox vd, 1993)

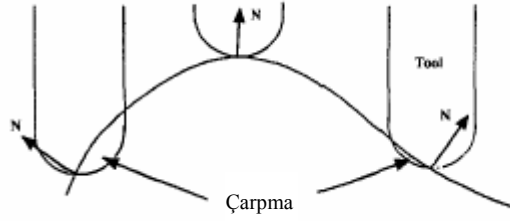


Şekil 4.10 Moore eğrisi mertebeleri (a) Mertebe 1 (b) Mertebe 2 (c) Mertebe 3 (Cox vd, 1993)



Şekil 4.11 Moore eğrisine uygulanan köşe kırma mertebeleri (a) Mertebe 0,25 (b) Mertebe 0,5 (c) Mertebe 0,75 (Cox vd, 1993)

Alan doldurma eğrileri süreklidir ve parametrik yüzeyi kolayca kaplayabilirler. Alan doldurma eğrilerinin muhtemel bir avantajı takım yolunu modifiye ederek takım dönüşlerini  $90^0$  'den daha büyük bir açıya getirip işlem süresi ve makine aşınmaları azaltılabilir. Alan doldurma eğrileri ile oluşturulan takım yollarının geleneksel takım yollarına göre diğer bir avantajı da yüzey üzerindeki şerit halinde görünen çizgilerin önerilen yöntemde görülmeceği olmasıdır. Böylelikle son pasodan sonra elde edilen yüzey her noktada uniform şekilli olacaktır.



Şekil 4.12 İşleme esnasında gerçekleşen çarpma (Cox vd, 1993)

Serbest şekilli bir yüzeyde takım eksenini eğrinin normali ile aynı eksende olmaz ise takımın parçaya dalması gibi bir hata meydana gelecektir. Bu problemi ortadan kaldırmak için takım sürekli olarak parçanın şekline göre ofsetlenmeli yada eğrinin tanjantından geçirilmelidir. Yüzey eğriliği Jensen'in tekniği ile 5 eksenli bir tezgahta takıma aktarılabilir ve parça bu yöntemle işlenebilir. Bu durumda parçanın endüstride çok fazla kullanılan 3 eksenli bir tezgahta işlenmesi mümkün olmayacaktır. Takım yolu üzerindeki parçaya giren noktaları elimine etmek için aşağıdaki eşitlik verilmiştir.

$$V_T = R * u + V_P - R * e_3 \quad (4.12)$$

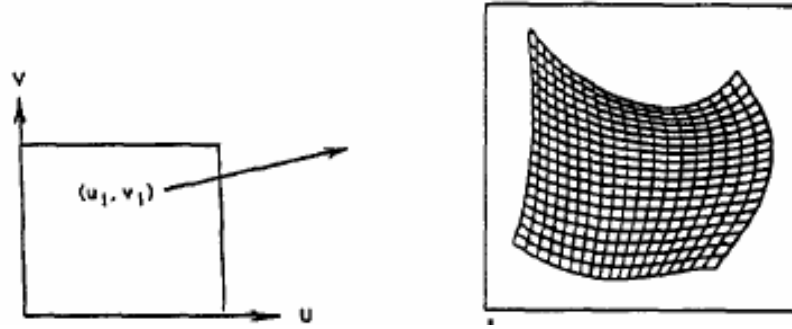
Burada  $V_T$  takım yolu oluşturmadaki noktanın vektörüdür.  $R$  küresel uçlu takımın yarıçapı  $v$  yüzeyin birim normal vektörü olup  $V_P$  yüzeydeki mevcut konumdur ve son olarak  $e_3$  ise Z yönündeki birim vektördür.

Moore eğrileri birim kare için geliştirildiğinden iki parametrelili ( $0 < u < 1$ ,  $0 < v < 1$ ) bir alanda kullanılabilirler. Bu alan daha sonra uygun serbest şekilli yüzeye uygulanabilir. (Şekil 4.13). Daha sonra ise takım yolu bu alana uygulanabilir (Şekil 4.14)

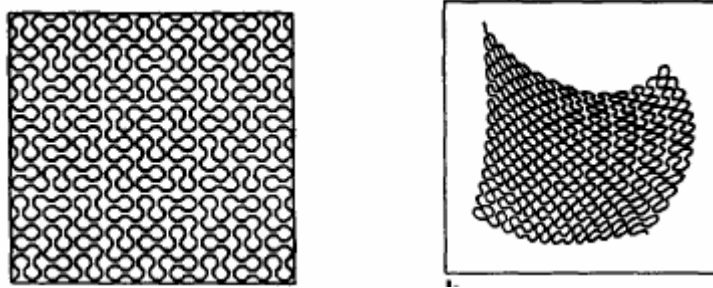
Bir Bezier yüzeyi matris ile çoğaltılarak aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$X(u, v) = BU * P * BV \quad (4.13)$$

Burada  $X$  yüzeyde bir nokta,  $BU$   $u$  yönündeki harmanlama matrisi  $BV$   $v$  yönündeki harmanlama matrisi olup  $P$  kontrol noktasının matrisidir.

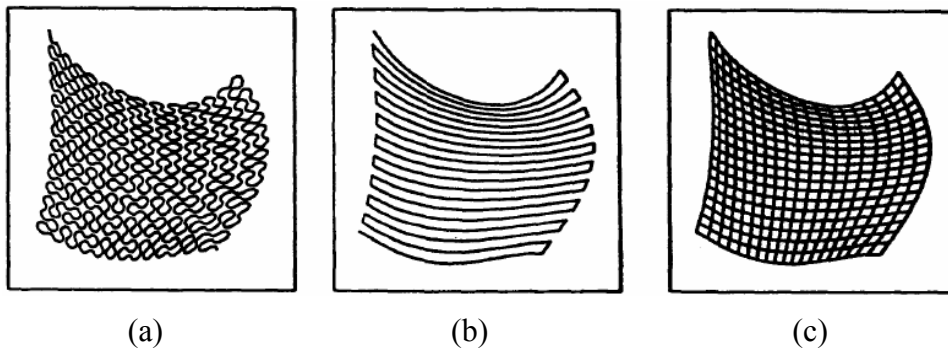


Şekil 4.13 İşlenecek alan (Cox vd, 1993)



Şekil 4.14 Takım yolunun işlenecek alana uygulanması (Cox vd, 1993)

Seçilen alan bir birim kare olduğu sürece  $u$  ve  $v$  değerlerinin hepsi 0 ve 1 arasında bulunur. Bezier yüzeyi alan üzerinde bir dizi  $(u, v)$  değeri ve bunların ilgili yüzey değerlerinin seçilerek yapılması ile oluşturulur.



Şekil 4.15 Bezier yüzeyine uygulanan takım yolları (a) Moore eğrisi (b) Geleneksel yol (c) Çift yönlü geleneksel yol (Cox vd, 1993)

Şekil 4.15 (a) 'da Moore eğrisi, takım yolu boyunca bulunan  $u$  ve  $v$  değerlerinin seçilmesi ile Bezier yüzeyine konumlandırılmıştır. Geleneksel bir takım yolu ile karşılaştırmak için bu takım yolu Şekil 4.15 (b) 'deki gibi yine Bezier yüzeyine konumlandırılmıştır. Geleneksel bir takım yolu oluşturmak için  $u$  ve  $v$  değerlerinin yineleme sayıları belirlenmelidir.  $u$  ve  $v$  değerleri 0 ile başlar,  $v$  değeri sabit tutulurken  $u$  değeri 0-1 aralığında belirli adımlar ile artırılarak bu tür takım yolları oluşturulmuş olur. Alan doldurma eğrileri ile işlenmiş gibi bir yüzey elde etmek istiyorsak  $u$  ve  $v$  değerlerinin ikisi de 0-1 aralığında belirli adımlar ile hareket ettirilerek Şekil 4.15 (c)'deki gibi takım yolu elde edilir.

Yukarıda tartışıldığı üzere son yüzey bir çok faktöre bağlıdır. Bunlar takım çapı, takım yolu adımı ve yüzey eğrileri olarak tarif edilebilir. İşlenen parçalar için genellikle pürüzsüz bir yüzey tercih sebebidir.

Karşılaştırma maksadı ile dört parça işlenmiş olup bunlardan bir tanesinde Pamer'in eğrileri düzgün bir yüzeyde kullanılmış, ikincisinde Bezier yüzeyi Moore eğrileri ile işlenmiş, üçüncüsünde aynı Bezier yüzeyi geleneksel takım yolu işlenmiş ve son olarak yine aynı yüzey çift yönlü geleneksel takım yolları ile işlenmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için takım yolu türetmede aynı sayıda nokta ile ilgilenilmiştir. Takım çapı olarak 0,25 inch'lik çaplı takım kullanılmıştır. Düz yüzeyde çıkıntı yüksekliği yüzeyden dışarı doğru iken, Bezier yüzeyinde yüzeyde bulunan farklı eğrilerden dolayı yüzeyden dışarı doğru değildir.

Alan doldurma eğrilerinin ve geleneksel takım yollarının bu çalışma ile karşılaştırılması oldukça güçtür. Bunun nedeni finiş yüzeylerin birbirinden oldukça farklı olmasıdır. Buna rağmen takım yolu uzunluğu karşılaştırılabilir bir faktördür.

Tablo 4.2 Bezier yüzeyinde uygulama yapılan üç takım yolundan Moore eğrilerini, geleneksel takım yolunu ve çift yönlü geleneksel takım yolunu karşılaştırmaktadır.

Moore eğrisi ile I numaralı takım yolunun karşılaştırılması sonucu Moore eğrisinin göreceli olarak çok daha fazla malzeme kaldırdığı görülmektedir. Bununla beraber I numaralı yönteme göre biraz daha uzun olsa da daha iyi bir yüzey kalitesi vermektedir. Moore eğrilerini II numaralı yöntem ile karşılaştırırsak alan doldurma eğrilerinin avantajını daha iyi görebiliriz. Moore eğrileri daha kısa sürede daha fazla malzeme kaldırabilmektedir. Çünkü %10 daha kısadır. Bunun yanında Moore eğrileri daha iyi bir yüzey kalitesi vermektedir.

Çizelge 4.2 Takım yolu oluşturma yöntemlerinin karşılaştırılması (Cox vd, 1993)

	Moore	Geleneksel Yöntem	Çift Yönlü Geleneksel Yöntem
Yüzeydeki Nokta Adedi	1458	1460	1440
Takım Yolu Uzunluğu (inch)	164.6900	122.4535	223.2437
Kesme Hızı (inch/dk)	49.31	48.98	49.17

Diğer iki önemli unsur alan doldurma eğrilerinin makineye ve yüzeye olan etkileridir. Alan doldurma eğrileri ile çok sayıda küçük çizgi segmentleri yüzeye uygulanmış olup bunların her birinin yönü farklıdır. Takımın hızlanıp yavaşlaması ilerlemede kısıtlar oluşturabilmektedir. Sürekli bir çizgi boyunca işleme takımının sürekli hızlanıp yavaşlamasını önlemektedir. Dolayısı ile makineye mekanik olarak da yarar sağlayabilmektedir.

Yüzey ile ilgili olan ikinci unsur ise yüzey üzerinde bulunan çıkıntılarının belirli bir doğrultuda olmasından dolayı el ile yüzey parlatma işçiliğinin artmasıdır. Bu görüşü ispatlayacak bir veri henüz olmamasına rağmen yüzey kalitesini arttırmak için daha bir çok araştırma yapılmalıdır.

Bu çalışma ile alan doldurma eğrilerinin takım yolu olarak kullanılabilceği gösterilmiştir. Moore eğrilerinin takım yolu olarak kullanılması ile malzeme kaldırmadaki etkinliği görmemiz sağlanmıştır. Fakat takım yolu kırma ve çıkıntı yüksekliği ile ilgili ilişkiler hala araştırmaya açık unsurlardır. (Cox vd, 1993)

### **4.3 Beş Eksenli NC İşleme İçin Alan Doldurma Eğrileri Kullanılarak Takım Yolu Oluşturma**

Bu çalışma serbest şekilli yüzeylerin beş eksenli NC işlenmesi için yeni bir takım yolu planlama yöntemi sunmaktadır. Bu yeni yöntem bilgisayar grafiklerinde oldukça geniş kullanılan alan doldurma eğrilerini oluşturma algoritmalarını temel almıştır. Çalışma üç adım içermektedir. İlk adım kafes oluşturma, ikinci adım alan doldurma eğrilerini oluşturma, üçüncü adım ise takım yolu doğrulama. İzoparametrik takım yolları ile karşılaştırıldığında önerilen yöntemde toplam takım yolu uzunluğu azalmıştır.

Sayısal kontrollü beş eksenli NC tezgahlar üç eksenli tezgahlar ile karşılaştırıldığında daha hızlı malzeme kaldırma oranı, daha az yüzey işleme zamanı ve karmaşık yüzeylerin işlenmesinden dolayı kolaylık sağlaması nedeni ile popüleritesi gittikçe artmaktadır. Beş eksenli işlemede takım adaptasyonu iki serbestlik derecesi ile ayarlanır, böylece yüksek işleme etkinliği başarılmış olunur. Bu avantajlardan yararlanmak için beş eksenli işleme için çok sayıda takım yolu oluşturma yöntemi geliştirilmiştir.

En basit takım yolu oluşturma metotları basitlik ve hesaplama kolaylığından dolayı Zig zag yada spiral modellerin kullanımını içermektedir. Daha yüksek işleme etkinliği elde etmek için daha karmaşık takım yolları oluşturmada değişik karmaşık yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin yapay sinir ağları yaklaşımı (Sue&Shin, 1996), Voroni diyagramı tekniği (Jeong&Kim,1999), monoton zincir yöntemi (Park&Choi, 2000), mesafe harita yöntemi (Jeong&kim, 1999) ve son olarak şebeke türetme yöntemi (Makhanov, 2002).

Bu çalışma yüzeylerin beş eksenli NC işlenmesinde takım yolları olarak alan doldurma eğrilerini (SFC, Space Filling Curves) kullanır. SFC'ler bilgisayar grafikleri, imaj işleme vb. birçok uygulamada kullanılır. NC takım yolu oluşturmada SFC uygulamaları ilk defa Griffiths ve Cox tarafından 1994 yılında önerilmiştir. Cox, Moore eğrilerini kullanırken, Griffiths takım yolu oluşturmada Hilbert eğrilerini kullanmayı tercih etmiştir. Her iki takım yolu oluşturma yönteminde yuvarlak uçlu takım ile üç eksenli tezgahlardaki işlemede gösterilmiştir. Bununla beraber alan doldurma eğrileri çok sayıdaki SFC dönüşlerinden dolayı beş eksenli işlemede çok sık kullanılmamıştır. Sonuç olarak kesici takımın keskin açılı dönüşlerinden dolayı büyük sayıda yanlışlıklar yapılmaktadır.

Yinede SFC temelli takım yolu oluşturmanın bir çok çekici özelliği vardır. Örnek olarak, eğrilerin bir bölümüne lokal olarak uygulanabilme özelliği verilebilir. Ek olarak yüzey, ihtiyaç duyulan takım yolları elenerek tek bir takım yolu ile işlenebilmektedir.

Yukarıdaki olumsuzlukların üstesinden gelen ve avantajları kullanmaya devam eden yeni bir takım yolu yöntemi (SFC tabanlı) bu çalışmada önerilmiştir. Yöntem üç adım içermektedir;

- Kafes oluşturma
- Alan doldurma eğrilerinin türetilmesi
- Takım yolu doğrulama

Dikdörtgensel kafes geleneksel izoparametrik çizelgeden türetilen iki zig zag takım yolu ile oluşturulur. Daha sonra kafes Hamiltonian yol algoritması tarafından türetilen bir SFC ile doldurulur. Son olarak takım yolu ve takımın adaptasyonu büyük kinematik hatalara neden

olan keskin dönüşlerin elimine edilmesi için ayarlanır.

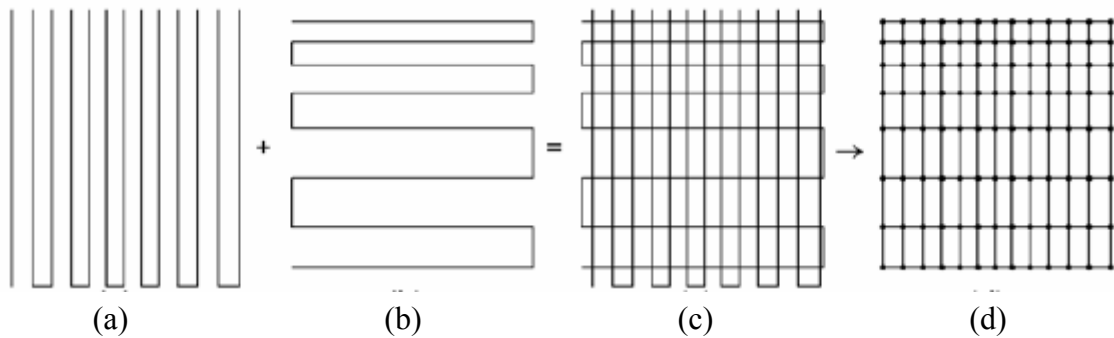
Sonraki adımlarda SFC kullanılarak beş eksenli NC işlemede takım yolu oluşturma gösterilmiş olup daha sonra SFC kullanılarak elde edilen takım yolunun performansı üzerine elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Bir alan doldurma eğrisi birim kare üzerindeki birim çizgilerin sürekli birleştirilmesi ile elde edilir. Sonunda SFC iki boyutlu birim karenin her noktasından geçmiş olur. En tanınmış olanı dönen Hilbert eğrileri olup takım yolu oluşumlarını da içeren bir çok uygulamaya sahiptir.

Hilbert'in eğrileri özellikle ince işleme gereken yerlerde takım yolu yoğunluğunu arttırdığından dolayı kullanılır. Takım yolu yoğunluğu arttığından dolayı düşük işleme verimliliği ve uzun takım yolları meydana gelmektedir. Bunların yanında Hilbert eğrileri takımın yönünün sürekli değiştirilmesini gerektirmekte olup bundan dolayı işleme süresi artmakta ve büyük kinematik problemler meydana gelmektedir.

Bu olumsuzlukları yenme için adaptif SFC uygulaması bu çalışmada önerilmektedir. Adaptif SFC oluşturulması Hamiltonian yolunu bulma problemi olarak formüle edilebilir.

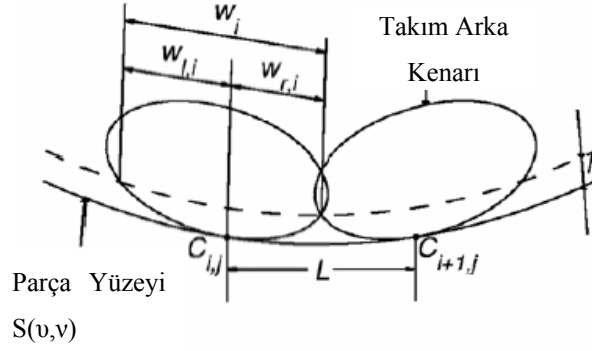
Şekil 4.16 (a-c)'de gösterildiği üzere izoparametrik n ve m takım yollarından oluşturulmuş bir kafesi ele alalım izoparametrik yollar en kısa takım yolları arası hesaplanarak oluşturulmuş olup bu diğer takım yolu için ofset kabul edilmiştir. Takım yolları arasındaki boşluklar yüzey şekline, takım şekline, büyüklüğüne ve izin verilen çıkıntı yüksekliğine bağlıdır. Bunun yanında iki komşu takım yolu işleme toleransının elde edilmesi için üst üste binmelidir. (Şekil 4.17) İşleme çizgisinin genişliğinin ve düz uçlu bir takım için takım yolu ara mesafelerinin hesaplanması ile ilgili bir teknik bu çalışmada önerilmiştir.



Şekil 4.16 (a) v yönlü izoparametrik takım yolu (b) v yönlü izoparametrik takım yolu (c) İki yönlü izoparametrik takım yolu (d) Bulunan kafes (Machanov vd, 2003)

Bundan başka kafes iki komşu yolun bağlanması için bir kenar oluşturmalıdır. (Şekil 4.16 (d)) İki birleştirilmiş çizginin kesilmesi çıkıntı yüksekliğini tolere etmektedir.

Grafik olarak kafes üzerinde takım yolu oluşturma yöntemi önceki bölümde gösterilmiştir. En kısa uzunlukta bir takım yolu oluşturma bir Gezgin Satıcı Problemi'dir. Problem bir NP olduğundan dolayı çözmek yavaş ve verimsizdir.

