

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**5 EKSENLİ NÜMERİK KONTROLLÜ FREZE TEZGÂHLARI İÇİN YENİ TAKIM YOLU
OLUŞTURMA STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Ahmet CAN

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2010

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**5 EKSENLİ NÜMERİK KONTROLLÜ FREZE TEZGÂHLARI İÇİN YENİ TAKIM
YOLU OLUŞTURMA STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Ahmet CAN

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2010

Bu tez ... / ... / 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR

Prof. Dr. Saim KOÇAK

Doç. Dr. Orhan ENGİN

(Danışman)

(Üye)

(Üye)

Doç. Dr. İsmail LAZOĞLU

Yrd. Doç.Dr.Ali Serhat ERSOYOĞLU

(Üye)

(Üye)

ÖZET**DOKTORA TEZİ****5 EKSENLİ NÜMERİK KONTROLLÜ FREZE TEZGÂHLARI İÇİN YENİ TAKIM YOLU OLUŞTURMA STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ****Ahmet CAN****Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR****2010, 203 Sayfa****Jüri: Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR
Prof. Dr. Saim KOÇAK
Doç. Dr. Orhan ENGİN
Doç. Dr. İsmail LAZOĞU
Yrd. Doç. Dr. Ali Serhat ERSOYOĞLU**

Bir imalat sisteminde serbest şekilli yüzeylerden oluşan karmaşık parçaların tasarlanması kadar işlenmesi de oldukça önemlidir. Talaş kaldırma işleminin daha da etkin bir şekilde yapılabilmesi için, üç eksen talaş kaldırma stratejisine alternatif, beş eksen talaş kaldırma stratejisi tercih edilmektedir. Bu tezgâhların etkin biçimde talaş kaldırabilmesi ancak etkin bir takım yolu oluşturma stratejisi ile mümkündür. Ticari yazılımlar da dâhil olmak üzere, etkin bir beş eksen takım yolu oluşturma konusunda henüz eksikler bulunmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada serbest şekilli eğrisel bir yüzeyin beş eksen frezelenmesi için yeni stratejiler geliştirilmiştir. Eşit kalıntı talaş stratejisi adı verilen stratejide yanal kaymalar yüzey eğriliğine göre adaptif olarak verilmiştir. Aynı zamanda ilerleme adım uzunluğu sabit kirişsel hataya göre adaptif olarak ayarlanmıştır. Bu stratejide elde edilen işleme zamanı izo-parametrik takım yollarından %30–50 daha düşüktür. Bu stratejide literatürlerden farklı olarak doğrudan parametrik alanda yanal kayma ve ilerleme yönünde ikili bir iteratif tarama yöntemi geliştirilmiştir. Serbest şekilli eğrisel yüzey B-Spline parametrik yüzeyi ile tanımlanmış, yüzeye ait bilgiler STEP-AP214 formatından alınmıştır. Etkin ve dalmalara karşı güvenli bir frezeleme için takım seçim algoritması geliştirilmiştir. Aynı zamanda takım temas (TT) noktalarında dalmaları engelleyen çok hassas bir tarama yöntemi de geliştirilmiştir. Son işlemci (Postprocessing) aşamasında elde edilen takım yolu bilgileri eğimli-döner (Tilt-rotary) bir beş eksen freze tezgâhına uygun kinematik dönüşümler kullanarak makine koordinat sistemine dönüştürülmüş ve NC kodları üretilmiştir. Algoritmalar Delphi programlama dili ile bir yazılım haline getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Takım yolu, B-Spline yüzeyi, Step, Takım seçimi, Beş eksen işleme, Sonişlemci.

ABSTRACT**PhD Thesis****DEVELOPMENT OF NEW TOOL PATH GENERATING STRATEGIES
FOR 5-AXIS NUMERICALLY CONTROLLED MILLING MACHINE-TOOLS****Ahmet CAN****Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Education Branch****Advisor: Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR****2010, 203 Pages****Jury: Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR
Prof. Dr. Saim KOÇAK
Assoc. Prof. Dr. Orhan ENGİN
Assoc. Prof. Dr. İsmail LAZOĞU
Assist. Prof. Dr. Ali Serhat ERSOYOĞLU**

The machining of the complicated products which includes free formed surface is important as more as designing in a manufacturing system. The machining in a numerically controlled machine-tool which is the last step of Computer Aided Manufacturing is the most important step of this process. Five-axis machining is preferred via three axes machining for making the machining more effective. It is possible to machine more efficiently with effective tool path generating strategy. There is not any adequate strategy on five-axes tool path generation even in commercial software. For this purpose new strategies on five-axis tool path generation are developed. In the strategy which is called iso-scallop, the side step lengths are adopted for surface curvatures. And the step lengths are adjusted for a constant chordal error value. The total machining times are reduced 30-50% according to izo-parameter tool-paths. In this strategy we used a binary iterative searching algorithm directly on parameter domain along side-step and step length direction. The surface is defined as B-Spline Parametric surface, and the surface is delineated with STEP-AP214 database. Effective and robust milling strategy is presented for gouging by the developed algorithm. In the same time, a rear gouging recognizing and eliminating algorithm is developed. The generated tool path data is translated to five-axis tilt rotary machine tools by using some kinematic transformation in post processing stage. The presented algorithm is transferred to software by using the Borland Delphi programming interface.

Key Words: Tool path, B-Spline Surface, Step, Tool Selection, Five-axis Machining, Postprocessing

TEŐEKKÖR

Bu tez alıŐması boyunca yardım, katkı ve tecrübeleriyle beni yönlendiren başta tez danışmanım, Sn. Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR'a, tezin hazırlanmasında emeği geçen tüm mesai arkadaşlarıma, bu tez süresince benden maddi-manevi desteğini ve sabrını esirgemeyen başta sevgili eŐim, Tuğba CAN'a, kızım, Elif Nazlı CAN'a, annem, babam ve kardeşlerime sonsuz Őükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
3. TEORİK ESASLAR	19
3.1. Serbest Şekilli Yüzeylerin Modellenmesi	19
3.1.1 B-Spline eğrileri	21
3.1.1.1. B-Spline Temel Fonksiyonları	23
3.1.1.2. B-Spline düğüm vektörünün tanımı	24
3.1.2. Geometrik yüzeylerin temsilinde kullanılan matematiksel yöntemler	24
3.1.2.1. B-Spline yüzeyleri	25
3.1.2.2. Non-uniform rasyonel B-spline yüzeyleri (NURBS)	27
3.1.3. Standart veri tabanları	28
3.2. Takım Yolu Oluşturma Teknikleri	31
3.2.1. TT Temelli takım yolu oluşturma teknikleri	31
3.2.2. TK temelli takım yolu oluşturma teknikleri	33
3.2.3. İzo parametrik metot için takım yolu verisi hesaplama	33
3.2.3.1. Haritalama	35
3.2.3.2. Adımlama	36
3.2.3.3. Yanal adım	36
3.2.4. Kartezyen metot için takım yolu verisi hesaplama	37
3.2.4.1. Haritalama	38
3.2.4.2. Adımlama	38
3.2.4.3. Yanal adım	39
3.2.5. APT tipi takım yolu verisi hesaplama	39
3.2.5.1. Haritalama	40
3.2.5.2. Adımlama	41
3.2.5.3. Yanal adım	43
3.2.6. Takım yolu oluşturmada şekil uzayı (C-space) yaklaşımı	43
3.2.6.1. Ofsetleme ile TK yüzeyinin Z-haritasının çıkarılması	47