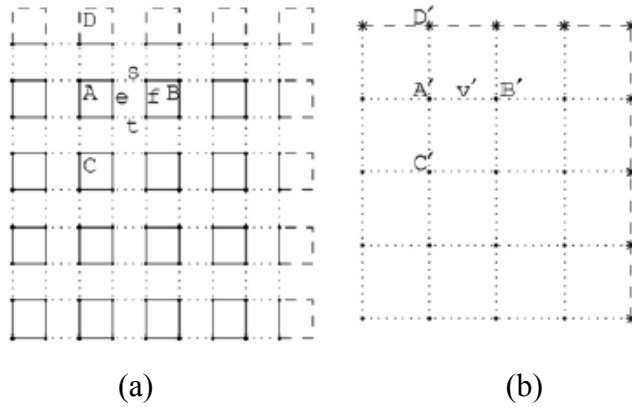


Şekil 4.17 Komşu takım yollarının üst üste gelmesi (Machanov vd, 2003)

Bu çalışmada basit ve hesaplanabilir bir algoritma, Hamiltonian yolunun türetilmesi için kullanılmıştır. Çalışmada keyfi bir dikdörtgenel kafes ele alınmıştır. Öncelikle bütün kesimler küçük dolaşım ile kapatılmıştır, bu dikdörtgenler birleşerek tekli Hamiltonian yolunu oluştururlar. Başlangıç dikdörtgeni dört komşu kesişim noktası bağlanarak oluşturulur. (Şekil 4.18 (a)) Herhangi iki komşu dikdörtgen tek bir büyük dikdörtgen tarafından birleştirilir. Bu birleşimin maliyeti aşağıda verilmiştir.

$$Cost(A, B) = |s| + |t| - |e| - |f| \quad (4.14)$$

Burada  $|e|$ ,  $e$  kenarı ile bağlanan iki nokta arasındaki mesafedir.

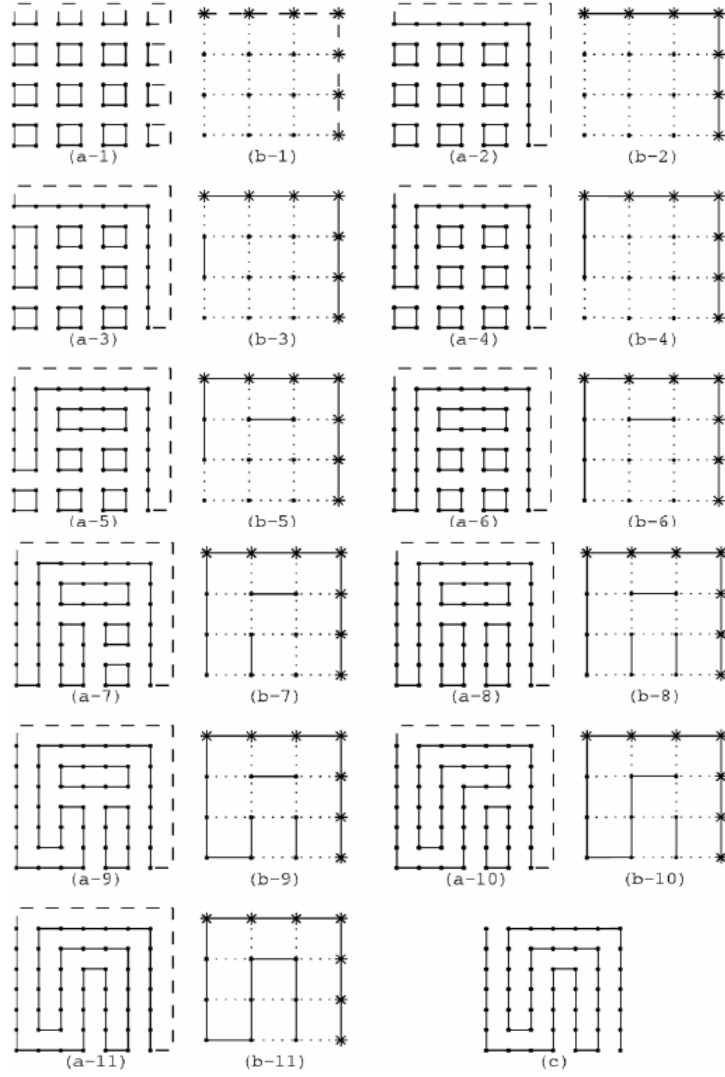


Şekil 4.18 (a) Direk olmayan G grafiği küçük dolaşım ile sarılması (b) Sonuç grafik

İki kenardaki dikdörtgeni birbirine bağlamanın maliyeti  $-\infty$  kabul edilmektedir. Yani başlangıçta bütün kenar dikdörtgenler birleştirilmiştir. Bunun amacı oluşturulan Hamiltonian yolundan kenarların çıkarılması ile takım yolunda bir süreksizliğin oluşturulmasını engellemektedir. Bundan başka dikdörtgen A sadece dikdörtgen olmayan D ile D'nin karşısındaki dikdörtgen C ile birleştirilmiş ise birleştirilebilir. Bu birleşmeyi uygulamak için A ve D'yi birleştirmenin maliyeti A ve C'yi birleştirmenin maliyetine eşit olmalıdır. (Şekil 4.19) Bu birleştirme bağımlılığı kullanılan ve kullanılmayan takım yolarını göstermektedir. Bütün küçük dolaşimleri birleştirmek için bir  $G'$  grafiği oluşturulur. Burada  $G$  deki bütün dolaşimler (A ve B gibi)  $G'$  A ve B gibi noktalarda tarif edilir. Aynı zamanda  $G$  deki A ve B dolaşimlerini birbirine bağlayan  $s$  ve  $t$  kenarları  $G'$  de  $v$  ile tarif edilir. (Şekil 4.18 (b)) Daha sonra en kısa uzunluk ağacı ilgili formülden yararlanılarak dolaşimlerin birleştirilmesi ile oluşturulur. Şekil 4.19 en kısa uzunluk ağacı ile oluşturulan birleştirme algoritmasını göstermektedir. Hamiltonian dolaşımı içindeki bütün dolaşimlerin birleştirilmesinden sonra takım yolu bütün dikdörtgen olmayan kenarların kaldırılması ile elde edilir (Şekil 4.19 (c)). T'nin en kısa uzunluk ağacındaki kenarlar olduğu varsayımı ile aşağıda bir birleştirme algoritması verilmiştir.

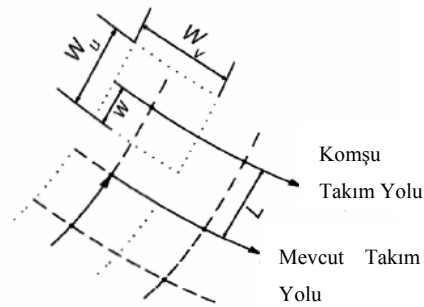
- Başlangıçta  $T=\emptyset$  alınır.  $G'$  deki kenarlar birleştirme maliyetine bağlı kalarak artar. Bağlama durumu için öncelikle iki adet dikdörtgen biçimli birleşim birbiri ile birleşir.
- İlk gidilmemiş kenar hesaba katılır ve bu kenar daha önce T'nin içinde yer almamış olup birleştirme prosedürüne karşı gelmiyorsa T'ye eklenir.
- Şayet kenar T'ye eklendiyse  $G$  deki iki dolaşım birleştirilir ve bu dolaşimlere  $G'$  nde karşılık gelen birleşim oluşturulur. Daha sonra üçüncü adım tekrarlanır. Aksi halde ikinci adıma dönülür.
- Eğer T (n-1) adet kenar içeriyorsa (n :  $G'$  ndeki mertebe sayısı) işlem durdurulur. Daha sonra Hamiltonian yolunun sonuçları alınır. Aksi halde ikinci adıma dönülür.

Önceki adımda oluşturulan takım yolu iki başka modifikasyon gerektirir. Öncelikle takım yolunda işlenmemiş alanların elimine edilmesi gerekmektedir. İkinci olarak ise takım yön değiştirdiği zaman takım adaptasyonu dikkatlice yapılmalıdır.



Şekil 4.19 (a) Küçük karelerin birleştirilmesi ile elde edilen Hamiltonian yolu (b) Karşı gelen en küçük uzunluk ağacı (c) Oluşturulan takım yolu (Machanov vd, 2003)

SFC takım yollarında takım yön değiştirirken yüzeyde işlenmemiş alanlar kalacağından dolayı takım yolu ayarlaması gereklidir. Her bir dönüşte, farklı yönlerde olan iki komşu takım yolunun işleme çizgileri üst üste gelmeyebilir yada gelip büyük bir eşik yüksekliği oluşturabilir (Şekil 4.20).

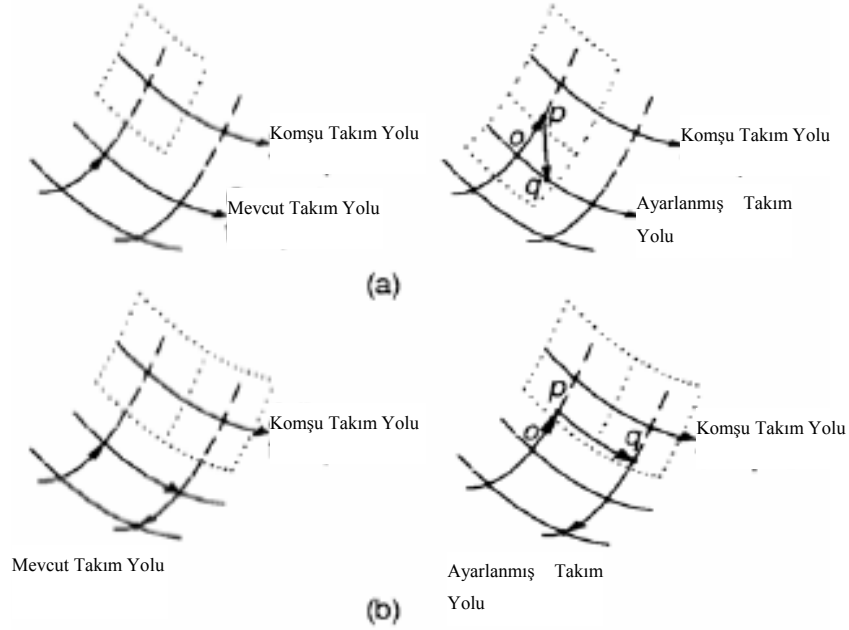


Şekil 4.20 SFC kullanımı ile komşu takım yolu üzerindeki izler (Machanov vd, 2003)

Bu işlenmiş yüzey hatasını yok etmek için dönüşteki takım yolu, işleme çizgisinin komşu işleme eğrisi ile üst üste gelecek şekilde değiştirilir. Şekil 4.21 iki farklı takım yolu değişimini göstermektedir. Bu dönüşlerde takım yolu komşu takım yolundaki işleme çizgisi ile üst üste gelecek şekilde uzatılır. En küçük uzatma uzunluğu aşağıda verilmiştir.

$$L_{\text{ext}} = L - w \quad (4.15)$$

$L$  takım yolları arası mesafe ve  $w$  ise yan işleme uzunluğudur (Şekil 4.20).

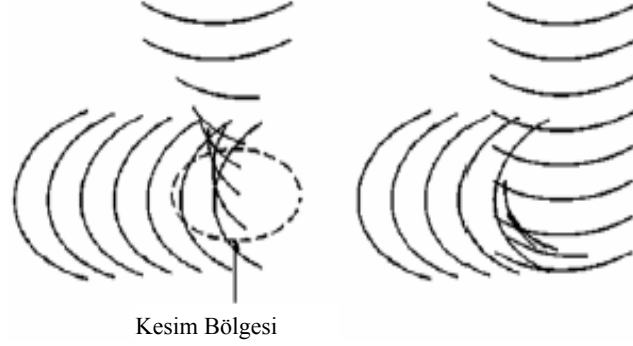


Şekil 4.21 Takım yolu değişimi (a) Köşe dönüşü (sol yada sağ) (b) U dönüşü

İkinci değiştirme ise takım adaptasyonuna uygulanır. Takım adaptasyonunu kurarken takım ilerleme yönü genellikle mevcut takım temas noktasından sonraki temas noktasına olan yön olarak alınır. Keskin dönüşlerde takım yörüngesinin ani olarak değişmesi büyük kinematik hatalara neden olmaktadır. Bu kinematik hatalar genellikle takım yolu segmentlerine konumlandırılan daha fazla sayıda noktalar ile azaltılamaz (Bohez, 2000). Şekil 4.21 'deki  $o - p - q$  keskin dönüşünü ele alalım. Doğru bir dönüş yapmak için  $p$  dönme noktasındaki ilerleme yönü önceki ilerleme noktasındaki  $o$  yönüne paralel alınır. Kinematik hatayı azaltmak için  $p$  noktasından  $q$  noktasına giderken yeni bir  $p'$  noktası ilave edilir ve ilerleme yönü aşağıdaki gibi olur.

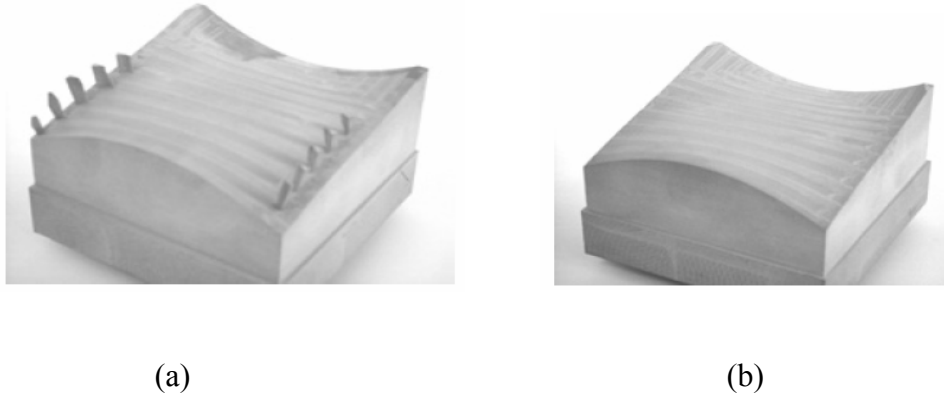
$$f_{p'} = \frac{f_p + f_q}{|f_p + f_q|} \quad (4.16)$$

Burada  $f_p$ ,  $p$  noktasındaki ilerleme yönüdür. Şekil 4.22 takım yolu doğrulamasının uygulandığı ve uygulanmadığı durumlardaki X-Y düzlemi üzerinde gösterilen kesme kenar izlerini göstermektedir.



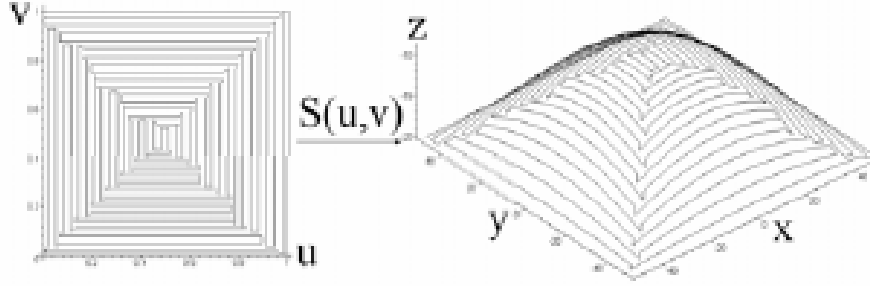
Şekil 4.22 X-Y Düzleminde takımın kesici kenarının izleri (Machanov vd, 2003)

Çalışma sonucunda iki adet uygulama yapılmış olup bunlardan bir tanesinde bir Bezier yüzeyi ele alınmış olup yüzey takım yolu doğrulama yapılan SFC ile ve doğrulama yapılmayan SFC ile ayrı ayrı işlenmiştir. Sonuçlar aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Şekil 4.23 SFC Takım yolu kullanılarak işlenen parça (a) Doğrulama kullanılmış (b) Doğrulama kullanılmamış (Machanov vd, 2003)

İkinci uygulamada ise çan şekline benzer bir parça ele alınmış olup SFC için hazırlanan algoritmanın uygulanabilirliği gösterilmektedir.



Şekil 4.24 İkinci uygulama için oluşturulan SFC takım yolu (Machanov vd, 2003)

Çizelge 4.3’de geliştirilen SFC takım yolu algoritması ile izoparametrik takım yollarının karşılaştırılmasını görebilirsiniz.

Çizelge 4.3 SFC takım yolunun izoparametrik takım yollarına göre performansı

Takım Yolu	Takım Yolu Uzunluğu (mm)	
	Uygulama I	Uygulama II
İzoparametrik v yönünde	3917.31	3454.85
İzoparametrik u yönünde	2648.12	3454.85
SFC Takım yolu	2637.55	3440.63

Bu çalışmada 5 eksenli tezgahlarda serbest şekilli yüzeylerin işlenmesi için yeni bir takım yolu yöntemi verilmiştir. Yeni yöntem alan doldurma eğrilerinin avantajlı yönlerini kullanmakta ve Hilbert eğrilerinin avantajlı olmayan yönlerini kullanmamaktadır. Önerilen yöntem bir takım yolu doğrulama prosedürü ile birleştirilerek uygulamalar yapılmış ve önerilen yöntemin izoparametrik takım yollarına göre daha kullanışlı olduğu görülmüştür. (Machanov vd, 2003)

#### 4.4 Kalıp İşlemede C-Alan Yöntemi

Bu çalışmada serbest şekilli yüzeylerde kullanılmak üzere yeni bir takım yolu oluşturma yöntemi sunulmuştur. Önerilen C-Alan yönteminde geometrik veriler C- Alan elemanlarına dönüştürülen tasarım yüzeyi ve stok yüzeyini tanımlamaktadır. Daha sonra bütün takım yolu

oluşturma kararları boşluk şeklinde (C- Alan) verilmektedir. C- Alan yöntemi yüksek hızda kalıp işlemede aşağıdaki özellikleri sağlamaktadır.

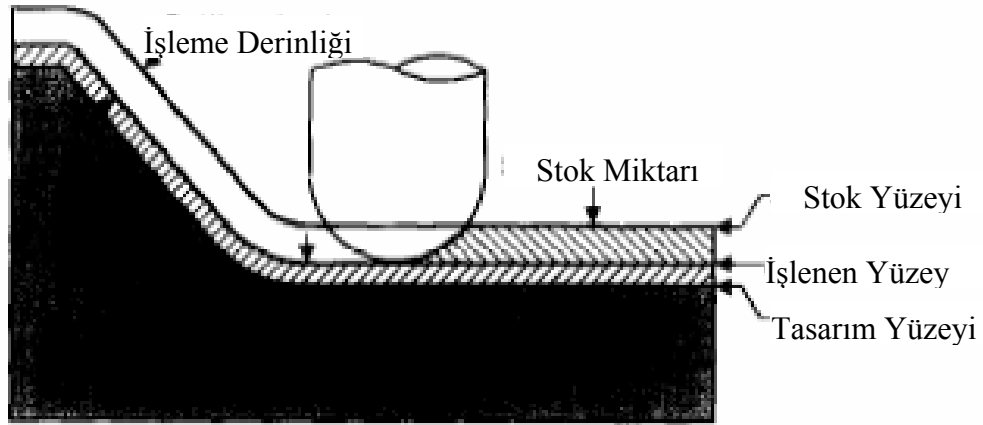
- Çarpma olmayan takım yolları
- Dengelenmiş kesme yükleri
- Düzgün takım hareketleri
- Takım yolu doğrulama

Günümüzde üretkenliğin ve verimliliğin artırılması istendiğinde yüksek hızda işleme tekniği kullanılıyor olup üç eksen tezgahların olduğu bir çok yerde kalıp işleme esnasında gittikçe kullanımı yaygınlaşmaktadır. CNC teknolojisi son yıllarda oldukça büyük bir adım atmış olup şimdilerde mil hızı 40.000 rpm ilerleme hızı ise 50 m/dk civarındadır. Geleneksel yöntemler hala kullanılıyor olsa da HSM bu yöntemlere göre en az 10 kat daha hızlıdır. Buna rağmen HSM'e engel olan hala iki büyük problem vardır. Bunlardan biri kesici takım malzemesi iken diğeri ise serbest şekilli yüzeylerde kullanılan takım yollarının türetilmesidir.

Bu çalışmada bu iki büyük problemden biri olan kalıp imalatı için HSM ile işlemede takım yollarının türetilmesi hususuna değinilmiştir. Geleneksel takım yolu oluşturma yöntemleri HSM'in kullanılmasında doğal kısıtlara sahip iken önerilen 3 eksen NC takım yolu oluşturma yöntemi HSM ile kalıpların işlenmesi için büyük bir potansiyele sahiptir.

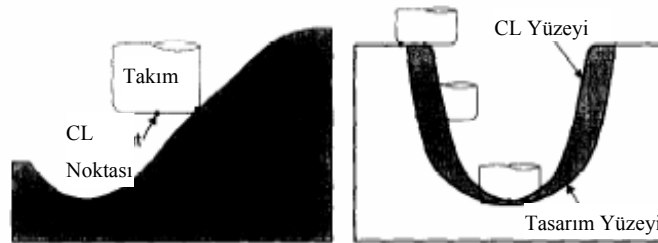
Kalıp işleme esnasında takım tarafından birim talaş kaldırma (UMO, Unit Machining Operation) olarak isimlendirilen şablon bir yol takım ile geçilir ve kalıbın tamamen işlenmesi için bu yollardan bir dizisi kullanılır. Bu çalışmada tasarım yüzeyi tasarımcı tarafından oluşturulan yüzeyin matematiksel ifadesi olarak kullanılmaktadır. Stok yüzeyi ise işlenmemiş parçanın yüzeyini ifade etme amacı ile kullanılmaktadır. İşlenmiş yüzey ise UMO'nun uygulandığı yüzeyi anlatmaktadır (Şekil 4.25). UMO tarafından işlenen bir yüzeyin sonraki UMO için stok yüzey olduğunu belirtmekte fayda vardır.

Her bir UMO'da stok miktarı ham parça yüzeyi ile tasarım parçasının yüzeyi arasındaki fark olarak tanımlanır. Her bir UMO'da geçilen işleme derinliği ise ham parça yüzeyi ile işlenen yüzey arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Talaş yükü takımın birim hareketi ile üretilen talaş miktarı olup kesme yükü ise işleme esnasında takıma tepki olarak oluşan kuvvettir. İşleme şartlarında kesme yükü görel olarak talaş yükü ile ilişkilidir.



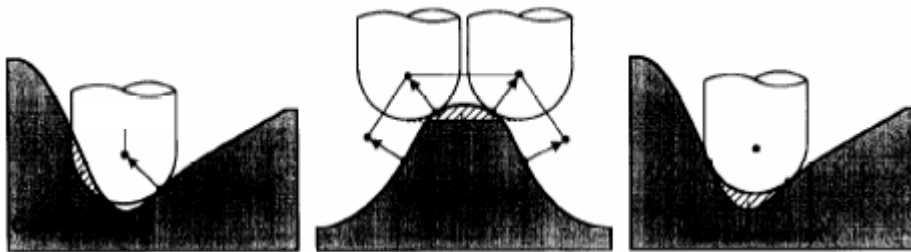
Şekil 4.25 Birim talaş kaldırma yüzeyleri (Choi vd, 1997)

Şekil 4.26' da gösterildiği üzere takımın yüzeye tanjant olduğu temas noktasına takım temas noktası (CC) denmektedir. Temas halindeki takımın referans noktasının bulunduğu nokta ise takım konum noktası (CL) olarak tanımlanmaktadır. CL çizgisi CL noktalarını birbirine bağlayan çizgidir. Bu çizgilerin birleşmesi ile CL yolu, CL yollarının birleşimi ile CL yüzeyi meydana gelmektedir.



Şekil 4.26 CL noktaları ve CL yüzeyi (Choi vd, 1997)

Dalma terimi talaş kaldırma modunda (G01) iş parçasına takımın girmesini ifade etmekte olup bunun tersi olarak da talaş kaldırılması gereken kısım işlenmemektedir (Şekil 4.27)



Şekil 4.27 Dalma ve işlenmeyen alan bırakma (Choi vd, 1997)

Yukarıda tartışıldığı üzere seçilen bir takım için UMO adı verilen şablon bir yol, işlemek için kullanılır. Aşağıda verilen bir UMO ile NC takım yollarının türetilmesi üzerine mevcut yaklaşımlar üzerinden kısaca geçilmiştir. Genel olarak verilen bir UMO için NC takım yolları üç adım ile oluşturulur.

- Takım yolu planlama
- CL noktalarının hesaplanması
- Takım yollarını bağlama

CL noktalarının hesaplanması için araştırmalarda kullanılan iki yöntem vardır. Bunlardan bir tanesi CC nokta yaklaşımı diğeri ise direk konumlandırma yaklaşımıdır. (Choi vd, 1997)

#### 4.4.1 CC Nokta Yaklaşımı

CC nokta yaklaşımı ile takım yolları iki adımda bulunur.

- Takım yolları tasarım yüzeyinde planlanır.
- CL noktaları takım yolu üzerindeki CC noktalarından yararlanarak hesaplanır.

Bundan başka CC nokta yaklaşımı ile takım yolu oluşturma yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- APT yöntemi : Bu yöntem ile takım yolları işlenecek yüzey ile tasarım yüzeyi arasındaki eğrilerin kesişimi boyunca oluşturulur. Bu yöntem aynı zamanda APT sisteminin temelidir.
- İzoparametrik yöntem : Takım yolları izoparametrik eğriler olarak tanıtılmaktadır.
- En büyük Z değeri yöntemi : Takım yolları tasarım yüzeyinde bulunan xy alanları olarak tanıtılır, daha sonra her bir alan için en büyük Z değeri seçilir.
- İzo-eğri yöntemi : Takım yolları tasarım yüzeyindeki eğrilerin çizgiler ile sembolize edilmesi ile oluşturulur. (Choi vd, 1997)

#### 4.4.2 Direk Konumlandırma Yaklaşımı

Bu yaklaşımda da takım yolları iki adımda oluşturulmaktadır;

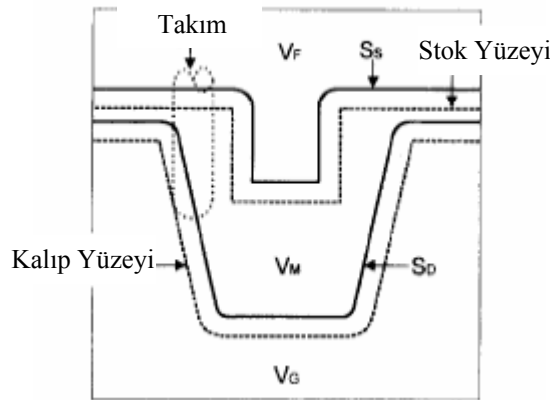
- İki boyutlu takım yolları kılavuz bir düzlem üzerinde oluşturulur.
- Bireysel takım konumları parça yüzeyine değene kadar düşürülür.

Kontrol yüzeyi terimi genellikle dalma olmaması gereken yüzey için kullanılır ve kontrol terimi ise yüzeyi takım dalmalarından koruma için yapılan eylemdir. İki tür kontrol yöntemi mevcuttur.

- CC Kontrol Yöntemi : Takım tasarım yüzeyine karşı kontrol edilir.
- CL Kontrol Yöntemi : CL noktaları CL yüzeyine karşı kontrol edilir.

Günümüzde kalıp işleme ile ilgili olarak CAM sistemleri içerisinde hali hazırda en çok kullanılan yöntem CC kontrol yöntemidir.

Daha önce mevcut HSM yöntemleri ile kalıpların normalden en az 10 defa daha hızlı işlenebildiğinden söz edilmişti. Buna paralel olarak işleme hızları da bu kadar artmıştır (1000m/saat). Bunlara bağlı olarak aşağıdaki gereksinimler, bu konuyu hazırlayan araştırmacı tarafından endüstride edinilmiş olan deneyimler sayesinde hazırlanmıştır.



Şekil 4.28 Üç eksen işleme için C- Alan yapısı (Choi vd, 1997)

Öncelikle hız ne olursa olsun kalıp işlemede takım dalmasının olmaması gerekmektedir. Genel gereksinimler olan toleranslar, verimlilik, dayanıklılık ve yüzey pürüzlülüğü gibi konulara ilave olarak aşağıdaki unsurlar yüksek hızda işleme yapabilmek için kritik karakteristikler arasındadır.

- Çarpma : Yüksek hızda işleme esnasında oldukça tehlikeli olan küçük bir çarpma bile takıma ve iş parçasına zarar verebilir.
- Talaş Yük Seviyesi : Talaş yük seviyesinde meydana gelen beklenmedik bir çarpma takımın kırılmasına neden olabilmektedir.
- Kesme Yükünün Düzgünlüğü : Talaş yükündeki değişim kesme yüküne etki edebilmekte bu da makineye ve takıma zarar verebilmektedir.
- Düzgün Takım Yolu : Takım hareketindeki keskin dönüşler takımın olması gereken yönden çıkarabilir buda iş parçasında izlerin olmasına neden olabilmektedir.
- Doğrulama : HSM'de NC kodları ne kadar dikkatli hazırlanırsa hazırlansın bu kodlar ile işlem yapmadan önce kesinlikle doğrulanması gerekmektedir. Bu husus geleneksel işleme

yöntemleri içinde geçerlidir fakat HSM’de operatör müdahalesi için oldukça kısa bir süre söz konusudur.

Özet olarak HSM’de anahtar gereksinimler; dalma, çarpma, talaş yükü, kesme yükü, düzgün takım yolu ve doğrulamadır. Hiçbir geleneksel takım yolu oluşturma yöntemi HSM uygulamaları için kullanışlı değildir.

Daha önce söz edildiği gibi geleneksel takım yolu oluşturma algoritmaları doğrulama ve simülasyon yardımı olmasına rağmen HSM takım yolları oluşturmada kullanışlı değildir. Geleneksel yöntemlerin temel kısıtları aşağıdaki nedenlerden doğmaktadır.

- Takım yolları lokal bilgilerin kullanılması ile oluşturulmaktadır.
- Takım yollarının oluşturulmuş olduğu geometrik bilgiler HSM için yetersiz kalmaktadır.

Bu nedenle HSM’de kullanılmak üzere genel bir karar verebilmek için yeterli bilgi kullanımına açık bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın gereksinimleri C-Alan yöntemi ile oldukça uyushmaktadır. Aşağıda C- Alan ile ilgili bilgiler verilmiştir.

C- Alan yaklaşımı alan planlama problemlerinde önceden beri kullanılan bir yöntemdir. Kalıp işleme sürecinde C- Alan yaklaşımı çok fazla kullanılmamasına rağmen, bu yaklaşım takım yolu oluşturma teknikleri arasında çok yeni bir yöntem değildir. Alan doldurulmasında C- Alan yaklaşımı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Güvenilir bir C- Alan  $A$ , güvenilir  $B$  engeller içerisinde bulunur.
- $A$  için güvenilir C- Alan içerisinde iyi bir takım yolu bulunur.

Burada güvenilir C- Alan,  $A$  ve  $B$  objelerinin kesişiminin olmadığı durumda hareket eden nesnenin biçimini tanımlar.

Aynı C- Alan fikri 3 eksen takım yolu oluşturma problemleri için kullanılabilir. Burada kesici takım hareket eden nesne, iş parçası ise engel nesneyi temsil etmektedir. Takım yolu oluşturmada iki tip güvenilir C- Alan ihtiyacı vardır;

- Serbest C- Alan: Çarpışmanın olmadığı alanı tarifler.
- İşlenecek C- Alan: İşleme alanında bulunan C- Alan alanını tarif eder.

Şekil 4.28’de gösterildiği üzere iki adet CL yüzeyinin olduğunu ve bunlardan bir tanesinin tasarım yüzeyi için diğerinin ise stok yüzeyi için olduğunu düşünürsek aynı zamanda  $S_D$ , tasarım yüzeyi için CL yüzeyi ve  $S_S$ , stok yüzeyi için CL yüzeyi olduğunu varsayarsak; Şekil 4.28’de gösterildiği gibi iki CL yüzeyinin C- Alan alanını birbirinden bağımsız üç alt C- Alan alanına böldüğü görülmüş olur.

- $V_F$  : Serbest C- Alan ( $S_S$  yüzeyinin üzerinde kalan alan)
- $V_M$  : İşlenecek C- Alan ( $S_S$  ve  $S_D$  yüzeyleri arasında kalan alan)
- $V_G$  : Dalma C- Alan ( $S_D$  altında kalan alan)

Verilen bir kalıp işleme UMO'su için aşağıdaki verilenler bilinmektedir;

- Kalıbın tasarım yüzeyi
- Stok yüzeyi
- Tolerans
- Kesici takım geometrisi

Burada NC işleme için C- Alan alanı içerisindeki aşağıda verilen C- Alan elemanları bulunmak istenmektedir ( $V_{NC}$ ).

$$\text{C-Space Elemanları} = \{S_S, S_D, V_F, V_M, V_G\} \quad (4.17)$$

$$V_{NC} = V_F \cup V_M \cup V_G, \quad \emptyset = V_F \cap V_M \cap V_G \quad (4.18)$$

Özet olarak C- Alan elemanlarının bulunması için bütün prosedür aşağıdaki gibidir;

- Stok CL yüzeyi ( $S_S$ ) stok yüzeyinden bulunur.
- Tasarım CL yüzeyi ( $S_D$ ) bırakılan son pasoda dikkate alınarak tasarım yüzeyinden bulunur.
- C- Alan elemanları ( $V_F, V_M, V_G$ ) CL yüzeyinden yararlanılarak bulunur.

Yukarıda sözü geçen bütün C- Alan elemanları UMO için üretilecek takım yoluna gerekli bütün bilgileri içermektedir. Sonuç olarak takım yolu oluşturmak için C- Alan yaklaşımı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

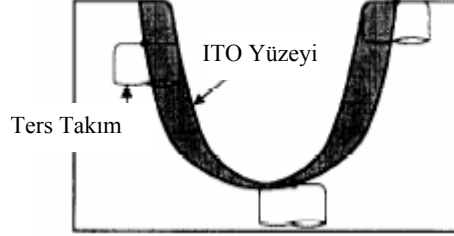
- C- Alan elemanları bulunur;  $S_S, S_D, V_F, V_M$  ve  $V_G$
- Takım Yolu C- Alan elemanlarından yararlanılarak bulunur.

Aşağıda C-Alan yönteminin karakterizasyonu ve diğer geleneksel yöntemler ile karşılaştırılmasına değinilmiştir.

HSM'de kullanılmak üzere C- Alan yaklaşımının temel özelliklerini oluşturan karakteristikler finiş işlemler ile birlikte tanımlanmış olup aşağıda CL yüzeyi ile ilgili bazı açıklamalar verilmiştir.

- Üç eksen işleme için her zaman farklı bir CL yüzeyi mevcuttur.
- Şekil 4.29'da görüldüğü üzere üç eksen işleme için S yüzeyinin CL yüzeyi, S'nin ters takım ofset yüzeyine (Inverse Tool Offset, ITO) denk gelir.

- Küresel uçlu takım ile CL yüzeyi işlenirken G` sürekli ise parçanın CL yüzeyinde bulunan NC verileri ile işlenmesinde içbükey bir yüzeyde işlenmemiş alan kalmayacaktır.
- Kesme derinliği düzgün olduğu zaman küresel uçlu takım ile işlemede talaş yükü tasarım CL yüzeyinin özellikleri ile belirlenebilir. Talaş yükü içbükey yüzeylerde fazla, dışbükey yüzeylerde ise azdır.



Şekil 4.29 Ters Takım Ofset Yüzeyi (ITO) (Choi vd, 1997)

İlk açıklama C-Alan yaklaşımının her zaman geçerli ve benzersiz bir CL yüzeyi oluşturacağını desteklerken ikinci açıklama CL yüzeyi türetmede sağlam bir yöntem sunmamaktadır. (Bunlara zıt olarak geleneksel CC noktası yaklaşımı her zaman doğru bir CL noktası sağlamamaktadır. Çünkü CL noktası her zaman doğru bir CC noktası için kesin olarak bulunamamaktadır.) Üçüncü açıklama parlatma için takım yolu oluşturmada oldukça iyidir. Eğer CL yüzeyinde G` süreklilik gösteriyorsa parlatma gerekmez. Aksi halde parlatma işlemi CL yüzeyindeki keskin kenarlar için gerekli olur. Dördüncü açıklama üçüncü açıklamanın genelleştirilmiş halidir. Üçüncü açıklamaya benzer olmayarak dördüncü açıklama daha fazla açıklama gerektirmektedir. Yinede talaş yükünü hesaplayabilmek için yeterli geometrik bilginin CL yüzeyinden elde edilebileceği kabul edilmektedir.

C-Alan yöntemi hakkında yukarıda verilmiş olan bilgiler ışığında C-Alan yöntemi ile geleneksel yöntemler artık karşılaştırılabilir. Çizelge 4.4 HSM gereksinimlerini günümüzde en fazla kullanan yöntemler arasında değerlendirmiştir. Takım yolu türetme yöntemleri olarak İzoparametrik yöntem, CC kontrol yöntemi ve C-Alan yöntemi ele alınmış olup aşağıdaki unsurlar değerlendirilmiştir.

- Dalma ve çarpma durumu
- İşlenmemiş yüzey bırakma
- Takım yolu düzgünlüğü
- Yük dengeleme
- İşleme özelliklerini çıkarabilme
- Dik yüzeyleri işleyebilme

Aynı zamanda ilgili tabloda kesme benzetiminin yapıp yapılamayacağı konusuna da değinilmiştir.

Çizelge 4.4 Farklı takım yolları türetme yöntemlerinin karşılaştırılması (Choi vd, 1997)

	İzoparametrik Yöntem	CC Kontrol Yöntemi	C-Space Yöntemi	Kesme Simülasyonu
İçbükey dalma	Zayıf	Önler	Önler	Ortaya çıkarır
Dışbükey dalma	Zayıf	Orta düzey	Önler	Ortaya çıkarır
Çarpma	Zayıf	Orta düzey	Önler	Ortaya çıkarır
İçbükey kesme	Zayıf	N/A	Ortaya çıkarır	Ortaya çıkarır
Yol düzgünlüğü	Zayıf	Orta düzey	İyi	Ortaya çıkarır
Talaş yükü dengeleme	N/A	N/A	Dengeler	Ortaya çıkarır
Talaş Yükü	N/A	N/A	Orta düzey	İyi
Özellik çıkarma	Uygulanabilir	N/A	Uygulanabilir	N/A
Duvar yüzeyleri	Tek yama	Uygulanabilir	Uygulanabilir	Uygulanabilir

Çizelge 4.4’de verilmiş olan karşılaştırmalardan yararlanarak aşağıdaki gözlemler yapılabilir;

- İzoparametrik yöntem kalıpların işlenmesi için çok yamalı yüzeyi kullanamadığından dolayı kullanışlı değildir.
- CC kontrol yöntemi CAD/CAM sistemlerinde en fazla kullanılan yöntem olmasına rağmen ve içbükey işlemede dalmayı önlemesine rağmen diğer HSM gereksinimlerini karşılamada istenildiği kadar iyi değildir.
- Kesme simülasyonu hataların belirlenmesinde etkili olmasına rağmen hataları düzeltme gibi bir özelliği bulunmamaktadır.
- C-Alan yönteminin en büyük özelliği takım yolunu hatalara karşı koruyabilmesidir.
- Daha düzgün bir kesme yükü için C-Alan yöntemi kesme simülasyonu yöntemi ile birlikte kullanılabilir.

Bu çalışmanın başlangıcında söylendiği gibi aşağıda verilen iki nedenden dolayı geleneksel yöntemlerin HSM’de kullanılması iyi değildir.

- Takım yolları sadece lokal bilgileri kullanarak türetilmektedir.
- Takım yollarının oluşturulduğu geometrik bilgiler HSM kullanımı için yeterli değildir.

C-Alan yönteminin gücü yeterli bilgi kullanımı ile genel bir karar verme yeteneğinin olmasından kaynaklanmaktadır. Yukarıda verilen sorunları ortadan kaldırmak için takım yolu oluşturmanın temel doğası anlaşılmalıdır. Öncelikle takım yolu aşağıdakileri de içeren anlaşılır geometrik bilgilere sahip olmalıdır.

- Tasarım yüzeyi geometrik bilgileri
- Kesici takım geometrik bilgileri
- Stok yüzeyi geometrik bilgileri

Geleneksel yöntemlerin hiç birisi yukarıda verilen üç bilgiyi aynı anda kullanmamaktadır. Örneğin İzoparametrik yöntem tarafından sadece tasarım yüzeyinin lokal geometrisi kullanılırken, CC kontrol yöntemi sadece kesici takımın hemen altındaki yüzey geometrisinin yükseklik bilgilerini kullanır. C-Alan yöntemi ise yukarıda verilen üç bilgiyi de kullanmaktadır. Sonuç olarak C-Alan yönteminin HSM'de kullanımında global olarak isimlendirilmesi; tasarım yüzey geometrisi ve kesici takım geometrisi, tasarım CL yüzeyi ( $S_D$ ) altında yatması ve stok yüzey geometrisinin stok CL yüzeyi ( $S_S$ ) altında yatması nedeni ile uygundur. (Choi vd, 1997)

#### 4.5 Takım Temas Noktası Hızına Bağlı Takım Yolu Oluşturma

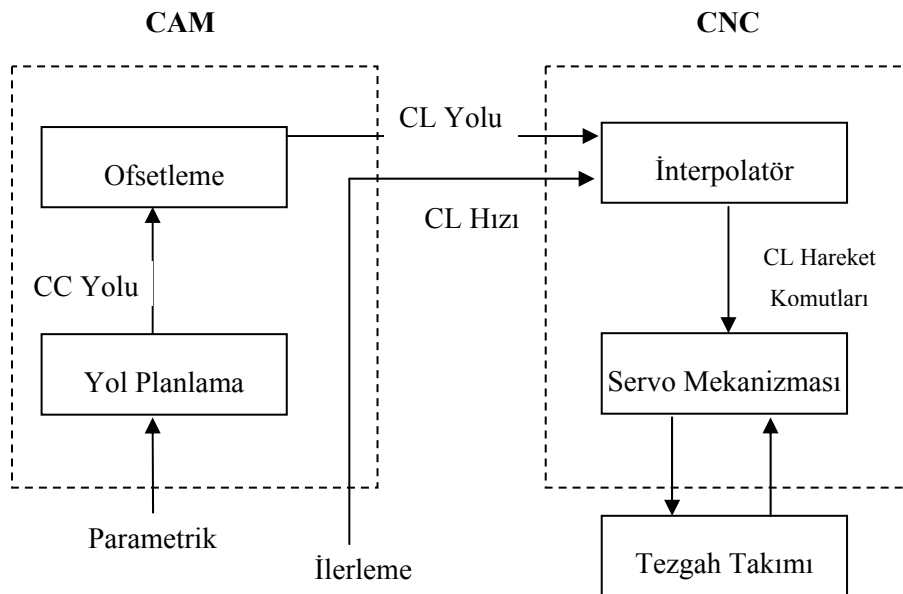
İlerleme, işleme kalitesi ve etkinliği için en önemli faktörlerden biridir. Takım yolu oluşturmada mevcut yöntemler kesici konumunun oluşturduğu yolu takip eden sabit hızdan yararlanmakta ve serbest şekilli yüzeylerde istenen ilerlemeyi vermemektedir. Bu çalışma takım yolu oluşturmada yeni bir yöntem sunmakta olup bu problemi çözmektedir. Sırasıyla doğru, eğri ve yüzey interpolatörlerine bağlı yöntemler analiz edilmiştir.