3.3. Beş Eksen Frezeleme Tekniği	50
3.3.1. Beş eksen işleme yapabilen tezgâhların özellikleri	51
3.3.2. Beş eksen eğimli döner tablalı tezgâhta ileri kinematik	55
3.3.3. Beş eksen eğimli döner tablalı tezgâhta ters kinematik dönüşümler	56
3.3.3.1. Oryantasyon açılarının (A,C) bulunması	57
3.3.4. Beş eksen takım yolu oluşturma metodolojisi	58
3.3.4.1 Poligonlaştırılmış yüzeyde takım yolu oluşturma	61
3.3.4.1.1. Parametrik yüzeyin çokgenleştirilmesi	62
3.3.4.1.2. Takım temas verilerinin bulunması	63
3.3.4.1.3. TK verilerinin bulunması	65
3.3.4.1.4. Takım pozisyonuna bağlı dalma kontrolü ve düzeltilmesi	66
3.3.5. Beş eksen frezelemede takım oryantasyon açıları	68
3.3.6.2. C-uzayı taraması ile takım oryantasyonunun bulunması	72
3.3.7. Eğrilik eşleştirmeye bağlı takım yolu oluşturma oryantasyonu	74
3.3.8. Dalma eliminasyonuna bağlı takım yolu oluşturma tekniği	83
3.3.9. Yuvarlanan küre metodu	88
3.3.10. Grafik destekli yuvarlanan küre metodu	93
3.3.11. Yay kesleştirme metodu	94
3.3.12. Yay kesleştirme metodu ile 3-11/22 eksen işleme	97
3.3.14. Çok noktalı takım temasıyla pozisyonlama tekniği	99
3.3.14. Takım yolu aralıkları ve kalıntı talaş yüksekliği analizi	103
3.3.15. Beş Eksen takım yolu şablonları	105
3.4. Takım Yolu Stratejilerinin Geliştirilmesi.....	109
3.4.1. Step formatından B-spline denklem parametrelerinin elde edilmesi.....	109
3.4.2. Nokta bulutu ile yüzey denkleminin doğrulanması.....	116
3.4.3. TT noktalarının elde edilmesinde parametrik artış hesaplanması.....	117
3.4.3.1. İlerleme yönünde adım uzunluğunun hesaplanması	117
3.4.3.2. Yanal kayma yönünde adım uzunluğunun hesaplanması.....	122
3.4.4. Yüzey Normali ve Yön Vektörlerinin Hesaplanması.....	123
3.4.5. Takım konum (TK) verilerinin hesaplanması.....	126
3.4.6. Son işlemci (Postprocessor) ve Simulasyon.....	128
3.4.6.1. Eğim ve dönme açılarının (A-C) hesaplanması.....	129
3.4.6.2. Takım Konum verilerinin dönüştürülmesi.....	130
3.4.7. İzo-parametrik takım yolu stratejileri.....	133
3.4.7.1. Lokal yüzey eğrilik analizi.....	133
3.4.7.2. Kesici takım seçimi.....	136
3.4.7.2.1. Küresel uçlu takım seçimi.....	136
3.4.7.2.2. Düz uçlu kesici takım seçimi ve yerel-geri dalma analizi.....	137
3.4.8. Zig-Zag tek yön talaş kaldırma stratejisi.....	145
3.4.9. Zig-Zag çift yön talaş kaldırma stratejisi.....	150
3.4.10. Paralel spiral takım yolu oluşturma stratejisi.....	152
3.4.11. Eşit kalıntı talaş (izo-scallop) takım yolu oluşturma-I.....	155
3.4.12. Eşit kalıntı talaş (izo-scallop) takım yolu oluşturma-II.....	160
3.4.13. Eğrisel yüzeye yansıtılan 2 boyutlu eğrilerin işlenmesi.....	168

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA	175
4.1. Takım Yolu Uzunluklarının Karşılaştırılması	175
4.2. Küresel ve Düz Uçlu Takımların Karşılaştırılması	179
4.3. Takım Yolu Geometrilerinin Karşılaştırılması	181
4.3. Tartışma	186
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	190
6.KAYNAKLAR	195
EKLER	199

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Bilgisayar destekli üretim sürecinin şematik gösterimi	3
Şekil 3.1.	Bir B-spline eğrisi ve kontrol poligonu	21
Şekil 3.2.	Bezier eğrisine eşdeğer bir B-spline eğrisi.	22
Şekil 3.3.	Mertebesi 4 ve 2 segmentten oluşan B-spline eğrileri	22
Şekil 3.4.	Bir B-Spline yüzeyi ve yüzeyi oluşturan kontrol noktası ağı	26
Şekil 3.5.	STL formatında üçgen sayısının artırılması	30
Şekil 3.6.	<i>TT</i> temelli takım yolu oluşturma teknikleri	32
Şekil 3.7.	İzo-parametrik takım yolu tekniği için örnek yüzey	34
Şekil 3.8.	Kartezyen takım yolu tekniğinde <i>TT</i> verilerinin hesaplanması	37
Şekil 3.9.	APT tipi takım yolu oluşturma tekniği	43
Şekil.3.10.	C-uzayı şematik gösterimi	44
Şekil 3.11.	Üç eksen frezeleme işlemi için C-Uzayı	45
Şekil 3.12.	Ters takım ofsetinin oluşturulması	46
Şekil 3.13.	<i>TK</i> yüzeyinde yüzey yaması ve uç ofsetleme	47
Şekil 3.14.	Parametrik yüzeyin üçgenleştirilmesi ve ofsetlenmesi	48
Şekil 3.15.	Dışbükey ve içbükey yüzeylerde ofsetleme	49
Şekil 3.16.	3-5 Eksen tezgah tipleri	53
Şekil 3.17.	Beş eksen (eğimli-döner) tezgâhta oluşan koordinat çerçeveleri	54
Şekil 3.18.	Normal vektörü bileşenleri a, c açılarının tespiti.	56
Şekil 3.19.	Tabla pozisyonlamada alternatif oryantasyonlar	58
Şekil 3.20.	Parametrik alanda yüzey ilişkisi ve 3-5 eksen frezeleme	60
Şekil 3.21.	Yüzey üçgenleştirme ve normal vektörü analizi.	63
Şekil 3.22.	Kesici düzlem ile üçgenlerin kesişmesi ile köşelerin oluşması	64
Şekil 3.23.	Kesici takım merkezinin ofsetlenmesi	65
Şekil 3.24.	Beş eksende oluşan dalma ve çarpma durumları	67
Şekil 3.25.	Eğim ve dönme açısı	68
Şekil 3.26.	Yan yatırma ve dönme açısının etkileri	69
Şekil 3.27.	Takım pozisyonlama için kurulan C-uzayı	71
Şekil 3.28.	Kesici oryantasyon haritasında bölgelerin gösterimi	73
Şekil 3.29.	Tasarım yüzeyinin kesici düzlemlerle kesilmesi	74