Günümüzün imalat endüstrisinde bilgisayar destekli imalat, bilgisayar kontrollü makine parçalarının kullanımı kadar geniş bir yer tutmuştur. Arzu edilen parçayı imal etmek için CAM sistemleri CNC tezgahların kullanılmasına yardımcı olmada takım yollarını oluştururlar. Böylece CNC tezgahlar parçanın yüzeyinde işlem yapabilirler. Mevcut yaklaşımda CAM sistemleri ilk olarak takım temas noktasını (CC) hesaplar, daha sonra ise bu noktaları ofsetleyerek takım konum noktalarını bulurlar. CL kenarları takımın merkezinin gösterdiği noktalar iken CC noktaları yüzey üzerinde takımın izleyeceği noktalardır. Bu çalışmada CC yolu ve CL yolu sırasıyla CC ve CL noktalarının oluşturduğu iz olarak kabul edilip CC ve CL hızları ise CC ve CL yolları üzerindeki hızlar olarak kabul edilmektedir.

Pratikte CL, takım yolu olarak kullanılmaktadır. Geleneksel olarak CL yolu bir dizi ardıl doğrusal segmentlerden meydana gelmekte olup daha sonra doğrusal interpolatörler ile CNC tezgaha adapte edilir. CNC tezgaha konumlandırılmış interpolatör takım yolunu çok eksenli işlemede koordine edebilmek için eksenler boyunca hareketlere çevirir. Bu yöntem büyük bir CL dosyası gerektirmekte ve takım yolu boyunca ilerleme değişimine neden olmaktadır. Parametrik eğriler CL yollarını temsil etmede daha başarılıdır. Bu amacı başarmak için eğri interpolatörleri sürekli olarak geliştirilmektedir.

Talaş kaldırma şartlarının en önemlilerinden biri olan ilerleme işleme kalitesini ve verimliliğini belirler. Çünkü imalat hızı ilerleme ile orantılıdır. Büyük ilerlemeler bu yüzden tavsiye edilir. Yüzeyin düzgünlüğü ve ölçülerin doğruluğu için uzmanların deneyimleri gibi kesme prensipleri de ilerlemenin kaliteli bir işlemeyi başarabilecek kadar küçük olması yönündedir. İlerleme kesici takımın ucunun parça boyunca hareketinden doğan hızı gösterir. Mevcut yaklaşımlarda CL yolu CL hızı ile birlikte tezgaha aktarılır. Çoğu kaynakta CL hızının ilerleme olarak isimlendirilmesine rağmen işleme kalitesi ve verimliliğini gerçekte etkileyen bu değildir. Bu nedenle mevcut yaklaşımlar istenen ilerleme gereksinimlerini vermez. Bunun sonucunda düşük kalite ve verimlilikte işlemler meydana gelir.

Bu çalışma yukarıda anlatılan problemin üstesinden gelmek için takım yolu oluşumunda yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Aşağıda sırası ile doğru, eğri ve yüzey interpolatörlerini ele alan üç yöntem sunulmuştur.



Şekil 4.30 Takım yolu oluşturmada mevcut yaklaşım (Lo vd, 1998)

Takım yolu oluşturmada kullanılan mevcut yaklaşım Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Bu yaklaşımda ilk adım kesici takım ucunun izleyeceği CC noktalarının tespit edilmesidir. Takım

yolu iki komşu CC noktası arasında istenen çıkıntı yüksekliği dikkate alınarak oluşturulur. Mevcut CAM sistemleri sıklıkla Parametrik yüzeyin  $u$  yada  $v$  yönleri boyunca atanmış CC yollarını kullanan izoparametrik yöntemi kullanmaktadır.

İkinci adım CC yollarının CL yollarını bulmak için ofsetlenmesi adımıdır. Yolun ofsetlenmesi yüzeye ve takım geometrisine bağlıdır. CL yolları için analitik çözümler sadece basit yaylar ve doğrular olduğu zaman mümkündür. Genel eğriler için CL yolları bir çok CL noktası ile temsil edilirler. Unutulmamalıdır ki CC noktalarının sayısı ve konumları uygun CL noktalarını bulabilmek için önceki adımda tespit edilmelidir. Genellikle iki CC noktası arasında seçilen ilerleme miktarı çıkıntı yüksekliği limitlerini geçmemelidir (0,001-0,01mm).

Son adım CL yolunu ve hızını makine içinde bulunan ve takım yollarını bütün eksenler boyunca hareketlere çeviren interpolatöre aktarmaktır. Genel olarak CL yolu ardı ardına gelen bir dizi doğru segmentleri ile temsil edilir ve CNC takım tezgahlarına doğrusal interpolatörler yardımı ile aktarılır. Bu yöntem büyük bir CL dosyası gerektirdiğinden ve ilerleme değişikliğinin yüzey pürüzlülüğüne neden olmasından dolayı CL yollarının temsilinde parametrik eğriler önerilir.

Bu çalışmada parametrik bir yüzey aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$S = S(u, v) \quad (4.19)$$

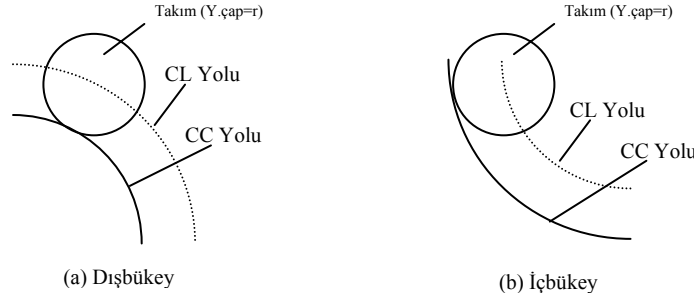
Burada  $u$  ve  $v$  parametrik değişkenlerdir. CC ve CL yolları  $P^{CC}$  ve  $P^{CL}$  olarak gösterilmektedir. CC ve CL hızları ise  $V^{CC}$  ve  $V^{CL}$  olarak temsil edilmektedir. Bunların yanında İzoparametrik işleme adapte edilmiş olup  $u$  yönü boyunca CC yolu atanmıştır.  $P^{CC}(v) = S(u, v^*)$ , Burada genellikle üç eksenli işlemede sıkça kullanılan küresel uçlu freze takımı ele alınmıştır. Kesicinin ofsetlenmesi için  $r$ 'nin takımın yarı çapı olarak kabul edilmesi ile aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$P^{CL} = P^{CC} \pm r.n \quad (4.20)$$

Buradaki ( $\pm$ ) işareti yüzeyin içbükey yada dışbükey olup olmaması durumuna göre değişir. “n” yüzeye normal olan vektör olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\mathbf{n} = \frac{\frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v}}{\left| \frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v} \right|} \quad (4.20)$$

Şekil 4.30’da gösterilen mevcut yaklaşımda, arzu edilen ilerlemede CL hızı CNC tezgaha aktarılmaktadır. Sonuç olarak sabit bir CL hızı CL yolu boyunca devam etmektedir. Bununla beraber yüzeyin işlenmesi CL’den ziyade CC boyunca gerçekleşmektedir. Bu yüzden biz CL hızından çok CC hızı ile ilgilenmeliyiz.



Şekil 4.31 İki boyutlu dairesel sınırların işlenmesi (Lo vd, 1998)

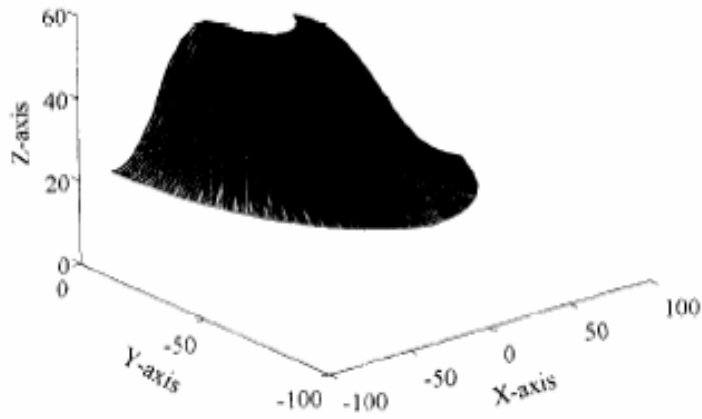
İki boyutlu dairesel sınırlar söz konusu olduğunda Koren işleme yüzeyi boyunca CC hızını sabit tutabilmek için sabit bir CL hızı tanzim etmede basit bir yöntem önermiştir. Şekil 4.31’de gösterildiği üzere dairesel sınır boyunca istenen ilerlemeyi başarabilmek için CL hızını (içbükey yada dışbükey durumuna bağlı kalarak) arttırmalıyız yada azaltmalıyız. Koren tarafından önerilen ilerleme tanzim yöntemi aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$V^{CL} = V^{CC} \frac{R \pm r}{R} \quad (4.22)$$

Burada “R” dairesel alanın yarıçapıdır. “r” ise takımın yarıçapı olup ( $\pm$ ) işareti yüzeyin içbükey yada dışbükey olup olmaması durumuna göre değişir.

Koren’in sabit CC hızını vurgulamasına ve iki boyutlu dairesel durumlar için çözüm getirmesine karşın üç boyutlu yüzeylerin işlenmesinde bir çözüm mevcut değildir. Mevcut yaklaşımların belirli bir CL hızına adapte edilmesinden dolayı yüzey boyunca oluşan CC hızı değişkendir. Eşitlik (4.21) yüzey işlemede CC ve CL hızları ile ilişkilendirilmek için yeterlidir. Fakat “R” parametresi CC yolu yönündeki P yüzeyi üzerindeki eğrinin yarıçapı ile değiştirilmelidir.

Mevcut yaklaşımlar değişik CC hızlarını oluşturduğundan dolayı bu durum düzgün olmayan işleme verimliliğine ve kalitesine yol açacaktır. Düşük verimlilik, CC hızının ilerlemeden küçük olması durumunda oluşur. Unutulmamalıdır ki burada bütün parametrelerin yüzey kalitesi ile ilgili olduğu varsayılmıştır. Pratikteki işlemlerde ilerlemeyi geçen CC hızları yüzey kalitesini etkilemeyebilir.

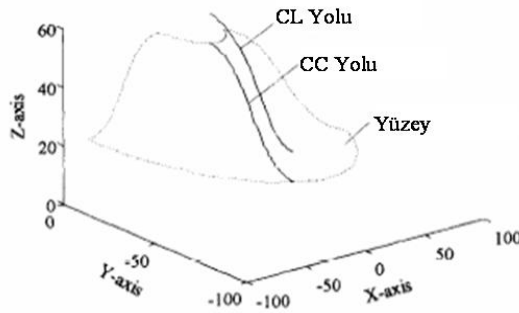


Şekil 4.32 Dönel yüzey ve istenen CC yolları (Lo vd, 1998)

Aşağıda düzgün olmayan işleme verimliliğini gösteren bir örnek verilmiştir.

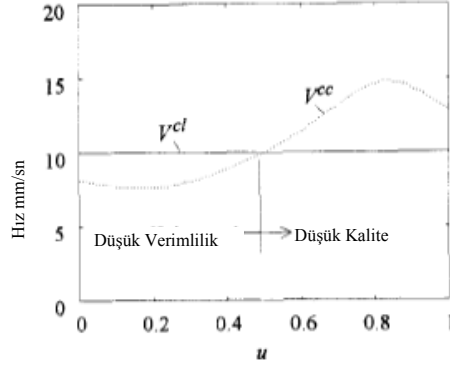
$$\begin{cases} x = (60u^3 - 90u^2 + 90u + 20) \cos(v) \\ y = (60u^3 - 90u^2 + 90u + 20) \sin(v), \\ z = 60u^3 - 90u^2 + 50 \\ 0 \leq u \leq 1, -\pi \leq v \leq -0.2\pi \end{cases} \quad (4.23)$$

Yukarıda parametrik yüzeyler ve arzu edilen CC yolları Şekil 4.32’de gösterilmiştir. İşlemede dairesel uçlu ( $r=10\text{mm}$ ) bir takım kullanılmış olup çıkıntı yükseklik değeri olan  $0,005\text{mm}$  değeri aşılmadan 319 adet CC yolu atanmıştır. Şekil 4.33’te  $v = -0,6\pi$  boyunca belirlenmiş bir CC yolu ile ilişkili CL yolu gösterilmiştir. İlişkili CC ve CL hızları ise Şekil 4.34’te gösterilmiştir. Şekil 4.34’ten gözlendiği üzere sabit bir CL hızı ( $10\text{mm/sn}$ ) kullanıldığında CC hızı değişmektedir. Değişken CC hızı verimliliğin ve kalitenin düşük olmasına neden olmaktadır. ( $0 < v < 0.5$  aralığında ilerleme  $10\text{mm/sn}$ ’den küçük,  $0.5 < v < 1$  aralığında ise ilerleme  $10\text{mm/sn}$ ’den büyüktür.)



Şekil 4.33 Belirlenmiş bir CC yolu ve karşılık gelen CL yolu (Lo vd, 1998)

Yüksek kalitede ve etkinlikte işleme için CC yolu boyunca CC hızını sabit tutacak değişken bir CL hızı belirlemek gerekir. Bu öneriyi başarmak için aşağıda değişik CNC interpolatörlerini temel alan üç değişik yöntem anlatılmıştır. (Lo vd, 1998)



Şekil 4.34 CC ve CL hızları (Lo vd, 1998)

#### 4.5.1 Doğrusal İnterpolatöre Bağlı Yöntem

Sırası ile doğrusal ve eğrisel interpolatörlere bağlı yöntemler Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere CC yolu boyunca ilerlemeyi sabit tutmak için bir karşılama algoritması sunulmuştur. CL yolu CL noktalarını birbirine bağlayan ardıl doğrusal segmentlerden meydana gelmektedir. CL noktalarını hesaplayabilmek için öncelikle CC noktalarını hesaplamaya daha sonrada bu noktaları ofsetlemeye ihtiyaç duyarız. Eşitlik (4.19) ve (4.20)'de gerekli ofsetleme için algoritma verilmiştir. CC yolu boyunca genellikle ilerleme doğrusu bulunur. Böylelikle eşik değerinin maksimumu aşılmamış olunur. Sonuç olarak her bir CC noktası ile ilgili parametrik değer aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$u_i = u_{i-1} + \frac{L^{CC}}{\left\| \frac{d}{du}(P^{CC}) \right\|} = u_{i-1} + \frac{\sqrt{8\rho\delta}}{\left\| \frac{d}{du}(P^{CC}) \right\|} \quad (4.24)$$

Burada “ $L^{CC}$ ” iki CC noktası arasındaki mesafedir. “ $\rho$ ” ilerleme doğrultusundaki yüzeyin eğrilik yarıçapıdır. “ $\delta$ ” ise maksimum çıkıntı yükseklik değeridir. Sonuç olarak CC noktasını CC yolu fonksiyonunda parametrik değeri yerine koyarak bulabiliriz.

$$P_i^{CC} = P^{CC}(u_i) \quad (4.25)$$

İstenen işleme hızını bulmada i'nci doğrusal segment için CL hızını aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.

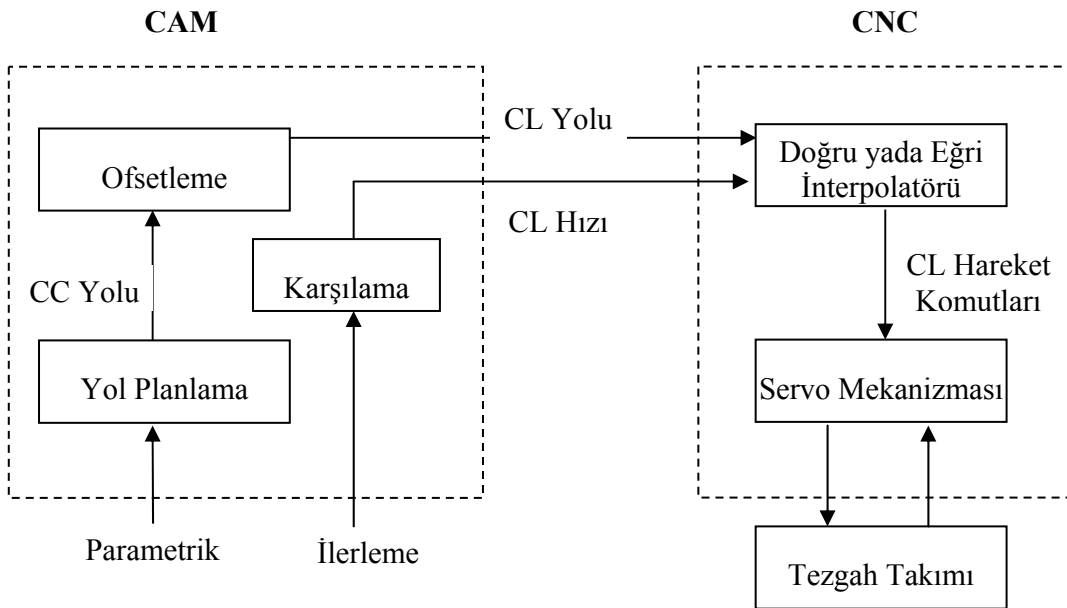
$$V_i^{cl} = f \frac{L_i^{cl}}{L_i^{cc}} \quad (4.26)$$

Burada  $f(=V^{CC})$  CC yolu boyunca arzu edilen ilerlemedir.  $L_i^{cl}(=|P_i^{cl}-P_{i-1}^{cl}|)$  ve  $L_i^{cc}(=|P_i^{cc}-P_{i-1}^{cc}|)$  ise sırası ile i'nci doğrusal CL ve CC segmentlerinin uzunluklarıdır.

Yukarıda verilmiş olan örnek en basitlerden biri olup mevcut yöntemden tek farkı CL hızının segmentten segmente değişmesidir. Sonuç olarak CNC tezgahlar için sadece doğrusal interpolatör gerekmektedir. Bununla beraber bu yöntemin aşağıdaki sakıncaları vardır.

- Bu doğrusal hareket komutları için büyük CL dosyalarına ihtiyaç vardır.
- Bu yöntem ilerleme değişimine neden olmaktadır.