Şekil 3.30.	Küresel, düz, köşeleri yuvarlatılmış takım için kesici profilleri	75
Şekil 3.31.	Yüzey normallerinin ofsetlenmesi	76
Şekil 3.32.	Dalma analizi için test noktası deseni	76
Şekil 3.33.	İdeal - kritik takım pozisyonu ve yerel dalma	78
Şekil 3.34.	Takım gerisinin dalması ve eliminasyonu	80
Şekil 3.35.	Sınır kutucuğu ve üçgenleştirilmiş yüzey seti	81
Şekil 3.36.	Takım oryantasyonunun değiştirilmesi ile dalmanın engellenmesi	82
Şekil 3.37.	Eğim açısı (α)	83
Şekil 3.38.	Radyal yönde takım dalması	84
Şekil 3.39.	Eksenel yönde dalma	85
Şekil 3.40.	Eğim açısının değişimine bağlı anlık dalma miktarının değişimi	86
Şekil 3.41.	Yerel dalmanın eliminasyonu	87
Şekil 3.42.	Dalma eliminasyon yönteminin algoritması	87
Şekil 3.43.	Yuvarlanan küre metodu	88
Şekil 3.44.	İçbükey ve dışbükey bölgede köşeleri yuvarlatılmış küre	89
Şekil 3.45.	Yüzey eğriliğine göre değişen içbükeylik	90
Şekil 3.46.	Gölge ızgara noktaları ve pseudo eğrilik radyüsünün oluşumu	91
Şekil 3.47.	Konveks yüzeyde takım alt boşluğu	92
Şekil 3.48.	Piksel uzayının grafik yardımıyla öklit uzayına aktarılması	93
Şekil 3.49.	Yay kesiştirme ve ızgara gölge noktasının oluşumu	95
Şekil 3.50.	Takım temas noktasında takım merkez düzlemi ve takım tabanı	96
Şekil 3.51.	Siyah bölgede kesişme durumunda oluşan eğim açısı	96
Şekil 3.52.	Ortalama yüzey normali ve projeksiyon düzlemi	98
Şekil 3.53.	Projeksiyon düzleminde takım yolunun oluşumu	99
Şekil 3.54.	Birinci ve ikinci takım temas noktalarının oluşumu	100
Şekil 3.55.	İki noktadan teğetsel temas sağlanan takım pozisyonu	101
Şekil 3.56.	Eksenel ve yanal ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	103
Şekil 3.57.	Beş eksen frezelemede oluşan işleme hataları	105
Şekil 3.58.	Yüzey uyumlu harmonik haritalama adımları	106
Şekil 3.59.	Sınır noktalarının birim diske aktarılması.	107
Şekil 3.60.	Takım yolu aralığı haritası.	107
Şekil 3.61.	Lineer ve lineer olmayan takım yolu spiralleri	108

Şekil 3.62.	Üçgenleştirme ve takım yolu örnekleri	108
Şekil 3.63.	Genel yüzey denklemi işlem akış diyagramı	112
Şekil 3.64.	Altı yamadan oluşan 4. mertebe bir yüzeye ait parametrik alan	113
Şekil 3.65.	Temel fonksiyon hesabı işlem akış diyagramı	114
Şekil 3.66.	Yüzey denklemi hesaplama işlem akış diyagramı	115
Şekil 3.67.	4x4 mertebeden bir yüzey ve yüzeye ait nokta bulutu	116
Şekil 3.68.	Parametrik artırımların yüzey ve parametrik alanda gösterimi	117
Şekil 3.69.	İçbükey-dışbükey eğri üzerinde oluşan kirişsel hatanın oluşumu	118
Şekil 3.70.	Sabit parametre artırımı, Dinamik parametre artırımı	119
Şekil 3.71.	Üç noktadan geçen eğrilik ve hata miktarının hesaplanması	119
Şekil 3.72.	Kirişsel hata hesaplama işlem akış diyagramı	121
Şekil 3.73.	Eğriliğe bağlı adım yolu uzunluğunun eğri üzerinde gösterimi	122
Şekil 3.74.	Yanal kayma miktarının kalıntı talaş yüksekliğine etkisi	122
Şekil 3.75.	Yüzey normallerinin hesaplanması için noktalar ve kirişler	124
Şekil 3.76.	Yüzey birim normal vektörü ve bileşenleri	125
Şekil 3.77.	Yüzey normali takım eksenine paralel konumda iken TT ve TK noktalarının gösterimi	127
Şekil 3.78.	Yüzey normalinin takım eksenine paralel olmadığı durumda TT ve TK noktalarının gösterimi	128
Şekil 3.79.	Dönme (C) ve eğim (A) açılarının oluşumu	130
Şekil 3.80.	Beş eksen eğimli-döner tablalı tezgâhta eksen takımlarının şematik gösterimi	131
Şekil 3.81.	İlerleme ve yanal kayma yönünde oluşan eğrilikler.	135
Şekil 3.82.	Yanal kayma, maksimum ve minimum kalıntı talaş menüsü	135
Şekil 3.83.	Yüzey analizi işlem akış diyagramı	136
Şekil 3.84.	Minimum eğrilik üzerinde küresel takım ve yerel dalma	137
Şekil 3.85.	Fark açısının efektif kesici yarıçapına etkisi	138
Şekil 3.86.	Minimum eğrilik yarıçapı ve efektif kesici radyüsü	138
Şekil 3.87.	Eğim açısı ve dalma eliminasyonu	140
Şekil 3.88.	İçbükey noktada geri dalma oluşumu	141
Şekil 3.89.	Takım gölge alanında geri dalma taraması	142
Şekil 3.90.	Orta noktada dalmanın oluşumu ve eliminasyonu	143

Şekil 3.91.	Geri dalma analizi işlem akış diyagramı	144
Şekil 3.92.	Yanal kayma hesaplayan işlem akış diyagramı	146
Şekil 3.93.	Zig-Zag tek yön takım yolu şablonu ve parametrik alan ifadesi	147
Şekil 3.94.	Zig-zag tek yön takım yolu işlem akış diyagramı	148
Şekil 3.95.	Beş eksen simulasyon görüntü örnekleri	148
Şekil 3.96.	Zig-Zag çift yön takım yolu	150
Şekil 3.97.	Zig-zag çift yön takım yolu işlem akış diyagramı	151
Şekil 3.98.	Zig-Zag çift yön noktasal simulasyon	152
Şekil 3.99.	Paralel spiral takım yolu oluşturma stratejisi	153
Şekil 3.100.	Paralel spiral takım yolu işlem akış diyagramı	154
Şekil 3.101.	Paralel spiral takım yolu takım yolu simulasyonu	155
Şekil 3.102.	Eşit kalıntı talaş metodunun parametrik alan ve fiziksel yüzeyde ifadesi	157
Şekil 3.103.	Eşit kalıntı talaş stratejisi işlem akış diyagramı	159
Şekil 3.104.	Eş kalıntı talaş takım yolu stratejisinin parametrik alan ifadesi	160
Şekil 3.105.	Eş kalıntı talaş takım yolu stratejisinin parametrik alan ifadesi ve taramada kullanılan semboller	161
Şekil 3.106.	Tarama işleminin fiziksel alanda ifadesi ($i=1$)	163
Şekil 3.107.	Düzeltilmiş eğriliğe göre yanal adımın hesaplanması ($i=1$)	163
Şekil 3.108.	Tarama işleminin fiziksel alanda ifadesi ($i=2$)	165
Şekil 3.109.	Eşit kalıntı talaş stratejisi II işlem akış diyagramı	166
Şekil 3.110.	Eşit kalıntı talaş prosedürüne ait takım yolu simulasyonu XY düzlemi ve izometrik görüntüsü	167
Şekil 3.111.	Üç ve beş eksen eğri işleme	168
Şekil 3.112.	İki boyutlu tasarımın parametrik alana taşınması	170
Şekil 3.113.	İki boyutlu ögenin eğrisel yüzeye yansıtılması.	171
Şekil 3.114.	Yansıtılmış eğri için oluşturulan takım yolu örneği	172
Şekil 3.115.	Yansıtılmış eğriler için oluşturulan takım yolu simülasyonu	173
Şekil 3.116.	Yansıtılmış eğriler için takım yolu simülasyonu	174
Şekil 4.1	B-Spline yüzey örneği	175
Şekil 4.2.	Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması	176
Şekil 4.3.	B-Spline yüzey örneği	176

Şekil 4.4.	Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması	177
Şekil 4.5.	B-Spline yüzey örneği	177
Şekil 4.6.	Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması	178
Şekil 4.7.	B-Spline yüzey örneği	179
Şekil 4.8.	Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması	180
Şekil 4.9.	B-Spline yüzey örneği	180
Şekil 4.10.	Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması	181
Şekil 4.11.	Takım yolu geometrilerinin karşılaştırılması	182
Şekil 4.12.	Takım yolu geometrilerinin karşılaştırılması	183
Şekil 4.13.	Takım yolu geometrilerinin karşılaştırılması	184
Şekil 4.14.	Takım yolu geometrilerinin karşılaştırılması	185

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1 STL dosya formatı	30
Tablo 3.2. B-Spline yüzeyinin Step dosyasında kayıt formatı	111
Tablo 3.3. Hesaplanan yanıl artış parametrik değerlerine ait örnek veri tablosu	158
Tablo 3.4. DXF dosyasında lineer bir ögenin kodlanması	169
Tablo 4.1. Karşılaştırma I için takım yolu uzunlukları	175
Tablo 4.2. Karşılaştırma II için takım yolu uzunlukları	176
Tablo 4.3. Karşılaştırma III için takım yolu uzunlukları	177
Tablo 4.4. Küresel ve düz takımların karşılaştırması takım yolu uzunlukları	179
Tablo 4.5. Küresel ve düz takımların karşılaştırması takım yolu uzunlukları	180

SİMGELER

u	Parametrik alan eksen
v	Parametrik alan eksen
$\Delta u, \Delta v$	Parametrik artırım miktarı
ρ	Eğrilik yarıçapı
λ	ilerleme adımı
ω	Yanal adım
ε	Kirişsel hata miktarı
α	Oryantasyon eğim açısı
β	Oryantasyon dönme açısı
κ	Eğrilik
a	Takım eksen birim vektörü
n	Birim normal vektörü
f	Birim ilerleme vektörü
t	Birim teğet vektör
r	Takım yarıçapı
S	Sturz açısı
Cr	Döner tabla koordinat çerçevesi
Cwp	İş parçası koordinat çerçevesi
Ctr	Eğimli döner tabla koordinat çerçevesi
Ca	Eğimli tabla koordinat çerçevesi
Cp	Pivot koordinat çerçevesi
TT	Takım temas noktası
TK	Takım konum noktası
A	Tabla eğim açısı
B	Kesici takım eğim açısı
C	Tabla Dönme açısı
φ	Tarama açısı

1. GİRİŞ

Otomotiv, gemi, havacılık, elektronik, beyaz eşya ve mobilya gibi endüstriyel ürünlerde müşteri ihtiyaçlarını karşılamada en önemli faktörlerden biriside estetik görünümdür. Bu yüzden ürünler tasarlanırken çalışma fonksiyonlarını yerine getirmeli aynı zamanda görünüş olarak estetik olmalıdır. Bu yüzden tasarım yapılırken serbest şekilli yüzeylerden faydalanılır. Bu serbest şekilli yüzeyler;

- Aerodinamik parçalar: uçak kanat ve gövdesi, otomobil tasarımı, kompresör kanatçıkları, gemi burun (tiriz) yüzeyleri vs.
- Optik alanda: Far reflektörleri, monitörler, radar-uydu antenleri vs.
- Medikal alanda: Protez parçaları
- İmalat alanında: Otomotiv parçaları, kalıp yüzeyleri

şeklinde sayılabilir.

Bilgisayar destekli tasarım (BDT) alanında her geçen gün yeni serbest şekilli modelleme teknikleri geliştirilmektedir. Katı modellemenin yüzey modelleme ile hibrit şekilde kullanılmasıyla oldukça estetik tasarımlar başarıyla uygulanabilmektedir. Özellikle oyuncak, gıda-kimyevi ambalajlama alanında enjeksiyon ve şişirme tekniği ile imal edilen plastik parçaların tasarımı konusunda oldukça ilerlemeler kaydedilmiştir.

Bu tasarımlar içinde en karmaşık olanları şüphesiz ki serbest şekilli eğrisel çizgi ve yüzeylerin matematiksel ifadesinin çıkarılmasıdır. Serbest şekilli eğri ve yüzeylerin matematiksel olarak ifadesi, ilk olarak Schorenberg tarafından 1946 da öne sürülmüş, bilgisayar destekli tasarım alanında ise ilk uygulaması Gordon ve Riesenfeld tarafından 1974 yılında yapılmıştır. Geometrik modelleme üzerinde yapılan çalışmaların sonucunda, nesnelere matematiksel olarak ifade edilmiş ve grafiksel olarak bilgisayar ekranında gösterilebilir hale gelmiştir. Serbest sekili yüzey

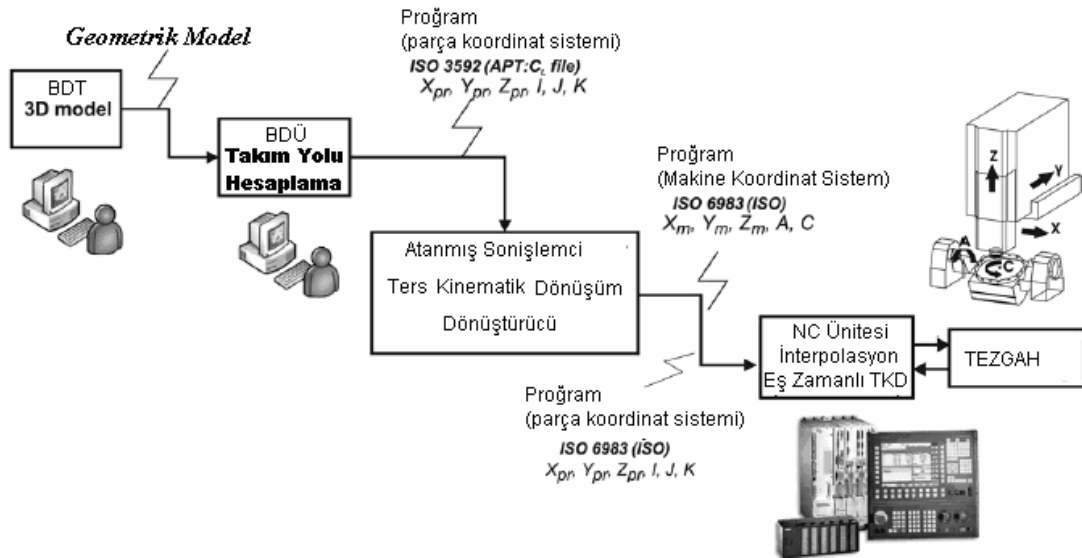
modelleme için birçok teknik geliştirilmiştir. En çok bilinen teknikler Coons, Ferguson ve Bezier yamalarıdır. Daha sonra bu tekniklere paralel olarak, B-spline yüzeyine ait temel fonksiyonlarının nümerik hesaplama açısından en uygun matematiksel ifadesini Cox (1972) ve De Boor (1972) vermiştir. B-Spline yüzeyini esas alarak NURBS (Non Uniform Rasyonel B-Splines) yüzeyleri geliştirilmiş ve BDT alanında çok sık kullanılmaya başlanmıştır.