CL segmentlerinin sayısına bağlı olarak CAM sistemi tarafından türetilen işleme programının boyutu genellikle CNC tezgahların kapasitesini aşmaktadır. Bu şartlar altında program birden fazla parçaya bölünmeli yada CNC ile CAM arasında online bir bağ olmalıdır. İlk yöntem işleme sürecinin kesilmesine neden olmakta buda işleme süresini uzatmaktadır. İkinci yöntem ise CAM sistemi işleme devam ederken sürekli komutlar türetecektir. Bu işleme esnasında bir hata meydana gelmemesi için CAM ve CNC arasında bir ara yüz gerektirmektedir. (Lo vd, 1998)



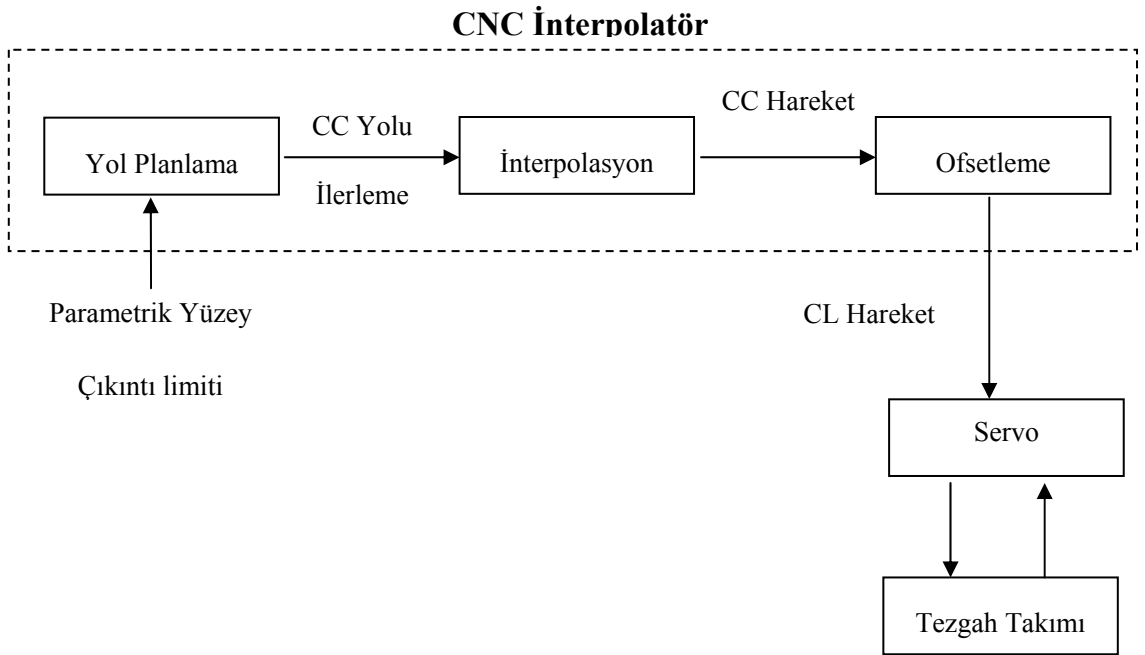
Şekil 4.35 Önerilen takım yolu türetme yöntemi (Birinci ve ikinci yöntem) (Lo vd, 1998)

#### 4.5.2 Eğri İnterpolatörüne Bağlı Yöntem

Şekil 4.35'ten anlaşıldığı üzere bu yöntem bir önceki yönteme benzerdir. Bu yöntemde doğru interpolatörünün yerini Eğri interpolatörü almıştır. Eğri interpolatörleri tasarımları gereği CL dosyalarının hafızada kapladığı yeri azaltır ve doğru interpolatörünün kullanıldığı yönteme göre daha az ilerleme hızı değişiminin meydana gelmesini sağlar. Mevcut yaklaşımda CL yolunu oluşturan eğrinin geometrik parametreleri ve buna karşı gelen CL hızı, CNC'de CC yolu boyunca istenen ilerlemeyi vermemektedir. Bu problemi çözmek için değişken CL hızı türetmede CNC interpolatörüne ilave parametre bilgileri aktarılmalıdır. Diğer bir anlatımla CL noktalarını ofsetleyip bunları parametrik fonksiyonlarla ifade etmeye ihtiyaç duyarız. Bu konu ile ilgili yapılan uygulamada kübik bir eğri bir CAD/CAM sistemine adapte edilip CL yolunun ve CL hızının bulunması uygulaması yapılmıştır. (Lo vd, 1998)

#### 4.5.3 Yüzey İnterpolatörüne Bağlı Yöntem

Önceki yapılmış iki çalışmada da CL dosyasının boyutu serbest şekilli yüzeylerin işlenmesi için çok büyüktür. Bunun nedeni önceki yöntemlerde verilerin sadece takım yolu boyunca toplanmasından kaynaklanmaktadır. Bu problemi yenmek için takım yolu arasında da verilere ihtiyaç duyarız. Bunun için yüzey parametrelerine ve kesme şartlarına (ilerleme, çıkıntı yüksekliği vs.) ihtiyaç duyarız.



Şekil 4.36 Yüzey işleme komutlarını kabul eden bir yüzey interpolatörü (Lo vd, 1998)

Sonuç olarak CC yolları mevcut CAM modülüne uygulanır ve daha sonra CNC interpolatörüne aktarılır. Şekil 4.36'da gösterildiği üzere önerilen CNC yüzey interpolatörü CC yolu interpolatörü algoritması, interpolatör algoritması ve ofsetleme algoritmasından oluşmaktadır. Aşağıda takım yolu türetme algoritması için gerekli prosedür verilmiştir.

- Yüzey parametrelerinden bir tanesi seçilir ( $v$ ) ve takım yolu yönü olarak kabul edilir. Diğer parametrenin ( $v$ ) yönü takım yolları arası yol olarak kabul edilir.
- Her bir örnekleme aralığı için CC noktaları türetilir.
- CL noktalarını bulmak için CC noktaları ofsetlenir.
- Her bir CC noktası için takım yolları arası yön ( $v$ ), eğrilik yarıçapı ( $R_v$ ) hesaplanır. Böylece takım yolları arası mesafe bulunmuş olur.
- CC yolu sonlanana kadar ikinci ve dördüncü adımlar tekrar edilir. Daha sonra takım yolları arası mesafelerden en küçük olanı seçilir ( $\Delta v = \text{Min } \Delta v_i$ ).
- Yanal alan sınıra ulaşıncaya kadar ikinci ve beşinci adımlar arası prosedürler tekrarlanır.

İlerleme işleme verimliliği ve kalitesi bakımından en önemli faktörlerden biridir. Mevcut takım yolu türetme yöntemleri CL yolu boyunca sabit bir hızda hareketi temel almakta bunun sonucunda yüzey boyunca takım temas noktalarında istenen ilerleme elde edilememektedir. Bu problemi çözmek için doğru, eğri ve yüzey interpolatörlerine bağlı kalan üç yöntem bu çalışmada ele alınmıştır.

İlk yöntem sadece CNC tezgahlardaki doğru interpolatörünü gerektirmekte olup doğrusal segmentler boyunca sabit bir CC hızı elde edilmek istendiğinden büyük bir CL dosyası meydana gelmiştir.

İkinci yöntem CNC tezgahlar için modifiye edilmiş bir eğri interpolatörü gerektirmekte olup eğrinin geometrik parametrelerine ilave olarak CL hızı ile ilgili parametre bilgilerinin de interpolatöre aktarılması söz konusu olmuştur.

Üçüncü yöntem CNC tezgahlarda yeni kullanılmaya başlanan bir yüzey interpolatörü gerektirmektedir. Yüzey interpolatörleri üç algoritmadan ibaret olup mevcut CNC sistemleri için probleme yol açmamaktadır. (Lo vd, 1998)

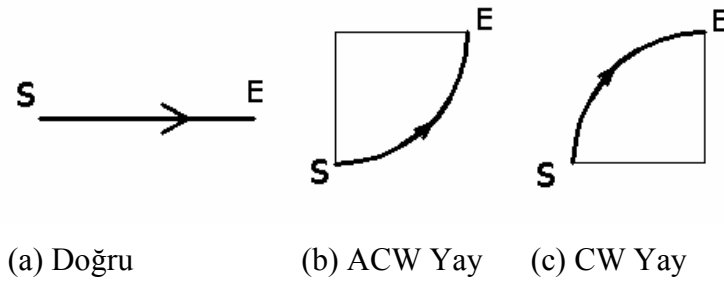
#### 4.6 Cep İşlemede Takım Yolu Tabanlı Köşe Yuvarlama

Köşelerin işlenmesinde kesici takımın temas uzunluğunun artmasından dolayı anlık olarak kesme direnci de artar. Bu çalışma cep işleme için alternatif bir NC takım yolu önermektedir. Önerilen takım yolu sınır ofset takım yolunu baz alınarak oluşturulmuştur. Eğri biçimli takım

yolu segmentleri köşe noktalarında ana takım yoluna eklenmiştir. Köşe noktalara yaklaşıldığında takım eklenen takım yolu segmentlerini takip etmekte böylece köşe noktadaki malzeme birden fazla paso ile kaldırılmaktadır. Farklı köşe şekillerine sahip iş parçaları için prosedür aşağıda anlatılmıştır. Geliştirilen takım yolu bir CAD/CAM sisteminin kullanıcı ara yüzüne ilave edilmiştir. Kesme denemeleri önerilen yöntemin önemini ve doğruluğunu göstermede yardımcı olmuştur.










İş parçasına şekil vermede cep işleme yöntemi en fazla kullanılan yöntemlerden biridir. En fazla kullanılan NC takım yolu oluşturma yöntemi cep sınırlarının merkeze doğru ofsetlenmesi ile malzemenin dışarı atılması mantığına dayanır. Sınır ofsetleme yöntemi genellikle içbükey ve dışbükey köşelerin oluşmasına neden olmaktadır.

Geleneksel sınır ofsetleme yönteminin NC takım yolu olarak kullanılmasının bazı zorlukları vardır. Bunlardan en önemli olanı takımın köşe noktalara yaklaşması ile takım temas uzunluğunun artmasıdır. Bunun sonucu olarak tezgah zorlanması, takım zorlanması ve takım kırılması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada yukarıdaki sorunların üstesinden gelmek için içbükey köşelerde radyüs kullanılan özel bir NC takım yolu yöntemi oluşturulmuştur.



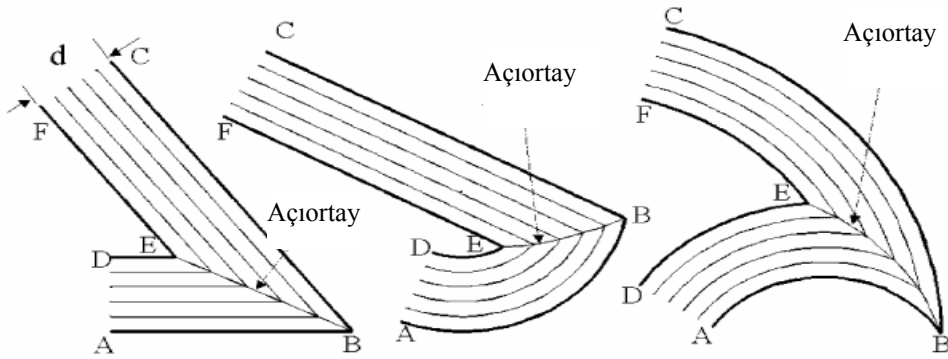
Şekil 4.37 Takım yolu geometrileri, (a) Doğru, (b) ACW Yay, (c) CW Yay (Choy vd, 2000)

Bu çalışma Şekil 4.37 'de gösterildiği üzere doğru ve yay segmentlerinden oluşan sınır ofsetleme yöntemi ile başlamıştır. Bir yay saat yönünde (CW) ve saat yönünün teri yönünde (ACW) olabilir.

Geometri Tipi	Doğru	ACW Yay	CW Yay
Doğru			
ACW Yay			
CW Yay			

Şekil 4.38 Farklı köşe şekilleri (Choy vd, 2000)

Birbirine bağlanan iki segmentin yönüne ve geometrik şekline bakılarak Şekil 4.38’de 9 adet köşe tanımlanmıştır. Bununla beraber köşeler eğriliklerine bakılarak içbükey yada dışbükey olarak da sınıflandırılmış olup bu çalışmada sadece içbükey eğriler dikkate alınmıştır.



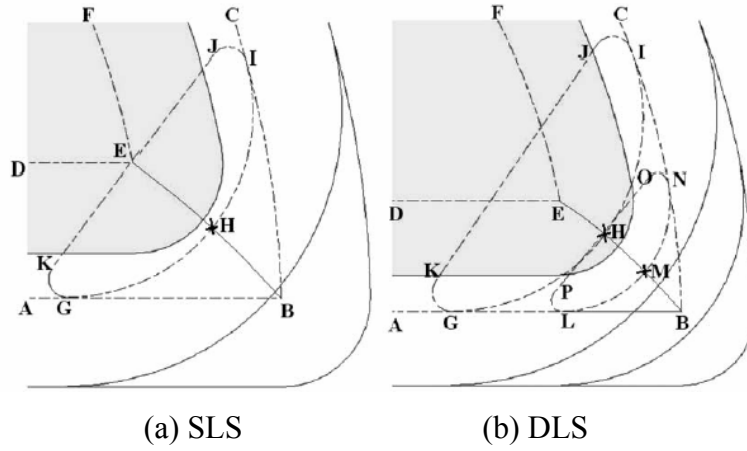
Şekil 4.39 İki nokta arası köşe açıortayları (Choy vd, 2000)

Bir köşenin  $L_1$  ve  $L_2$  gibi iki adet bağlanmış segmentten oluştuğunu varsayarsak ve  $L_1$  ve  $L_2$ 'nin açıortayını  $B(L_1, L_2)$  ile gösterirsek, Açıortayın geometrik konumu  $L_1$  ve  $L_2$ 'den eşit uzaklıktadır.  $L_1$  ve  $L_2$ 'nin şekline bağlı olarak açıortayın şekli doğru, parabol, elips ve hiperbol olabilir. Bu çalışmada takım yolu tabanlı köşe yuvarlatma algoritması köşe açıortayı üzerindeki iki nokta arasındaki mesafenin bulunmasını gerektirmektedir. Şekil 4.39’da konu ile ilgili bir yaklaşık yöntem verilmiştir. Bu yöntemde köşe açıortayı doğru segmentlerine bölünmekte olup bu işlem ile ilgili olarak aşağıdakiler yapılır.

- ABC ve DEF segmentleri arasındaki ofset mesafesinin  $d$  olduğu varsayılır. Sırasıyla B ve E noktalarının P1 ve P2 noktaları olarak alınır ve başlangıç değeri (default value,  $dv$ ) 0,5mm olarak kabul edilir.
- “n” ofsetleme sayısı iken ABC segmenti  $d - n.dv \leq 0$  olana kadar içeri doğru  $dv$  miktarı kadar ofsetlenir.

Bu çalışmada yukarıda söz edilen dokuz adet köşe tipi temel alınarak iki adet Köşe yuvarlatma yöntemi ele alınmıştır. Bunlar tekli yuvarlatma stratejisi (Single Loop Strategy, SLS) ve çiftli yuvarlatma (Double Loop Strategy, DLS) stratejisidir.

Sınır ofset eğrileri ile oluşturulan takım yollarının içeri doğru dizildiği bir cep için alanı olduğunu varsayarsak, takım bu cebi işlerken en içteki eğriden başlayacak ve dışa doğru talaş kaldırma işlemi yapacaktır. Bu tip bir takım yolunun köşe için bir bölümü Şekil 4.40 (a)'da gösterilmiştir. Buradaki takım yolları takım merkezinin geçtiği yolları göstermektedir. ABC segmenti mevcut yolu temsil ediyorken DEF segmenti ise takım yolunun izlemiş olduğu bir önceki izi temsil etmektedir. B ve E noktaları arasındaki mesafe köşe açıortayının uzunluğunu vermektedir. Aynı zamanda burada köşe açıortayının orta noktası H ile temsil edilmektedir.



Şekil 4.40 Köşe açıortayları ile kesme döngüleri arası ilişki, (a) SLS, (b) DLS

SLS stratejisinde takım mevcut takım yolu olan ABC yolu üzerindedir. Takım G noktasına geldiği anda GHI segmentini takip ederek açıortayın orta noktası olan H noktasından geçerek ABC segmentine I noktasında tekrar bağlanır. Takım daha sonra I noktasından G noktasına sırası ile IJ yayı JK doğrusu ve KG yayından geçerek geri gider. Takım köşe boşaltmayı G noktasından harekete başlayarak B ve C noktalarını takip ederek tamamlar. SLS stratejisindeki temel mantık köşelerdeki malzemelerin iki operasyon ile boşaltılmasıdır. Böylece kesme yükünün maksimum değeri ve talaş yükü azaltılacaktır.

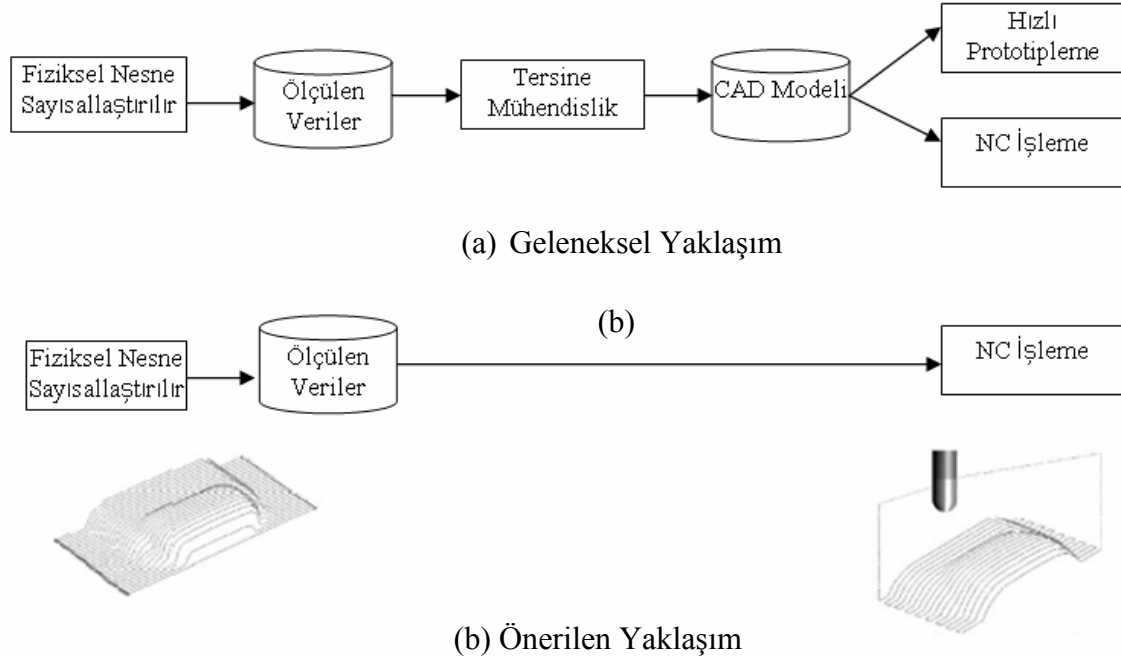
DLS stratejisi kesme yükünü ve talaş yükünü, köşe noktalarındaki malzemenin olduğu bölgeyi üç noktaya ayırarak daha fazla azaltmayı hedefler. Bu işlem iki yuvarlatma operasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.40 (b)'de gösterildiği üzere köşe açortayı H ve M noktaları ile üç eşit parçaya bölünmektedir. İlk talaş kaldırma döngüsünde takım merkezi AGHIJKG noktalarından geçmektedir. İkinci döngüde ise takım merkezi LMNOPL noktalarından geçmektedir. Daha sonra takım merkezi BNIC noktalarından geçerek köşe noktalarındaki malzemeyi kaldırmaktadır.

Bu çalışmada cep köşelerindeki noktaların işlenmesi problemi ele alınmış olup değişik bir takım yolu oluşturma yöntemi üzerinde durulmuştur. Çalışma için yapılan uygulamalar sonucunda köşe noktalarındaki malzemelerin kaldırılması esnasında başarı elde edilmiş olup burada ele alınmış köşeler sadece içbükey köşelerdir. (Choy vd, 2000)

#### **4.7 Takım Yolu Oluşturma Algoritmaları Üzerine Yapılan Diğer Çalışmalar**

##### **4.7.1 Ölçülen Veriler ile Takım Yolu Oluşturma**

Burada yapılan çalışma ölçülen verilerden 3 eksen takım yolu oluşturma algoritmasını elde etmek üzerinedir. Günümüzde kaba işleme genellikle işlenecek parça tabakalara ayrılarak yapılmaktadır. Kaba işlemede takım yollarını türetmek için ilgili parçanın her bir katmanında bulunan işleme bölgelerini bilmek gerekmektedir (sınır eğrileri ve ilgili unsurlar). Bu çalışmada parçayı işlemede malzeme kaldırma için Park ve Choi (2001) tarafından önerilen sınır çıkarma algoritması kullanılmıştır. Finiş takım yolu parça CL yüzeyi üzerindeki eğrilerin bulunması ile oluşturulabilmektedir. Bununla beraber CL yüzeyini ölçülen verilerden yararlanarak takım yolu oluşturmak bilgisayarlara hesaplama zorluğu oluşturabilir. Bu zorlukları yenmek için bu çalışmada iyi bilinen 2 boyutlu takım yolu algoritmalarına dayanan bir algoritma oluşturulmuştur. Aşağıda şekilde geleneksel ve önerilen bu çalışmada önerilen yöntemler anlatılmıştır.



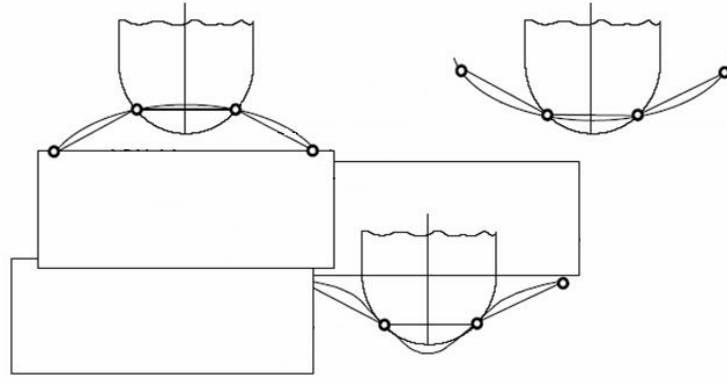
Şekil 4.41 Mevcut ve önerilen yaklaşım, (a) Geleneksel yaklaşım, (b) Önerilen yaklaşım

Şekil 4.41’den anlaşılacağı üzere mevcut yaklaşımlar verilerin toplanmasından sonra tersine mühendislik ve CAD modelinin oluşturulmasını gerektirirken bu çalışmada önerilen yöntemde bu işlemlere gerek kalmamakta direk olarak NC takım yolları oluşturulabilmektedir.

#### 4.7.2 Serbest Şekilli Yüzeylerin Finiş İşlenmesi İçin İzoparametrik Olmayan Üç Eksen Takım Yolu Oluşturma

Serbest şekilli yüzeyler son şekillerinin verilmesi için bir çok kaba ve finiş işleme operasyonlarından geçerler. Her bir pasodan sonra bazı içbükey bölgelerde malzeme kalmaktadır. Genel olarak bu işlenmemiş alanlar daha küçük takımlar ile daha sonra temizlenmektedir. Bu çalışmada malzeme kalan bölgeleri otomatik olarak tespit eden ve bunlar için istenen toleranslarda takım yolu oluşturan bir algoritma oluşturulmuştur.