İmal edilecek bir ürünün tasarımı kadar işlenmesi de büyük önem arz etmektedir. Bu noktada Bilgisayar Destekli Üretim (BDÜ) sürecinin çok iyi planlanması ve yürütülmesi gerekir. Bilgisayar destekli üretimin en temel tanımı; tasarımdan imalata kadar geçen süreçte bilgisayarın görsellik, hız, hafıza ve hızlı işlem yapabilme gibi yeteneklerinin kullanılması şeklinde ifade edilebilir (Valentino 2000). Bilgisayar destekli üretim tasarımıyla başlar ve talaş kaldırma işlemi ile son bulur. Bu süreçte her bir adımın en etkin bir şekilde planlanması ve yürütülmesi gerekmektedir. Bu aşamaların sonuncusu yani talaş kaldırma safhasının da önemi çok büyüktür. Uygun tezgâh, kesici takım, işlem planlaması ve uygun takım yolu seçimi bu sürecin en önemli aşamalarıdır.

Bilgisayar destekli üretimin ilk adımları, 1950'li yıllarda savaş uçağı parçalarının üretimi için MIT tarafından atılmış ve bu güne dek adeta bir devrim yaşanmıştır. Bu değişimin temelinde bilgisayar, elektrik-elektronik malzeme ve mekanik sistemlerde yaşanan yenilikler yatmaktadır. Nümerik kontrollü (NC) takım tezgâhları yerini bilgisayarlı nümerik kontrol (CNC) tezgâhlarına bırakmıştır. Her geçen gün daha hızlı matematiksel işlem yapabilen, hızlı ve hassas eksen hareketlerine sahip ve aksenal hareket kabiliyeti gelişen tezgâhlar üretilmektedir. Yüksek hız çelikleri yerini daha yüksek hızlarda kesme yapabilen sert metallere, elmaslara ve bor nitrür takımlara bırakmıştır. BDT programlarıyla tasarlanan ürüne ait takım yolu güvenli bir şekilde oluşturulmakta görsel olarak simülasyon yapıldıktan sonra tezgâha uygun kodlara dönüştürülerek CNC tezgâhlarda işlenmektedir.

Bahsedilen bu gelişmelere paralel olarak bilgisayar destekli üretim alanında son yıllarda odaklanılan konu ise, klasik 3 eksen frezelemenin bir kenara bırakılarak daha hızlı ve etkin bir talaş kaldırma sağlayan 5 eksen talaş kaldırma teknolojisidir. Bu teknik 3 eksen talaş kaldırmaya göre oldukça yüksek bir talaş kaldırma etkinliği sağlamaktadır. Gerek işleme zamanı gerekse işlenen parçanın yüzey kalitesi noktasında çok yüksek verimlilik artışı sağlamaktadır.

Beş eksen talaş kaldırma teknolojisi gerek tezgâh ve gerekse takım yolu oluşturma noktasında 3 eksene göre oldukça farklılıklar göstermektedir. Şekil 1.1’de bilgisayar destekli üretimin 5 eksen işleme için özelleşmiş şematik süreci yer almaktadır (Sylvain 2008) .



Şekil 1.1. Bilgisayar destekli üretim sürecinin şematik gösterimi

Beş eksen işlemede öncelikle, BDT ortamında tasarlanan parça, BDÜ programında işlem planlamasına ve işleme detaylarına göre takım yolu oluşturulur. Bu takım yolunun tezgâh üzerinde işlenebilmesi için tezgâhın kinematik yapısına uygun dönüşüm yapılması gerekmektedir. Bu işlem harici olarak yapılabileceği gibi eş zamanlı olarak da ters kinematik dönüşümlerle nihai program elde edilebilmektedir.

Tasarımdan tezgâhın yapmış olduğu nihai harekete kadar geçen tüm süreç üzerinde her geçen gün yeni çalışmalar yapılmakta ve bu tezgâhların daha etkin şekilde kullanılabilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmaların büyük bir kısmı bu tezgâhlara özel takım yolu oluşturma tekniklerinin araştırılması konusundadır. Fakat bu noktada gerek akademik gerekse ticari alanda yapılan çalışmalar henüz tam anlamıyla yeterli değildir. Özellikle akademik alanda yapılan birçok çalışma endüstriyel uygulamalara aktarılması oldukça güç ve sınırlı çalışmalardır. Güvenli ve etkin bir talaş kaldırma için gerekli takım yolu oluşturma oldukça karmaşık bir durumdur. Çünkü takım 3 lineer ve 2 dönel ekseninde hareket kabiliyetine sahiptir. Takım konumlama ve dönel hareket oryantasyonlarının, kesicinin en uygun şekilde parçaya temas edebilmesi için kusursuz yapılması gerekir. Hatalı yapılan konumlama ve oryantasyon, parçada dalma ve çarpışma olarak adlandırılan ve simülasyon esnasında gözden kaçması durumunda parça, takım ve tezgah üzerinde oldukça büyük hasarlar açabilen kazalara sebep olmaktadır.

Beş eksen işlemede bu oryantasyonun en optimum ve doğru şekilde yapılması talaş kaldırmayı oldukça etkin hale getirmektedir. Düz uçlu bir freze takımına bir miktar eğim verdiğimiz zaman talaş kaldıran kesici profili değişmektedir. Değişen bu kesici profilinin yüzey eğriliğine uydurulabilmesiyle takım yolu adımlarının sayısı da azaltılabilmektedir. Bu işlem bize yüzey üzerinde iki takım yolu arasında oluşan kalıntı talaş miktarının kontrolü noktasında büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu noktada etkin bir takım yolu oluşturma stratejisinin önemi ortaya çıkmaktadır. En kısa işleme zamanı ile en düşük pürüzlülükte parçayı işleyecek etkin ve güvenli bir takım yolu stratejisinin önemi bu tezgâhların verimli kullanılabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı

Günümüz küresel rekabet koşullarında üretim maliyetlerinin düşürülmesi büyük önem arz etmektedir. Özellikle kalıp sektörünün vazgeçilmez tercihi haline gelen beş eksen frezeleme tekniğinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi ancak etkin ve güvenli bir takım yolu oluşturma stratejisine bağlıdır. Bu alanda ticari yazılımlarda tam anlamıyla etkin bir takım yolu oluşturma noktasında eksikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, etkin bir beş eksen işleme için yeni takım yolu stratejilerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu alanda hali hazırda bulunan tekniklerin ise daha etkin şekilde kullanılabilmesi için bazı eklentilerin geliştirilmesi de amaçlanmıştır. Aynı zamanda talaş kaldırma işleminin etkin bir şekilde yapılabilmesi için uygun kesici takım seçimi yapabilen bir sistemin geliştirilmesi de amaçlar arasındadır. Son olarak geliştirilen bu stratejilerin işleme zamanı açısından kıyaslanması ve parçanın en uygun takım yolu stratejisiyle ve en uygun kesici takımla işlenebilmesi için gerekli prosedürlerin hazırlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla gerekli prosedürleri ve algoritmaları uygulayacak Windows tabanlı bir yazılım ara yüzünün oluşturulması da hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde serbest şekilli yüzeylerin hassas olarak işlenmesi ile ilgili yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu bölümde, hazırlanan tez çalışmasına ışık tutan çalışmalarla ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