Şekil 4.42’de içbükey bölgelerde takımın işleme esnasında malzeme bırakması veya takımın bu bölgelere dalması gösterilmektedir.



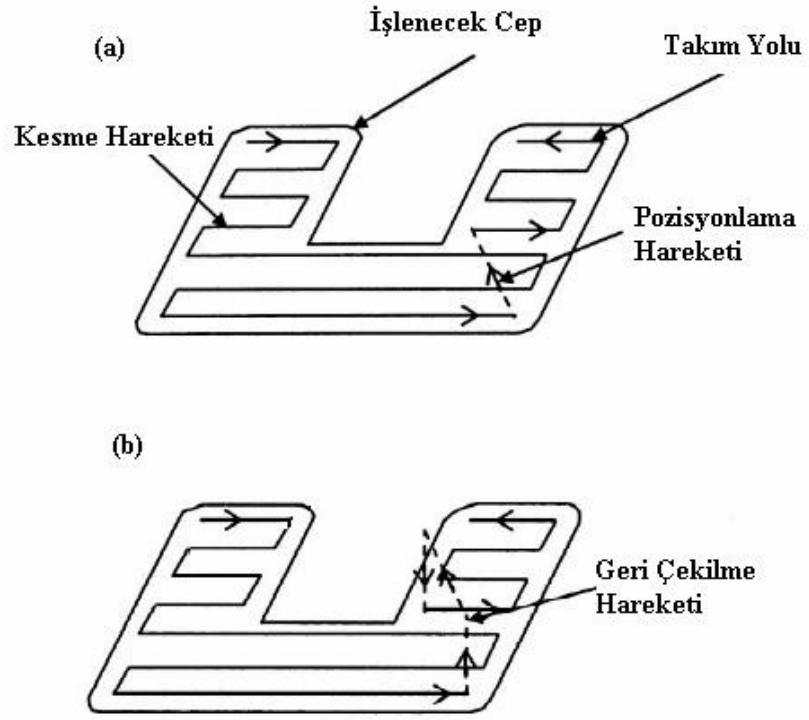
Şekil 4.42 İçbükey bölgelere takım dalması veya malzeme kalması (Jerard vd, 2002)

Bu çalışmada izlenen yöntemde öncelikle parça üzerinde işlenmemiş alanların bulunması daha sonra bu bölgelerin işlenmesi için gerekli olan toleranslardan yararlanarak küçük çaplı takımlar ile bu malzemelerin kaldırılmasını sağlama adımları kullanılmaktadır.

#### 4.7.3 Farklı Takım Yollarını Birleştirerek Takım Yolu Oluşturma

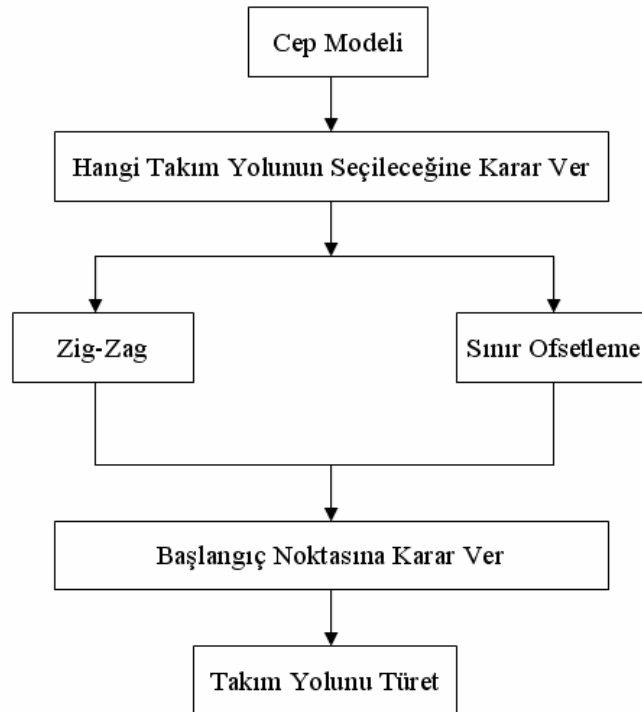
Farklı cep türleri için farklı takım yolları yöntemlerinin daha etkili ve verimli olduğu söylenebilir. Fakat belli karmaşıklıkta olan cep türleri için tek bir takım yolu türünün o cebi işlemede etkili olduğunu söylemek gerçekten zordur. Bu çalışmada farklı takım yolu türleri ele alınarak incelenmiş olup daha sonra gözlemler baz alınarak yeni bir takım yolu oluşturma algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma cep üzerindeki farklı şekilli bölgeler için farklı takım yolu türlerini ele alarak etkili bir takım yolu oluşturmayı hedeflemektedir. Karmaşık şekilli ceplerin işlenmesinde bu çalışmada önerilen yöntem tek bir takım yolu türünün kullanılmasından daha iyi bir çözüm vermektedir.

Bir cep boşaltma işleminde genel olarak takımın üç önemli hareketi vardır. Bu hareketler Şekil 4.43'de gösterildiği üzere malzemenin istenen şekle getirilmesinde gerçekten işlenmesi için yapılan kesme hareketi, takımın cep içerisindeki bir noktadan başka bir noktaya gitmesi esnasında yapmış olduğu pozisyonlama hareketi ve takımın istenen noktaya işleme yapmadan gitmesi için belirli bir noktaya çıktığı geri çekilme hareketinden oluşmaktadır.

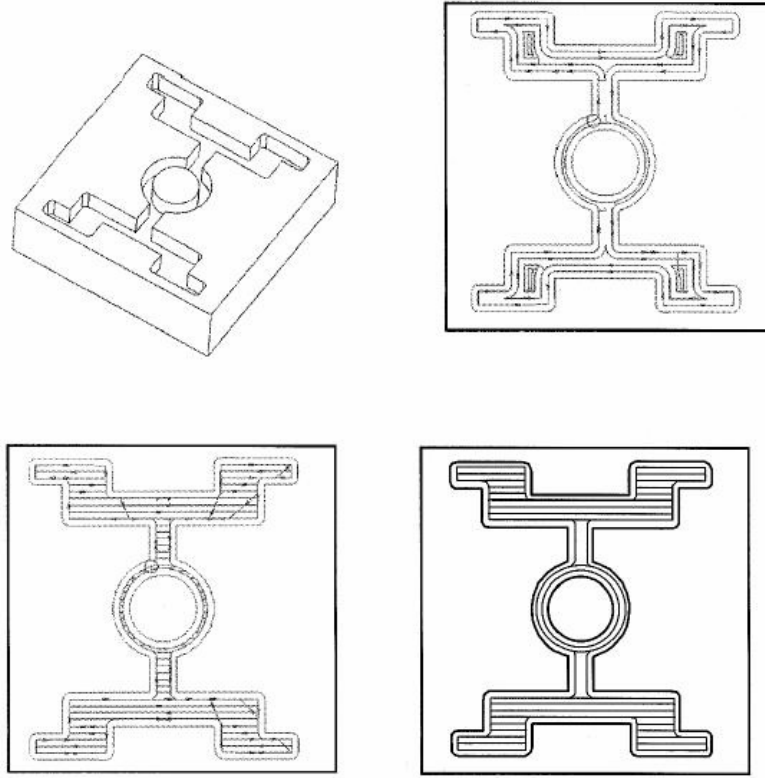


Şekil 4.43 Takım hareketleri (Yao vd, 2004)

Bu çalışmada zig-zag ve sınır ofsetleme eğrileri tabanlı takım yolları incelenmiş olup mevcut yaklaşımla ilgili akış Şekil 4.44'deki gibi verilmiştir.



Şekil 4.44 Mevcut takım yolu oluşturma yaklaşımı (Yao vd, 2004)



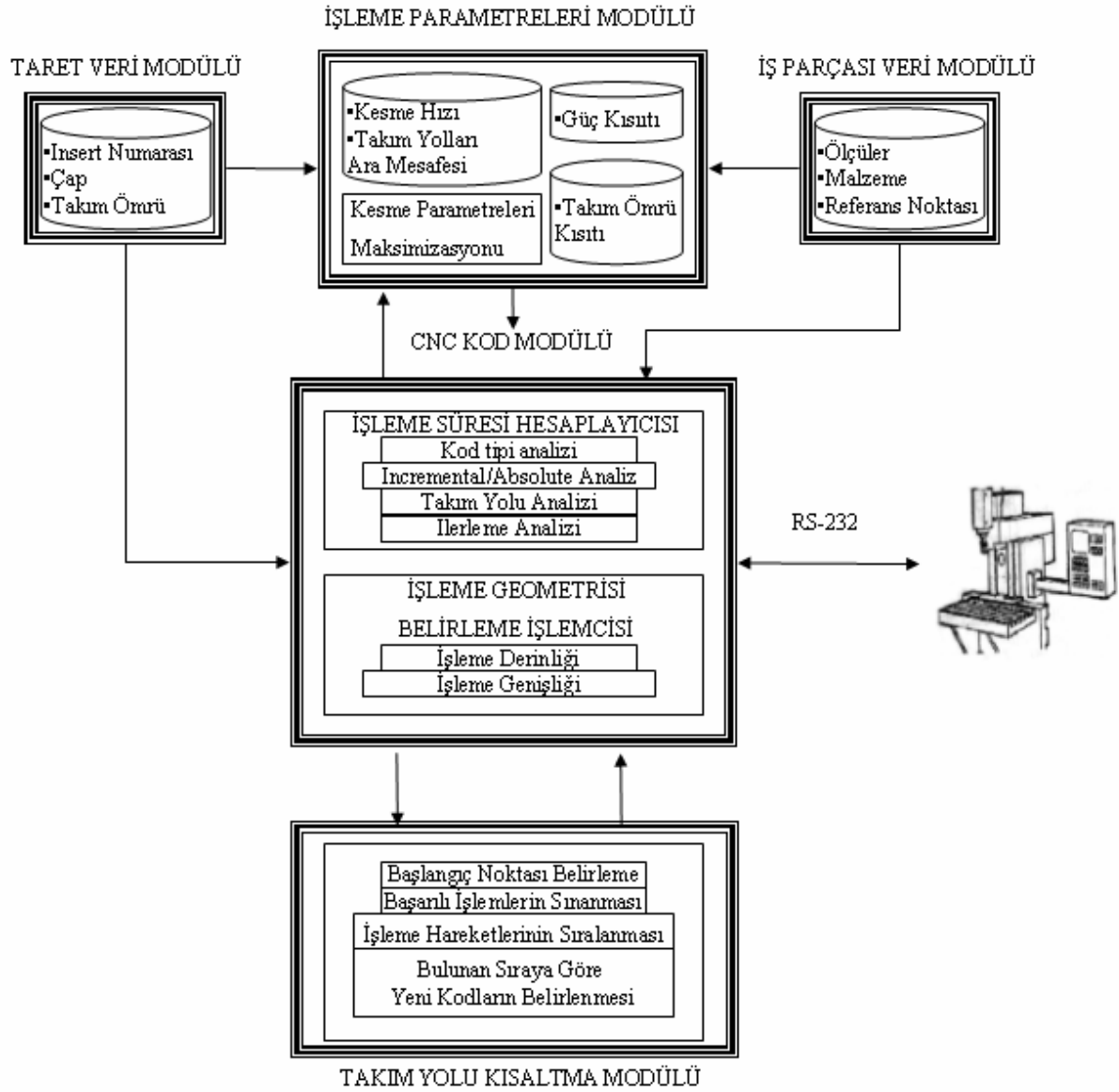
Şekil 4.45 İşleme için örnek parça (Yao vd, 2004)

Bu çalışmada önerilen yaklaşım zig-zag ve sınır ofsetleme eğrileri ile ayrı ayrı oluşturulan takım yollarını tek bir takım yolu algoritması altında toplayarak işlenecek cebin farklı bölgelerinde uygun yöntemin uygulanmasını sağlamaktadır. Böylece daha etkili ve verimli bir işleme meydana getirilmiş olur. Şekil 4.45'te ilgili takım yollarının bir arada kullanılmış olduğu bir örnek verilmiştir. Bu şekle baktığımızda ortada bulunan dairesel bölgede sınır ofsetlemeden meydana getirilen takım yollarının kullanıldığını diğer kısımlarda ise zig-zag takım yollarının kullanıldığını görmekteyiz. Bu şekilde kullanılan yöntemlerin kombinasyonu ile daha verimli bir işleme elde edilmiştir. (Yao vd, 2004)

#### 4.7.4 Takım Yolu ve Kesme Parametreleri ile Bir Dikey İşleme Merkezinde CNC Programlarının Süre Olarak Kısaltılması

Bu çalışmada dikey işleme merkezlerinde kullanılan CNC programlarının süre olarak kısaltılması için bir algoritma hazırlanmıştır. CNC programı tezgahın CNC kod editörüne bir seri bağlantı kablosu (RS-232) ile bağlanmıştır. Hesaplayıcı kod editöründeki bütün kodları inceleyerek işleme hareketlerinin sürelerini hesaplar. Kod biçimlendirmeyi yapan diğer işlemci her bir işleme hareketini analiz eder. Sonuç olarak x ve y eksenlerinde aynı kesme takımı ile biçimlendirilen işlemler sıraya konular. Aynı zamanda en kısa takım yolu bağlamında takımın hareketlerini minimize ederek G kodları türetilir. Kesme parametreleri

modülü ile her bir işleme operasyonu için takım ömrü ve tezgah gücü kısıtları kullanılarak tezgah tabla ilerlemesi ve dönme hızı değiştirilir. Bu yolla CNC programı modifiye edilir. Yeni CNC programının süre hesaplama işlemcisi tarafından tekrar analiz edilmesi ile sürenin ne kadar kısaldığı görülebilir.



Şekil 4.46 Türetilen programın genel yapısı (Pınar vd, 2005)

Şekil 4.46'da gösterildiği üzere algoritma beş modülden ibarettir. Parça CNC programının tezgahtan transfer edildiği CNC kod modülünde analiz işlemi yapılır. Bu modülde bütün hareketlerin süreleri ve takım değiştirme işlemi haricindeki bütün işleme süreleri işleme süresi hesaplayıcısı tarafından hesaplanır. Kesme geometrisi belirleme işlemcisi ile bütün operasyonlar için gerekli olan kesme derinliği ve genişliği belirlenir. Takım yolu minimizasyon modülü ile işlem dışı hareketlerin minimize edildiği yeni CNC kodları türetilir

ve CNC kod modülüne tekrar transfer edilir. Kesme parametreleri modülü ile her bir operasyon için maksimum kesme değerleri belirlenerek yeni ilerleme ve dönme hızları belirlenir. Sonuç olarak gerekli verilerin alındığı taret ve iş parçası veri modülleri algoritmaya dahil edilir.

N	G Code	X	Y	Z	I	J	R	W	L
54									
00		175	-131						
00				40					
01				-3					
91									
01		-200							
00				40					
90									

Şekil 4.47 Kod editöründeki CNC parça programı (Pınar vd, 2005)

Taret modülünde taretin işleme verileri belirlenir. Kesme takımlarının sıraları, çapları, insert numarası ve takım ömrü gibi bilgiler txt uzantısı ile bir bilgisayar dosyası olarak kaydedilir. İş parçası veri modülünde malzeme, uzunluk, genişlik, yükseklik ve kullanıcı tarafında belirlenen referans noktası gibi bilgiler txt uzantılı bir dosya ile CNC kod editörüne kaydedilir.

CNC kod modülü işleme geometrisi belirleme işlemcisi ile işleme süresini belirleme hesaplayıcılarını içerir. Bu süreçleri başarabilmek için parça programı CNC kod modülü içerisindeki kod editörüne aktarılır. Şekil 4.47’de kod editörü içindeki CNC parça programı verilmiştir.

Sonuç olarak CNC parça programı tezgahtan geliştirilen algoritmaya takım yollarının ve kesme parametrelerinin incelenmesi için Delphi 3.0 programlama dili ile aktarılmıştır. Takım yolu kısaltma modülü ile gereksiz hareketler azaltılmıştır. Kesme parametreleri modülü ile tezgah gücü ve takım ömrü gibi kısıtlar göz önünde bulundurularak maksimum kesme hızı sağlanmıştır. Yapılmış olan uygulama ile %7 gibi bir işleme süresinin kısaltıldığı görülmüştür. Fakat yazılımın sadece 2,5 eksen işlemlerde kullanılabilir olması diğer eksenlerdeki uygulamalar için büyük bir kısıttır. (Pınar vd, 2005)

## 5. CEPLERİN KABA BOŞALTIMASI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bölüm 4'te anlatılan önceki yapılmış önemli çalışmalardan çıkan sonuç; konu hakkında günümüze kadar yapılmış olan çalışmaların çoğu takım yollarının kısaltılması veya takım yolları üzerinde değişiklikler yapılarak işleme süresin azaltılması üzerinedir. Fakat yapılmış olan çalışmaların bir çoğu takım yolu uzunluğunu ve işleme süresini aynı anda karşılaştırmamıştır. Bu karşılaştırmayı yapan yöntemler ise karşılaştırmayı yaptıkları takım yolu türlerini neden dolayı seçtiklerini tam anlamı ile açıklamamıştır. Aşağıda anlatılan birbiri ile direk ilişkili iki uygulama, bu karşılaştırmayı tam anlamıyla yapmakta olup ilk uygulamada, kaba işleme ile cep boşaltma için en kısa takım yolunu verecek olan yöntemin neden seçildiği sayısal sonuçlar ile cevaplanmaktadır. Yapılmış olan ikinci uygulama ise seçilen takım yolu yöntemi üzerinden gidilerek, kaba işleme için talaş kaldırma süresini daha fazla kısaltma amacı üzerine yapılmıştır.

### 5.1 Alan Doldurma Eğrileri ile Geleneksel Yöntemlerin Karşılaştırılması

Önceki bölümlerde anlatılan alan doldurma eğrileri yöntemlerinden günümüzde en çok kullanılan Hilbert ve Peano eğrileri seçilerek artık CNC takım yolu oluşturmada klasikleşen tek yönlü izoparametrik takım yolu ile ofsetlenmiş eğrilerden oluşan takım yolları aşağıda anlatılan bir uygulama ile karşılaştırılmıştır.

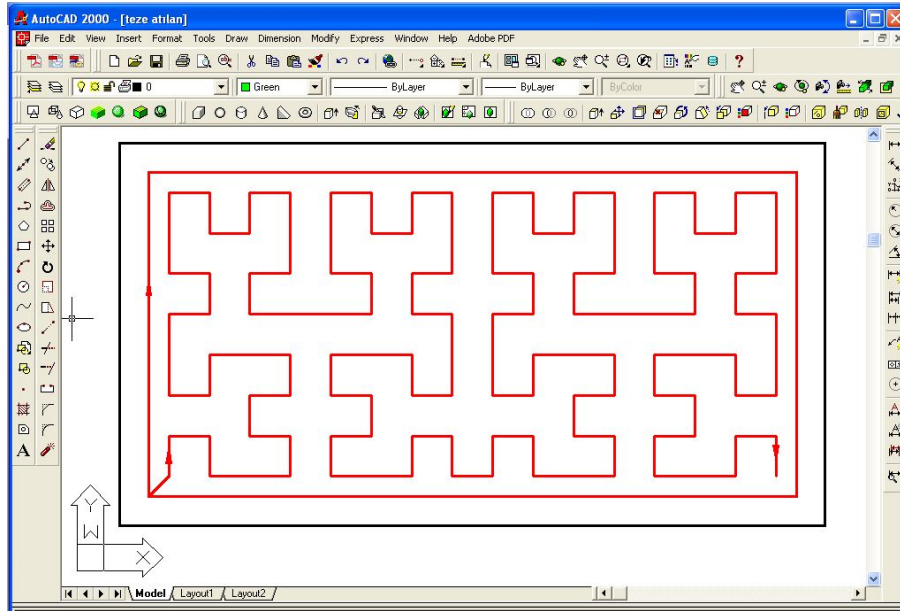
Yapılan çalışmanın amacı takım yolu uzunluğu işleme verimliliği gibi takım yolları arasındaki farklılıkların analiz edilmesidir. Aşağıdaki çalışmada dört tip takım yolu kullanılmış ve karşılaştırılmış olup bu takım yollu tipleri aşağıda verildiği gibidir.

- Hilbert Alan Doldurma Eğrisinden Oluşan Takım Yolu
- Peano Alan Doldurma Eğrisinden Oluşan Takım Yolu
- Tek Yönlü İzoparametrik Takım Yolu
- Ofsetlenmiş Eğrilerden Oluşan Takım Yolu

Takım yolları AutoCad programında çizilmiş olan 26,4x48,8mm'lik bir dikdörtgen şekil üzerinde oluşturulmuştur. Bu takım yolları daha sonra şekil 5.1'de resimleri gösterilen MultiCam 48 Plus isimli 3 eksen bir freze tezgahında Ø4mm çapında düz uçlu takım ile işlenmiştir. Malzeme olarak 20mm kalınlığında akrilik malzeme kullanılmış olup işleme derinliği 5mm olarak ele alınmıştır. İlgili uygulamanın geçmiş olduğu adımlar aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.