Marshall ve Griffith (1992) yaptıkları çalışmalarda, freze tezgâhları için yeni bir takım yolu oluşturma algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirilen teknik, yüzeyler, unsurlar ya da takım tipleri ile sınırlı değildir. Çalışmalarında serbest şekilli yüzeylerden oluşan model öncelikle çokgenleştirme tekniği ile üçgen yüzey setlerine (triangulated surface set) bölünerek sayısallaştırılmıştır. Daha sonra bu yüzey setleri üzerine zig zag takım yolu şablonları uygulayarak kaba ve bitirme operasyonları için takım yolu oluşturmuşlardır. Yüzey setleri yüzeyi tamamen doğru bir şekilde ifade etmesinden ve takım yolu bu yüzey setlerinin üzerinde gerçekleştiğinden dalma olayı ortadan kalkmıştır.

Lee ve ark. (1992) derin kalıp boşluklarının işlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada derin kalıp boşlukları, NURBS ile modellenmiş ve yukarıdan aşağıya doğru kesme düzlemleri ile dilimlenerek kesme tabakaları oluşturulmuştur. Her bir kesme tabakasında bir veya birkaç ada oluşması durumunda, takım yolunun oluşturulmasında alternatif algoritmalar kurmuşlardır. Her bir tabakada kesici takım bilgileri ve geometrik kısıtlar girilerek bir takım seçimi algoritması geliştirmişlerdir. Kesme düzlemleri ile oluşan adaların dış ve iç sınırları belirlenerek takım bu sınırlar arasında girilen belli adımlarda dolaştırılmıştır. TT temelli bir takım yolu oluşturma stratejisi kullanarak parametrik yüzeyin u yönünde ilerleme yaparken eğrisel yüzeylere uydurulan kirişlerin hata miktarları analiz edilmiş, v yönündeki yanal ilerleme oluşturulurken ise kesme kenar yükseltisi analizleri yapılmıştır. Kütük malzeme üzerine önce kaba ardından bitirme işlemi için gerekli takım yolu oluşturup, kodları tezgah üzerinde örnek bir parça ile test etmişlerdir.

Rao ve ark. (1997) yapmış olduğu çalışmada 5 eksen işleme yapılırken, takımın yaptığı yanal ilerlemeye ve takım oryantasyonuna bağlı değişen kesici geometrisine bağlı oluşacak kalıntı talaş yüksekliklerinin azaltılması için bir metot geliştirmişlerdir. Bu metotta yüzey eğriliği ve kesici takım profili eğriliğinin birbirine eşleştirilmesi hakkında nümerik bir simulasyon çalışması geliştirilmiştir. Bu metot, tasarım yüzeyinin her hangi bir noktasından bir düzlem geçirilmesi ve düzlemin o noktasında maksimum κ_1 ve minimum κ_2 eğriliklerin hesabını içermektedir. Bulunan yüzey eğriliği ve takıma verilen oryantasyonla değişen efektif takım radyüsü de birbirine eşleştirilmekte ve takım konumu sağlandıktan sonra takım etrafında dalma analizi yapılmaktadır. Efektif kesici takım radyüsü yüzey eğriliğine uydurulması kalıntı talaş yüksekliği azaltarak yüzey pürüzlülüğünü oldukça düşürmektedir. Yazarlar oluşturdukları metodu deneysel olarak da test etmişler ve eğrilik eşleştirmede kesme kenar yükseltilerinin oldukça düştüğünü, içbükey ve dışbükey yüzeylerde işleme yaparak ispatlamışlardır.

Choi ve Kim (1997) yaptıkları çalışmada kalıp boşluklarının işlenmesinde gerekli olan takım yollarının kesme simülasyonu ile elde edilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında öncelikle bir kesme derinliği değeri ile yatay düzlemlerde bir arakesit oluşturmuş ve kalıp boşluğunun sınır eğrilerini elde etmişlerdir. Bu eğrileri Z-haritaları kullanarak modellemişlerdir. Dış sınır eğrilerinden içe doğru belirlenen yanal adımlar vasıtasıyla dış sınırdan içe doğru ofset takım yolları elde etmişlerdir. Ara kesitin üzerindeki *TT* noktaları *TK* noktalarına aktararak takım konumlarını elde etmişlerdir. Bu işlem için C-uzayı tekniğinde kullanılan ters takım ofseti tekniği kullanılmıştır. Z-haritası ile elde edilen koordinatlar 2 boyutlu bir düzlem üzerinde piksel haritasına (*P-map*) çevrilmiş ve işlenen ve işlenmeyen yüzeylere ait piksel işaretlenerek takım yolu sınırları bu şekilde elde edilmiştir. Aynı zamanda kesici takımın talaş yüküne bağlı kesme kuvveti analizi yapılmış ve ilerleme hızı bu yüke bağlı olarak değiştirilmiştir.

Lo (1999) yaptığı çalışmada düz parmak frezelere özel, 5 eksen takım yolu oluşturma stratejisi geliştirmiştir. Geliştirdiği yöntemde, iki takım yolu arasında oluşan kalıntı talaş yüksekliğini parça yüzeyince sabitleme amacıyla yanal kayma miktarını optimize etmiştir. Adaptif eğimli eş kalıntı talaş metot adını verdiği

teknikte, takıma verdiği eğim açısını adaptif bir şekilde hesap ederek yanal kayma miktarını artırmıştır. Böylelikle takım yolu sayısı azalmış ve işleme süresi düşmüştür. Yaptığı çalışmada takımın taban yüzeyinde oluşabilecek dalma durumlarını da analiz eden bir prosedür geliştirmiştir. Yüzeyin TT noktasındaki eğriliğini takım oryantasyonuna bağlı değişen efektif kesici profili eğriliğe uydurarak etkili bir frezeleme için takım yolu algoritmaları geliştirmiştir. Geliştirdiği algoritma içbükey yüzeyler ve düz uçlu parmak frezeler ile sınırlıdır.

Yu ve Xiaowei. (1999), yaptıkları çalışmada eğrilik eşleştirmeye bağlı beş eksen takım yolu oluşturmuşlardır. Takım her TT noktasında oryantasyon yaparak talaş kaldırma oranını artırmakta ve dalma durumlarını da analiz etmektedir. İzo-parametrik eğriler kullanarak kalıntı talaş yüksekliğini analiz etmişlerdir. Kalıntı talaş yüksekliğini sabitlemek ve yerel dalmayı engellemek için takım oryantasyonunu optimize etmişlerdir.

Warkentin ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada 5 eksen frezelemede çok nokta temashlı bir takım yolu oluşturma metodu geliştirmişlerdir. Çok noktalı takım teması tekniği, eğrisel yüzeylerin bitirme işlemlerinde kullanılan bir tekniktir. Takım parça yüzeyine birden fazla noktada temas etmektedir. Bu tekniğin en büyük dezavantajı nümerik hesap yapmanın çok zaman almasıdır. Bu yapılan çalışmada etkili bir algoritma geliştirilmiştir. Bu metodun temelinde takım altındaki yüzeyin eğrilik karakteristikleri göz önüne alınmıştır. Bu algoritma basit yüzeylerde rahatlıkla hesap yapabilmekte, endüstriyel uygulamalarda hata vermektedir. Bu metod aynı zamanda sadece açık içbükey yüzeylere uygulanabilmektedir. Metodun uygulanabildiği yüzeylerde işleme süresinin oldukça kısaldığı, yüzey pürüzlülüğünün oldukça düştüğü ve talaş kaldırma oranının tek noktadan pozisyonlama stratejisine göre arttığı, yapılan deneylerden anlaşılmıştır.