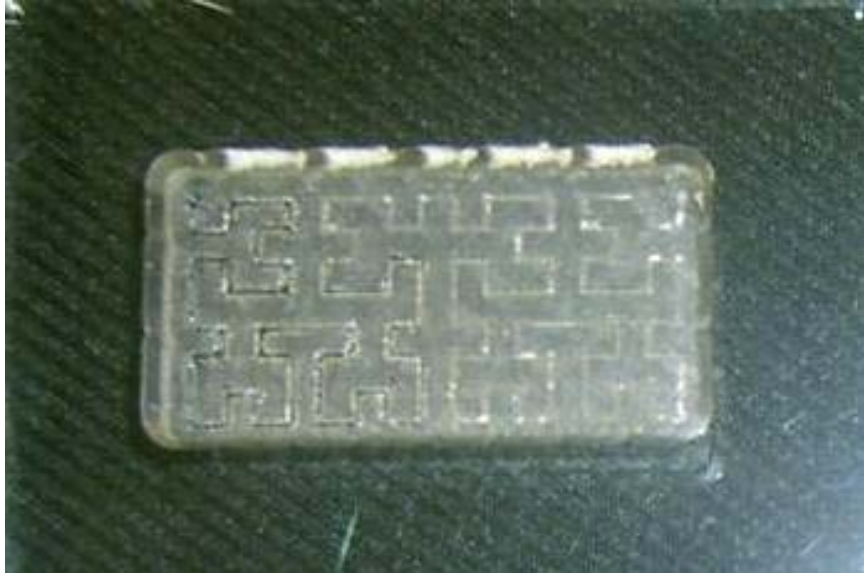
Şekil 5.1 MultiCam 48 Plus isimli router tezgahı



Şekil 5.2 Hilbert alan doldurma eğrisi ile oluşturulan takım yolu

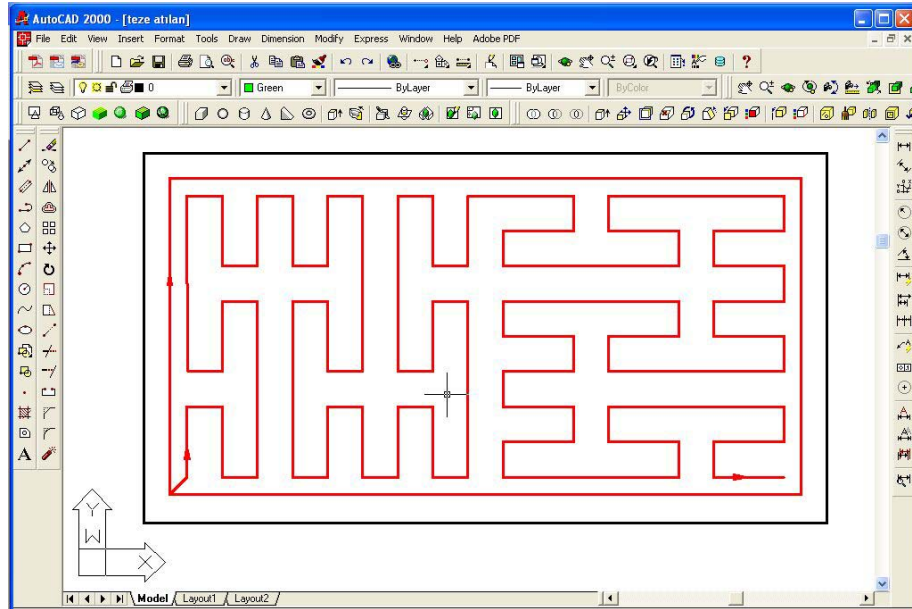
Hilbert eğrileri ile ilgili takım yolunu oluşturmak için AutoCad 2004 çizim programı kullanılmış olup şekil 5.2’de gösterildiği üzere 26,4x48,8mm’lik bir dikdörtgen ele alınmıştır. Ø4mm’lik düz uçlu freze takımının kullanılacağı hesaba katılarak ilgili cep içerisinde herhangi bir boşluk kalmayacak şekilde Hilbert eğrisi oluşturulmuştur.

İlgili iş parçası işlendikten sonra Şekil 5.3’te verilen resimdeki sonuçlar ortaya çıkmış olup Hilbert eğrisi ile talaş kaldırmaya engel teşkil edebilecek herhangi bir durumun söz konusu olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.3 Hilbert alan doldurma eğrisi ile işlenen akrilik parça

Şekil 5.3'te görüldüğü üzere Hilbert eğrisi ile oluşturulan takım yolunu izleyen  $\text{Ø}4\text{mm}$ 'lik düz uçlu takım ilgili dikdörtgen cep içerisinde herhangi bir işlenmemiş nokta bırakmamaktadır. Bu takım yolunun toplam uzunluğu AutoCad 2004 çizim programı ile hesaplanmış olup  $491,8\text{mm}$  olarak bulunmuştur. Yukarıdaki şekillerden de anlaşılacağı üzere işleme süresine etki edebilecek 106 adet köşe bulundurmaktadır.

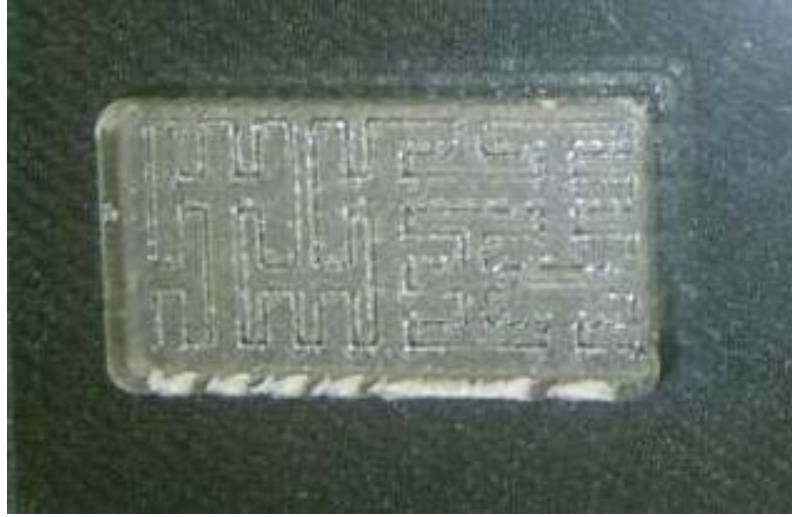


Şekil 5.4 Peano alan doldurma eğrisi ile oluşturulan takım yolu

Peano eğrileri ile ilgili takım yolunu oluşturmak için bir önceki yöntemle paralel olarak AutoCad 2004 çizim programı kullanılmış olup şekil 5.5'de gösterildiği üzere  $26,4 \times 48,8\text{mm}$  ölçülerinde bir önceki uygulamada kullanılan dikdörtgenin aynısı ele alınmıştır. Herhangi bir

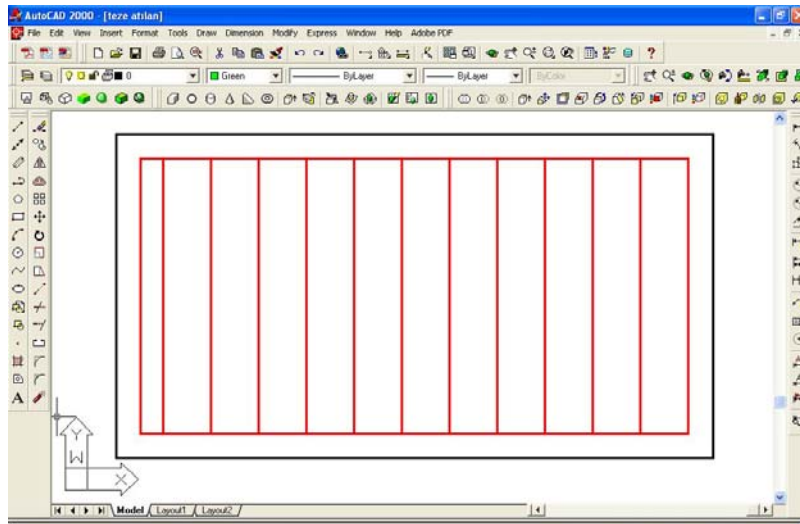
farklılık oluşmaması için yine  $\text{Ø}4\text{mm}$ 'lik düz uçlu freze takımının kullanılacağı hesaba katılarak ilgili cep içerisinde herhangi bir boşluk kalmayacak şekilde Peano eğrisi dikdörtgen cep içerisine takım merkezinin izlemesi için yerleştirilmiştir.

Akrilik iş parçası işlendikten sonra Şekil 5.5'de verilen resimdeki sonuçlar ortaya çıkmış olup Peano eğrisi ile talaş kaldırmaya engel teşkil edebilecek herhangi bir durumun söz konusu olmadığı görülmüştür.



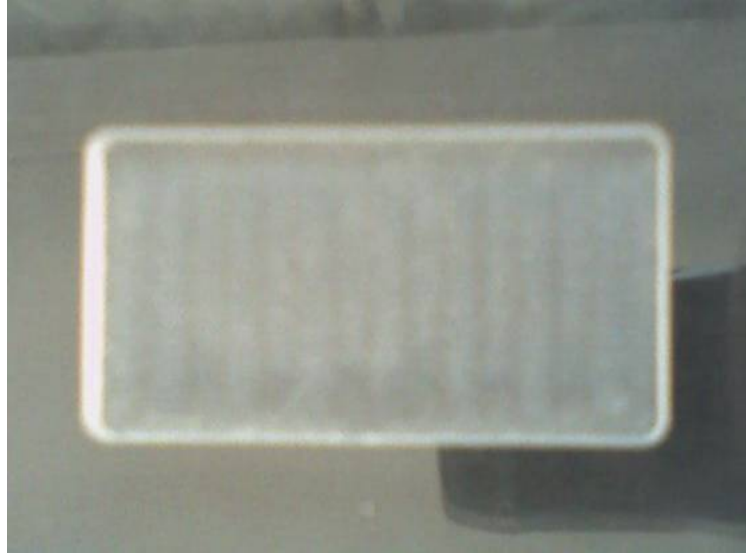
Şekil 5.5 Peano alan doldurma eğrisi ile işlenen akrilik parça

Şekil 5.5'de gözlendiği üzere Peano eğrisi ile oluşturulan takım yolunu izleyen  $\text{Ø}4\text{mm}$ 'lik düz uçlu takım ilgili dikdörtgen cep içerisinde herhangi bir işlenmemiş nokta bırakmamaktadır. Bu takım yolunun toplam uzunluğu yine AutoCad 2004 çizim programı ile hesaplanmış olup 541,44mm olarak bulunmuştur. Peano eğrisi ile oluşturulan takım yolunda işleme süresine etki edebilecek 84 adet köşe bulunup takım yolu uzunluğu Hilbert eğrisine göre artmış olsa da ( $491,8\text{mm} - 541,44\text{mm}$ ) köşe sayısında belirgin bir düşüş ( $106 - 84$  adet) yaşanmıştır.



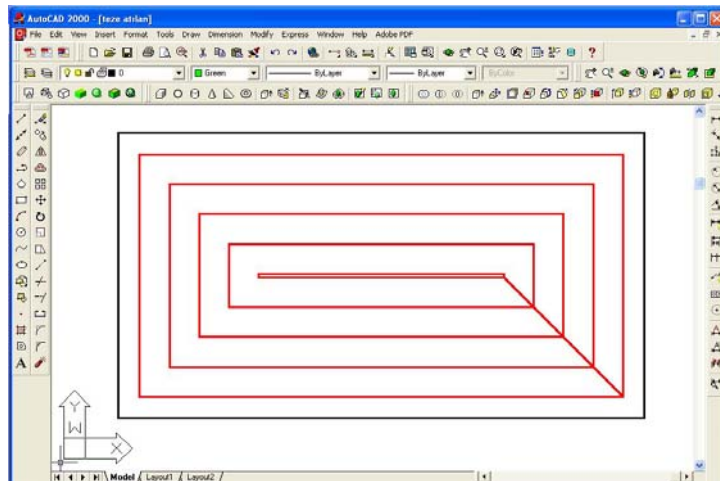
Şekil 5.6 Tek yönlü izoparametri ile oluşturulan takım yolu

Tek yönlü izoparametri ile takım yolunu oluşturmak için önceki iki yöntemde kullanılan aynı dikdörtgen şekilli cep ele alınmış olup ilgili takım yolu AutoCad 2004 çizim programında Şekil 5.6'daki gibi oluşturulmuştur.

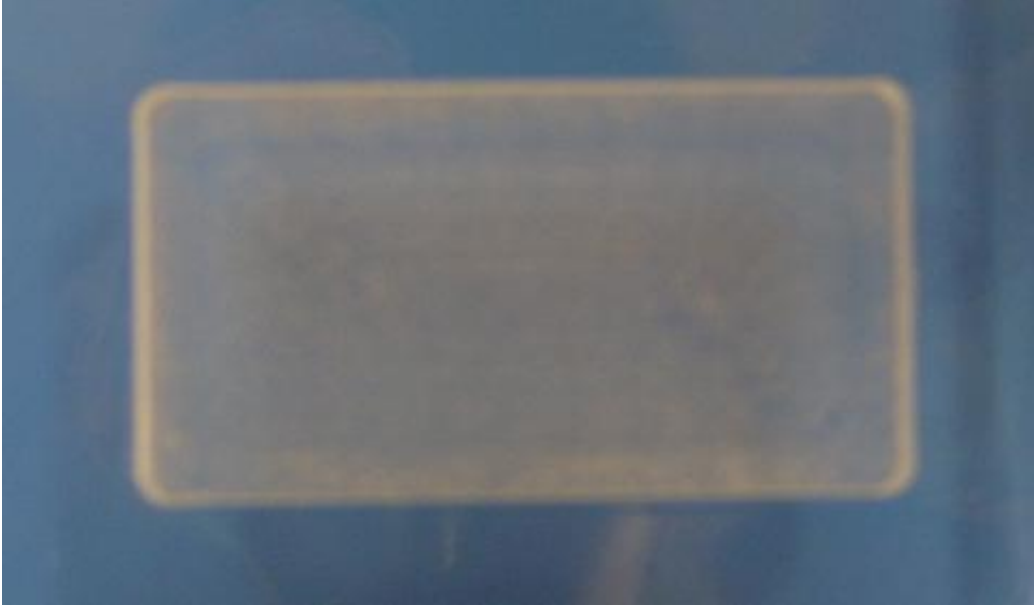


Şekil 5.7 Tek yönlü izoparametri ile işlenen akrilik parça

Akrilik iş parçası işlendikten sonra Şekil 5.7'de verilen resimdeki sonuçlar ortaya çıkmış olup oluşturulan takım yolu ile talaş kaldırmaya engel teşkil edebilecek herhangi bir durumun sözkonusu olmadığı görülmüştür. Şekil 5.7'de gözlemlendiği üzere ilgili takım yolunu izleyen  $\text{Ø}4\text{mm}$ 'lik düz uçlu takım ilgili dikdörtgen cep içerisinde herhangi bir işlenmemiş nokta bırakmamaktadır. Bu takım yolunun toplam uzunluğu yine AutoCad 2004 çizim programı ile hesaplanmış olup  $419,8\text{mm}$  olarak bulunmuştur. İzoparametrik takım yolunda işleme süresine etki edebilecek 28 adet köşe bulunup takım yolu uzunluğu ve köşe sayısı önceki iki yöntemle göre oldukça düşmüştür.



Şekil 5.8 Ofsetleme ile oluşturulan takım yolu



Şekil 5.9 Ofsetleme ile işlenen akrilik parça

Ofsetleme ile ilgili takım yolunu oluşturmak için önceki yöntemlere paralel olarak AutoCad 2004 çizim programı kullanılmış olup şekil 5.11’de gösterildiği üzere 26,4x48,8mm ölçülerinde önceki uygulamalarda kullanılan dikdörtgenin aynısı ele alınmıştır. Herhangi bir farklılık oluşmaması için yine Ø4mm’lik düz uçlu freze takımının kullanılacağı hesaba katılarak ilgili cep içerisinde herhangi bir boşluk kalmayacak şekilde ofset takım yolları, dikdörtgen cep içerisine takım merkezinin izlemesi için yerleştirilmiştir.

Şekil 5.9’da gözleendiği üzere ofsetleme ile oluşturulan takım yolunu izleyen Ø4mm’lik düz uçlu takım ilgili dikdörtgen cep içerisinde herhangi bir işlenmemiş nokta bırakmamaktadır. Bu takım yolunun toplam uzunluğu yine AutoCad 2004 çizim programı ile hesaplanmış olup 467mm olarak bulunmuştur. Ofsetleme ile oluşturulan takım yolunda işleme süresine etki edebilecek 20 adet köşe bulunmaktadır.

Aşağıdaki tablodan da anlaşıldığı üzere bu uygulamada en kısa takım yoluna sahip olan yöntem tek yönlü izoparametrik takım yoludur. En uzun takım yoluna sahip olan işleme yöntemi ise % 128,98 ‘lik değeri ile Hilbert alan doldurma yöntemidir. İşleme süresine direkt olarak etki eden köşe sayısı değerleri bakımından en az köşe sayısına sahip olan işleme yöntemi ofsetlenmiş dikdörtgenlerden oluşan takım yoludur. Aynı şekilde en fazla köşe sayısına sahip işleme yöntemi ise Peano eğrisi ile oluşturulan alan doldurma eğrisidir.

Çizelge 5.1 Uygulama yapılan takım yollarının karşılaştırılması

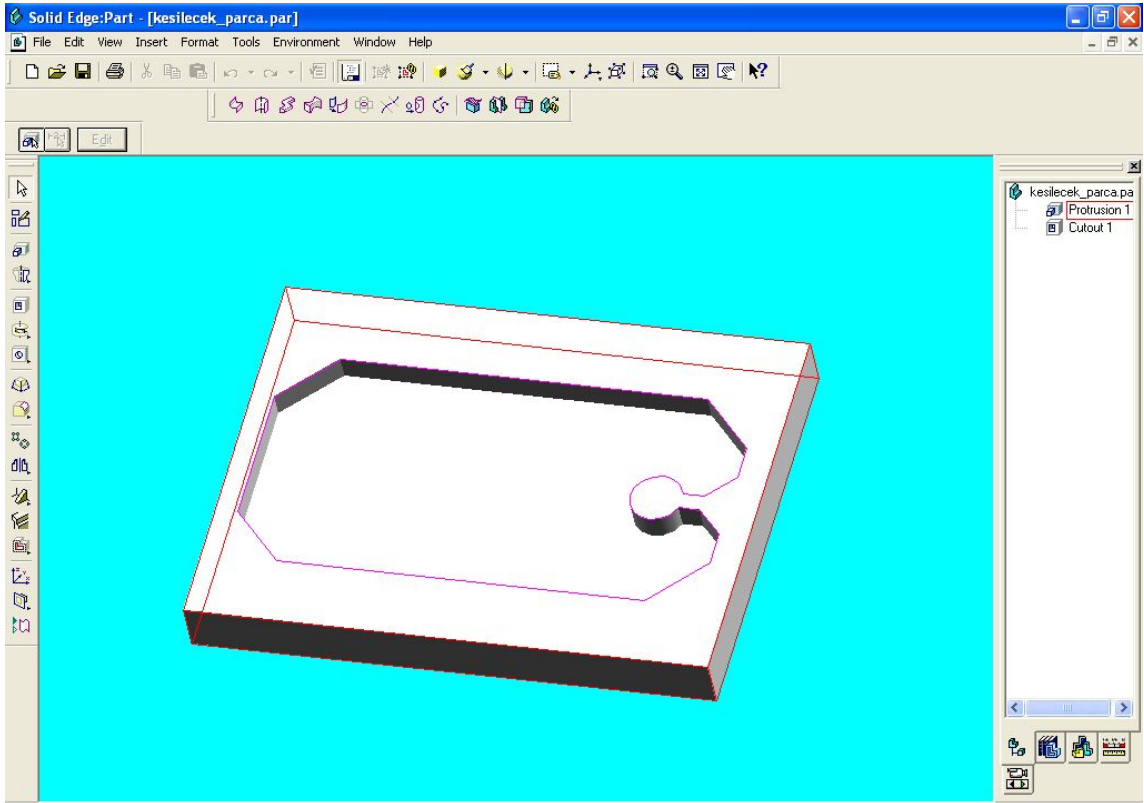
<b>TAKIM YOLLARININ KARŞILAŞTIRILMASI</b>				
<b>Takım Yolu Türü</b>	<b>Takım Yolu Uzunluğu (mm)</b>	<b>Takım Yolu Uzunluğu (%)</b>	<b>Köşe Sayısı (adet)</b>	<b>Köşe Sayısı (%)</b>
Tek Yönlü İzoparametrik Takım Yolu	419,8	<b>100%</b>	28	140%
Ofsetlenmiş Dikdörtgenler takım yolu	467	111,24%	20	<b>100%</b>
Hilbert Eğrisi ile Oluşturulan Takım Yolu	541,44	<b>128,98%</b>	84	311%
Peano Eğrisi İle Oluşturulan Takım Yolu	491,8	117,15%	106	<b>530%</b>

## 5.2 İşleme Süresi Üzerine Yapılan Uygulama

Bölüm 5.1.'de yapılan uygulamalardan görüldüğü üzere seçilen takım yolu yöntemlerinden ofsetleme ile yapılan işlemenin, işleme süresine etki eden gerek köşe sayısı gerekse takım yolu uzunluğu bakımından iyi bir sonuç verdiği görülmüştür.

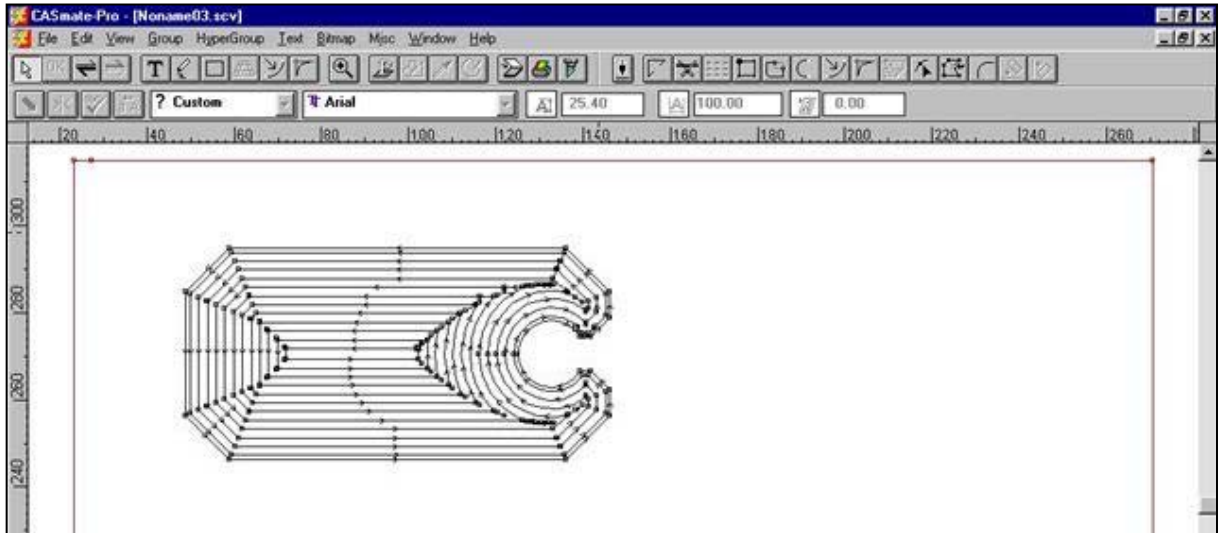
Aşağıda yapılan uygulamalarda ise Şekil 5.10'da gösterilen Solid Edge 3 boyutlu modelleme programında çizilmiş olan içbükey ve dış bükey hatlara sahip bir şekil ele alınmış olup bu şekil öncelikle 4mm çaplı ve düz uçlu bir freze takımı ile işlenmiştir. Daha sonra ise yapılan uygulamada iki ayrı takım kullanılmış olup 8mm çaplı takım genel bir cep boşaltma işlemi yapmakta daha sonra bu takım magazinde bulunan 4mm çaplı bir takım ile değiştirilip ilk yapılan uygulamadaki hatların aynısını elde etmek için kenarlar 4mm çaplı takım ile geçilmektedir. Bu uygulama ile kaba cep boşaltma için işleme süresinin ve takım yolu uzunluğunun daha fazla kısaltılması amaçlanmaktadır. Bu uygulamaların yapılması için MultiCam 48 Plus isimli 3 eksen freze kullanılmıştır. İşlenecek olan malzeme olarak ise 10 mm kalınlıklı alüminyum seçilmiştir.

Şekil 5.11'de işlenecek şekil için AutoCad'de elde edilen 4mm çaplı takıma göre takım yollarının CASmade Pro isimli CAM programına aktarılmış hali verilmektedir.



Şekil 5.10 Solid edge programında modellenen parça

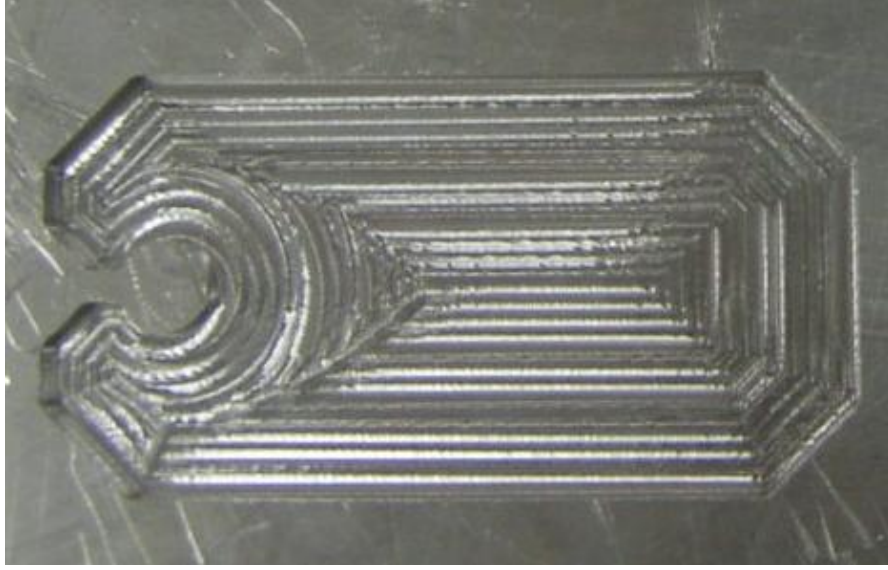
CASmade Pro isimli CAM programına aktarılan 4mm çaplı takım göre offsetlenmiş takım yolları Şekil 5.11'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.11 Çap 4mm'lik takım kullanılarak elde edilen takım yolu

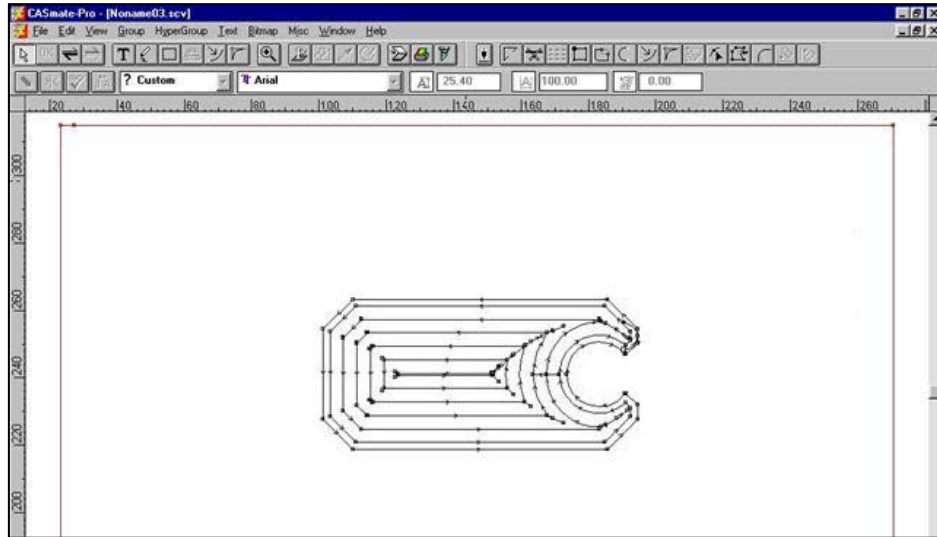
Çap 4 mm'lik takım kullanıldığında takımın kırılmasını önlemek için yapılan çalışmada ilk derinlik 2mm sonraki derinlik ise yine 2mm olarak belirlenmiş olup takım yolundan aynı takım ile 2 defa geçilmiştir.

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere çap 4mm'lik takım kullanıldığında 14 adet takım yolu oluşturulmuştur. Takım yolları arası mesafe farkı her iki çalışmada da takım çapının yarısı kadar alınmıştır.



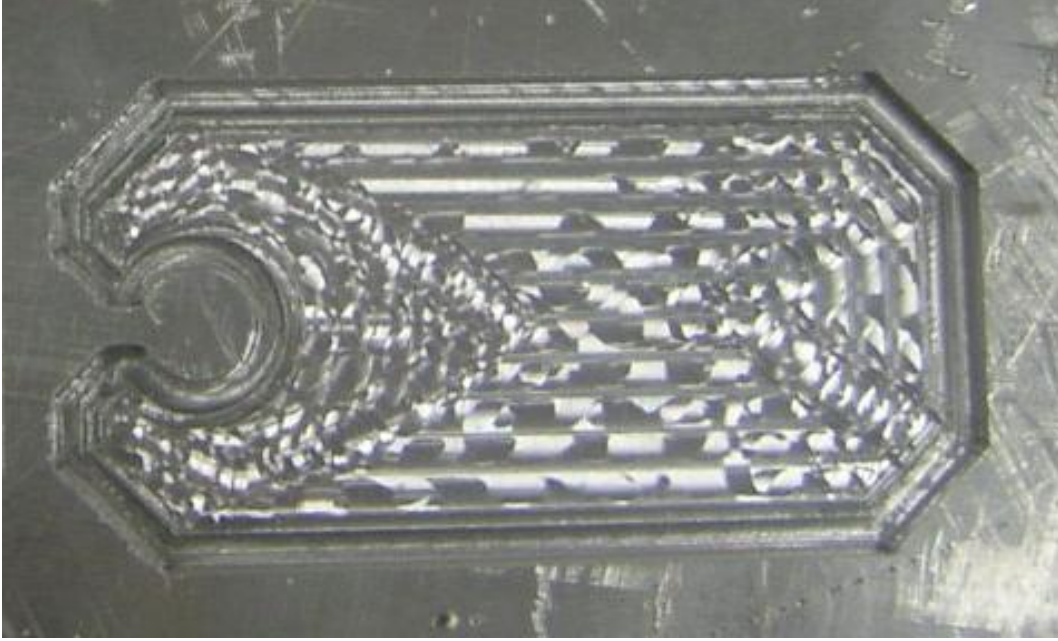
Şekil 5.12 Çap 4mm'lik takım kullanılarak işlenen parça

Yukarıdaki parça için elde edilen toplam takım uzunluğu 5147,906mm, toplam işleme süresi ise 263 sn. olarak tespit edilmiş olup, oluşturulan takım yolunda 110 adet köşe mevcuttur.



Şekil 5.13 Çap 4mm ve 8mm'lik takımların kullanıldığı işleme için edilen takım yolu

Bu parçayı oluşturulan takım yolları ile işleyebilmek için tezgah en dışta bulunan takım yoluna gelene kadar 8mm çaplı takım ile işleme yapmış olup daha sonra magazinde bulunan 4mm çaplı takımı alarak en dıştaki takım yolundan geçmiştir. Böylelikle bir önce yapılan uygulamadaki hatların aynısı elde edilmiştir.



Şekil 5.14 Çap 4mm ve 8mm’lik takımaların kullanılması ile işlenen parça

Çap 8mm takım kullanıldığında 4 mm’lik dalma derinliğine tek pasoda ulaşılmıştır. Toplamda 8 adet takım yolu kullanılmıştır. Şekil 5.14’de görülen parça için elde edilen takım yolu uzunluğu 1694,2352 mm olup, toplam işleme süresi ise takım değiştirme işlemi dahil edilerek 171 sn olarak ölçülmüştür. Bu yöntemle elde edilen takım yollarında elde edilen köşe sayısı ise 84 adettir.

Çizelge 5.2 Farklı çaplı takımaların kullanıldığı uygulamaların karşılaştırılması

TAKIM YOLLARININ KARŞILAŞTIRILMASI						
Takım Yolu	Takım Yolu Uzunluğu (mm)	Takım Yolu Uzunluğu (%)	Köşe Sayısı (adet)	Köşe Sayısı (%)	İşleme Süresi(Sn.)	İşleme Süresi(%)
Ø4 mm	5147,906	303,80%	110	130,90%	263	153,80%
Ø4 ve 8mm	1694,2352	100%	84	100%	171	100%

Yukarıdaki tabloya baktığımızda 8mm çapında takım kullandığımız zaman yaklaşık olarak 3 kat daha kısa takım yolu kullanarak ve 1,5 kat daha kısa sürede işleme yapılabildiği görülmüştür. İlk yapılan uygulamada sade 4mm çaplı takım kullanılmış iken ikinci

uygulamada 8mm ve 4mm çaplı takımlar parçayı işleyebilmek için aynı anda kullanılmıştır. Bu yöntem ile kaba cep boşaltma için takımın daha kısa bir yol izleyerek daha kısa sürede işleme yapabildiği gösterilmiş olmuştur.

Boşaltılacak olan alan küçüldükçe takım değiştirme suresinden dolayı tek takım kullanmak daha avantajlı hale gelebilmektedir. Fakat burada takım yolu sayısı arttığından dolayı koşe sayısındaki artışın etkisini kesinlikle gznnde bulundurmalıyız. Aynı zamanda 4mm çaplı takımın kullanıldığı yöntemde yaşamış olduğumuz bir problem olan fazla derinlikteki boşaltmaları ince takımla yapamama kısıdını da gznnde bulundurmak faydalı olacaktır.

## 6. SONUÇLAR

İlk CNC tezgahın kullanılmaya başlanmasından itibaren günümüze kadar geçen sürede takım yolu oluşturma yöntemleri hakkında günümüze kadar yapılmış olan çalışmaların çoğunun takım yollarının kısaltılması veya takım yolları üzerinde değişiklikler yapılarak işleme süresin azaltılması üzerinedir. Fakat yapılmış olan çalışmaların bir çoğu takım yolu uzunluğunu ve işleme süresini aynı anda karşılaştırmamıştır. Bu karşılaştırmayı yapan yöntemler ise karşılaştırmayı yaptıkları takım yolu türlerini neden dolayı seçtiklerini tam anlamı ile açıklamamıştır. Yukarıda anlatılan birbiri ile direk ilişkili iki uygulama, bu karşılaştırmayı tam anlamıyla yapmakta olup ilk uygulamada, kaba işleme ile cep boşaltma için en kısa takım yolunu verecek olan yöntemin neden seçildiği sayısal sonuçlar ile cevaplanmaktadır. Yapılmış olan ikinci uygulama ise seçilen takım yolu yöntemi üzerinden gidilerek, kaba işleme için talaş kaldırma süresini daha fazla kısaltma amacı üzerine yapılmıştır.

Yapılmış olan ilk çalışmada akrilik malzeme, Hilbert eğrisi, Peano eğrisi, izoparametrik metod ve ofsetleme yöntemini de içine alan dört farklı yöntem ile işlenmiş olup, burada en iyi sonucu 20 adet köşe sayısı ve 467mm'lik takım yolu uzunluğu ile ofsetleme yöntemi vermiştir. Takım yolu uzunlukları bakımından ofsetleme yöntemi izoparametrik yöntemle göre daha kötü bir sonuç verse de (%11,24 daha uzun) köşe sayısı bakımından izoparametrik eğrinin kullanıldığı yöntemle karşılaştırıldığında (%40'lık fark) ofsetleme yönteminin bu uygulamada ele alınan yöntemler arasında en iyi sonucu veren yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Burada göz önünde bulunması gereken en önemli etkenlerden bir tanesi köşe sayısı ne kadar az olursa tezgahı zorlayabilecek mekanik sorunlar o kadar az olur. Bu sorunlar köşe noktalara yaklaşıldığında interpolasyondan kaynaklanan ani dönüşlerden ve ani yavaşlama ve hızlanmalardan kaynaklanabilmektedir.

Daha sonra yapılan ikinci çalışmada ise alüminyum parça, ilk yöntemdeki en iyi sonucu veren ofsetleme yöntemi kullanılarak işlenmiş ve değişik kalınlıklardaki takımların işleme hızına dolayısı ile verimliliğe olan etkilerine bakılmıştır. Burada seçilen şekil öncelikle 4mm çaplı bir takım ile işlenmiş ve takım yolu uzunluğu ile işleme süresi saptanmıştır. Daha sonra ise aynı şekil 8mm çaplı takım ile işlenerek şeklin radyüslü kenarları 4mm çaplı takım ile tekrar işlenmiştir. Bu işlemede takım değiştirme süresinin dahil edilmesine rağmen işleme süresi önceki yöntemin yaklaşık %65'i civarındadır. Bu sonuçlar ceplerin kaba işlenmesi için gerek takım yolu gerekse işleme süresi olarak daha fazla avantaj sağlayan bu yöntemin kullanılabilceğini ispatlamaktadır.

Burada bir diğer göz önüne alınması gereken olumlu etken takım aşınmasıdır. Bilindiği üzere takım aşınmasını talaş yükü direk olarak etkileyen bir faktördür. Yukarıdaki uygulamalardan görüleceği üzere 4mm çaplı takım ile istenen cep tek pasoda boşaltılamamıştır bunun nedeni takımın zarar görebilme ihtimalidir. Fakat 8mm çaplı takım kullanıldığı zaman istenen cep tek pasoda daha kısa sürede işlenmiştir. Bunun anlamı işlenen cep için kullanılan 8mm çaplı takıma talaş yükü daha kısa bir süreliğine etki etmiştir.

**KAYNAKLAR**

Akkurt, Mustafa, (1996), “Bilgisayar Destekli Takım Tezgahları ve Bilgisayar Destekli Tasarım ve İmalat Sistemleri”, İTÜ Makine Fakültesi.

Anotaipaiboon, W., Makhanov, S.S., (2003), “Tool Path Generation for Five Axis NC Machining Using Space-Filling Curves”, Thammasat University, Thailand.

Choi, Byoung K., Kim, Dae H., Jerard, Robert B., (1997), “C-Space Approach to Toolpath Generation for Die and Mould Machining”, Computer Aided Design, 657-669.

Choy, H.S., Chan, K.W., (2001), “A Corner Looping Based Toolpath for Pocket Milling”, Computer Aided Design, 155-166.

Cox, Jordan J., Takezaki, Yasuko, Ferguson, Helaman R.P., Kohkonen, Kent E., Mulkay, Eric L., (1993), “Space-Filling Curves in Tool-Path Applications”, Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, USA.

Ersoyoğlu, Ali Serhat, Ünüvar, Ali, (2001), “CAD/CAM Sistemlerinde Takım Yolu Oluşturma Teknikleri”, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Konya Şubesi, Makine Tarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, 295-308.

Feng, Hsi-Y., Li, H., (2001), “Constant Scallop-Height Tool Path Generation for Three-Axis Sculptured Surface Machining”, University of Western Ontario, Canada.

Halkacı, H. Selçuk, Ulker, Erkan, (2003), “İki Boyutlu Eğrilerde Küresel Uçlu Tezgahlar İçin Takım Yolu Geliştirilmesi”, Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Konya

Krar, Steve, Gill, Arthur, (1990) “CNC Technology and Programming”, McGraw-Hill Book Co., United States of America.

Li, Susan X., Jerard, Robert B., “Non-İzoparametric Three Axis NC Tool Path Generation for Finish Machining of Sculptured Surfaces”, Department of Mechanical Engineering, University of New Hampshire, Durham.

Lo, Chih-Ching, (1998), “A New Approach to CNC Tool Path Generation”, Department of Mechanical Engineering, Feng Chia University, Taichung, Taiwan.

Park S.C., Chung, Yun C., (2001), “Tool Path Generation From Measured Data”, Computer Aided Design, 467-475.

Park, S.C., Choi, B.K., (2001), “Uncut Free Pocketing Tool-Path Generation Using Pair-Wise

Offset Algorithm”, Computer Aided Design, 739-746.

Pınar, Ahmet M., Güllü, Abdulkadir, (2005), “Time Minimization of CNC Part Programs in a Vertical Machining Center in Terms of Tool Path and Cutting Parameter Criteria”, Technical Education Faculty, Gazi University, Ankara.

Thyer, G.E., (1994), “Computer Numerical Control of Machine Tools”, Thomson Litho Ltd., Scotland.

Toh, C.K., (2004), “Cutter Path Strategies in High Speed Rough Milling of Hardened Steel”, School of Engineering, University of Birmingham, UK.

Turgut, Yakup, Korkut, İhsan, Akıncı, Mehmet Tolga, (2003), “CNC Torna Tezgahları İçin Dialog Metodu Kullanılarak NC Kod Türetilmesi, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara.

Yao, Zhiyang, Gupta, Satyandra K., (2004), “Cutter Path Generation for 2,5D Milling by Combining Multiple Different Cutter Paths Patterns” International Journal of Production Research, 2141-2161.

**INTERNET KAYNAKLARI**

[1] [www.cagcadcam.com](http://www.cagcadcam.com)

[2] [www.dcs.napier.ac.uk](http://www.dcs.napier.ac.uk)

[3] [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

[4] [www.swiss.csail.mit.edu](http://www.swiss.csail.mit.edu)

[5] [www.turkcadcam.net](http://www.turkcadcam.net)

[6] [www.ulakbim.gov.tr](http://www.ulakbim.gov.tr)

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	01.04.1980	
Doğum yeri	İzmit	
Lise	1994-1998	Körfez/Yarımca Yab.Dil Ağr. Lisesi
Lisans	1998-2002	T.C. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı
Çalıştığı kurumlar	2003-2004 2005-2006 2006-	Teksan Jeneratör A.Ş. Proje Mühendisi TİM Reklamcılık A.Ş. Proje&Planlama Mühendisi Assan Hanil Otomotiv San.A.Ş. Proje Mühendisi