Hong (2001) yapmış oldukları çalışmada, karmaşık geometrili ve çok uzun takım yolu verisi içeren parçaların G1-NC kodlarını NURBS-NC kodlarına dönüştürerek, CNC üzerindeki bir yazılım vasıtasıyla takım yollarına dönüştürme ile işlenmesi hakkında bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada NC takım yollarının çok küçük lineer adımlardan oluştuğu ve dolayısı ile çok yüksek sayıda takım yolu verisi ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Özellikle yüksek hızda işlemede

gerekli olan hızlı veri transferi ve verilerin step motor hareketlerine dönüştürme hızı düşük olması durumunda makine şoku veya titreşim oluşturabileceğine vurgu yapmışlardır. Gerçek kesme hızının düşeceği, işleme zamanının artacağı ve polisaj gibi parlatma ihtiyaçlarının doğacağından bahsetmişlerdir. Takım yolu sayısını artırarak işleme zamanı ve yüzey kalitesi arasında bir tercih yapılması gerektiğine değinmişlerdir. Yaptıkları çalışmada G1-NC veri blokları ile düzenli şekilde NURBS-NC kodlarına çevrilerek, çok kısa verilerle takım yolu verisini tezgâha aktarıp parçayı işlemişlerdir. Aynı zamanda ilerleme hızını parça geometrisinin eğriliğine göre ayarlayıp işleme zamanını optimize etmişlerdir. Sonuç olarak 110.000 satırlık bir programı, 2234 bloktan oluşan bir NURBS veri tabanında saklamışlardır. Aynı zamanda eğrisel yüzeylerde oluşturulan kırıslara bağlı yüzey hatalarını G1-NC kodlarına nazaran daha az, işleme zamanının ise daha düşük olduğunu deneysel olarak ortaya koymuşlardır.

Jensen ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada 5 eksen bitirme operasyonları için eğrilik eşleştirmeli bir takım yolu oluşturma ve takım seçimi algoritması geliştirmişlerdir. Takım seçimi algoritmasında ana hedef, işleme hatalarını minimize etmek, aynı zamanda talaş kaldırma oranını maksimize etmektedir. Çalışmalarında altı düz köşeleri yuvarlatılmış takımlardan oluşan bir takım kütüphanesi oluşturmuş ve takım seçimini bu standart takım kütüphanesinden yapmışlardır. Takım değişkenleri takım çapı, köşe radyüsü ve takım boyudur. Serbest şekilli yüzey üzerinde değişen eğrilik yarıçapı ile takımın oryantasyonuna bağlı değişen süpürme gölgesi ve takım efektif eğrilik yarıçapı arasında bir eşleştirme yaparak takım seçimi geliştirmişlerdir. Aynı zamanda takım ve parça eğrilik uyumsuzluğunu kontrol ederek yerel dalma ve global çarpma analizlerini gerçekleştiren protokollerde oluşturmuşlardır. Bu çalışmada yüzey tanımlı çokgenleştirme (üçgenleştirme) tekniği ile yapılmış olup çarpışma analizleri yüzey ile takım arasındaki minimum uzaklık mesafesinin bulunmasıyla algılanmaktadır. Takım çevresinde oluşturulan sınır kutucuğu içinde yer alan tüm üçgen yüzey setleri arasında dalma kontrol edilmiş ve C-uzayı tekniğinde kullanılan kesici oryantasyon haritası tekniği ile uygun bölge taraması yapılmıştır. Bu uygun oryantasyon bölgesinde, eğrilik ve takım analizi yapılarak uygun takım oryantasyonu ve takım seçimi yapılmıştır. Bu işlemler için iki

farklı algoritma geliştirmişlerdir. Bunlardan ilki yerel ve global dalmanın tespiti ve düzeltilmesi, diğeri ise en büyük çaplı ve radyüslü ve aynı zamanda kısa boylu takımından başlayarak optimal takım seçiminin yapılması içindir.

Ko ve ark. (2001) yaptıkları deneysel çalışmada, çok eksenli frezelemede eğim açısının ve frezeleme yönünün etkilerini incelemişlerdir. Bu deney sonuçları takım yolu oluşturma algoritmalarında eğim açısının optimizasyonu için büyük ışık tutmaktadır. Takım yolu oluşturulurken uygun oryantasyon bölgesinde dalma olmadan işleme yapılabilir. Bu uygun bölgeden oryantasyon seçimi yapılırken optimizasyon kriterlerini göz önüne almak gerekir. Bu kriterler işleme zamanı, yüzey pürüzlülüğü, işleme hataları, kesme kuvvetleri vb. olarak sıralanabilir. Ko ve ark yaptıkları çalışmada eğim açısını belli aralıklarda değiştirerek (0,10,15,20,30,40,45°) aynı ve zıt yönlü frezeleme işlemleri için, talaş kesiti, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması gibi değerleri test etmişlerdir. Sonuç olarak en düşük yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması 15° eğim açısına sahip işleme ile, en düşük kesme kuvvetlerini de 10° eğim açısına sahip işleme ile elde edilmiştir. Frezeleme yönteminde ise aşağı ve aynı yönlü frezeleme işleminde en az aşınma miktarını gözlemlemişlerdir. Böylelikle 5 eksen frezeleme işleminde 15° sabit eğim açısı korunarak aynı yönlü frezeleme ve parçanın eğimine göre yukarıdan aşağı kesme yöntemi uygulandığı takdirde aşınma ve yüzey pürüzlülüğü optimize edilmiştir. Ko ve ark. sonuç olarak CAM sistemlerinde takım yolu oluşturma esnasında eğim açısı bu değerler göz önüne alınarak yapıldığı takdirde optimal sonuç elde edilebilir sonucuna varmışlardır.

Mansour (2002) IGES veri tabanından aldığı geometrik bilgilerle bir takım yolu oluşturma algoritması geliştirerek simule etmiştir. Parametrik yüzey verisi olan IGES-114 tipi yüzey yapısından düz, küresel ve köşeleri yuvarlatılmış üç tip freze ile takım yolu oluşturmuştur. Kurduğu algoritma aynı zamanda kesici takım seçimi, işleme yönünün seçimi hakkında da işlem yapmaktadır. Yüzey üzerinde takım temas “TT” noktaları ve bu noktalara bağlı takım konum “TK” verileri elde ederek elde ettiği bu verileri NC kodlarına çevirmiş ve grafik destekli olarak geliştirdiği yazılım (C++ ve OpenGL) ile simule etmiştir.

Jun ve ark. (2003) yaptıkları araştırmada, eğrisel yüzeylerin 5 eksenli frezelenmesinde takıma verilen oryantasyon açılarının C-uzayı yöntemi vasıtasıyla belirlenmesini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada eğrisel yüzeyler çokgenleştirilmiş yüzey olarak adlandırılan yüzey üçgen setleri ile tanımlanmıştır. Her hangi bir TT noktasında takımın yapabileceği eğime ve dönmeye bağlı oryantasyon açı sınırları tayin edilmiş ve kesici oryantasyon haritası olarak adlandırılan bir harita vasıtasıyla uygun bir şekilde kaydedilmiştir. Bu kesici oryantasyon haritasında takım oryantasyonuna bağlı dalma, çarpma, tezgah limit bölgeleri ve uygun bölgeler hassas bir şekilde tayin edilmiştir. Ayrıca takım oryantasyonuna bağlı değişen efektif kesici profili üzerine bir takım nümerik çözümler geliştirmiş ve profilin, kesme kenar yükseltisi ve yanal ilerleme üzerine etkilerini formülize etmişlerdir. Takım oryantasyonunun optimizasyonunda ise, geliştirdikleri kesici oryantasyon haritasında uygun bölge sınırları içinde en uygun eğim ve dönme açılarını seçmek için geliştirmişlerdir. Burada ki optimizasyon işleminde matematiksel bir optimizasyon işlemi yerine belli kriterleri göz önüne almışlardır. Optimizasyon işlemini tamamen kesici oryantasyon haritası kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Burada talaş kaldırma oranı, kalıntı talaş yüksekliği ve yanal ilerleme gibi değişkenleri göz önüne alarak bir optimizasyon algoritması kurmuşlardır. Aynı zamanda yüksek hızda işleme için gerekli yumuşak dönüşlü takım yolları içinde her bir takım yolu adımında en fazla 5° açı değişikliğine izin veren yüksek hızda işlemeye müsait yumuşatılmış takım yolu oluşturmuşlardır.

Gray ve ark. (2003) tarafından yapılan bu araştırma, daha önce yaptıkları “yüzey eğriliği eşleştirmeli birincil eksen metodu” çalışmasının devamı niteliğindedir. Bu metot diğer yöntemlere nazaran daha uygulanabilir ve hesaplama yöntemi kolay bir yöntemdir. Bu metot bir eğrisel yüzey üzerinde yarıçapı değişken bir kürenin yuvarlatılması ve küre üzerindeki ufak bir bölgenin işlenen yüzey parçalarına yaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Kürenin yarıçapı yüzey eğriliğine göre yüzey üzerinde tanımlanan ızgara noktalarına göre değişmektedir. Her bir ızgara noktası için dışbükey ve içbükey bölgelere özel bir radyüs (pseudo-radyüs) hesaplanmaktadır. Yüzeye göre radyüs hesap edildiği için aynı zamanda dalma eliminasyonu da gerçekleşmekte ikincil bir dalma kontrolü ve düzeltilmesi işlemine

ihtiyaç duymamaktadır. Metot çok sade olup sadece yüzey koordinatları ve yüzey normali hesabı ile yapılabilmektedir.

Paul ve ark. (2004) daha önce yapmış oldukları yuvarlanan küre metodunu, bilgisayar grafiği ile destekleyerek yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yuvarlanan küre metodunda takım pozisyonlarına ait koordinatlar ve yüzey normalleri parametrik yüzey verisinden, elde edilmişti. Bu yöntemde ise bilgisayar grafiği ve parametrik yüzey yerine üçgenleştirilmiş yüzey verileri kullanarak koordinatlar ve küre yarıçapı hesabı yapılmaktadır. Böylelikle çok yamalı yüzey verileri için takım yolu oluşturulabilmektedir. Tasarım yüzeyleri için, yüzey üçgen setleri ile çok hassas ifadeler oluşturulduğu zaman üçgen sayısı oldukça artmaktadır. Bu üçgenlerin veri tabanında kaydedilmesi bilgisayar hafızasının sınırları aşabilmekteydi. Fakat bu günkü bilgisayarlar gerek hız gerekse hafıza kapasitesi olarak böyle işlemleri rahatlıkla kaldırabilmektedir. Grafik destekli bu metotta izlenen yol daha önceki metotla aynıdır. Takım yolu oluşturmak için öncelikle bir ızgara gölge noktaları oluşturulur ve ardından eğrilik radyüsü bulunur. Bu radyüsün ve yüzeyin eğriliğine göre takım pozisyonu elde edilir. Yuvarlanan küre metodunda kullanılan tüm formüller bu metotta da geçerlidir. Bu metotta sadece koordinatların elde edilmiş yöntemi grafik desteklidir. Koordinatlar bilgisayarın modeli kaplama yaparken elde edilen koordinatların kartezyen koordinat sistemine aktarılması temeline dayanmaktadır.

Weihang ve ark. (2004) kalem tipi kesme operasyonları için yeni bir takım yolu oluşturma stratejisi geliştirmiştir. Bu stratejiyi bir 5 eksen tezgahı prototip olarak modelleyerek bir simulasyon modeli geliştirmiş, takım yollarını ve oryantasyona bağlı global çarpışmaları analiz etmişlerdir. Bu stratejide öncelikle kaba ve yarı bitirme işlemlerinden sonra kalem tipi kesme için uygulanacak yüzeyin belirlenmesi gerekmektedir. Bu tekniklerde yine üçgenleştirilmiş yüzey verisi kullanarak, daha önce bitirme işlemleri için geliştirilmiş 'yuvarlanan küreler metodunu' bu stratejiye adapte etmişlerdir. *TT* noktası ve yüzey normaline bağlı takım konumunu gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri takım konumlarını geliştirdikleri 'dixel' simülasyon modeliyle analiz etmişlerdir.

David (2004) yapmış olduğu deneysel çalışmada, 5 eksen frezeleme işlemlerinde oluşan kesme kuvvetlerini analiz etmiştir. Aynı zamanda talaş kesitlerinin hesap edilebilmesi için bir bilgisayar simülasyonu geliştirmiştir. Simülasyon için bilgisayar grafik desteği olan “OPEN GL” dilini kullanmıştır. Aynı zamanda, iş parçası koordinat sisteminde elde edilen takım konum koordinatlarını tezgâha özel ters kinematik fonksiyonlar vasıtasıyla makine koordinat sistemine çeviren dönüşüm matrislerini elde etmiştir. Tezgâhta oluşan lineer ve dairesel ilerleme hızlarını ve anlık ivmelenmeleri formülize etmiştir. 5 eksen frezelemede kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde tezgâh iş miline takılan bir tork ölçme aygıtıyla kesme torkunu ölçmüş aynı zamanda teğetsel ve radyal yönlerdeki kuvvet bileşenlerini de hesap etmiştir. Yaptığı simülasyonda takıma ait talaş kaldırma kenarı uzunluğunu bilgisayar grafiğinde kullanılan derinlik tamponları (Dept buffer) yöntemini kullanarak hacimsel kuvvet modelleri geliştirmiştir.

Paul ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada beş eksen takım yolu oluşturmada takım oryantasyonun tespiti için bir metot geliştirmişlerdir. Her hangi bir takım temas noktası hesaplandığı anda takımın geri kısmında kalan ve takımın gölgesinde bulunan bölgede bir oryantasyon açısı hesaplayan metot geliştirmişlerdir. Yay kesiştirme metodu adı verilen bu metotta takım *TT* noktasında sabit dururken geriye doğru takıma eğim vermeye başlanır. Takımın geri kısmı parça yüzeyine temas ettiği andaki açı değeri o nokta için limit eğim açısıdır. Bu açıdan daha küçük açılar o noktada dalma işlemini ortadan kaldırır. İlk bakışta çok noktalı temasla işleme stratejisine (Warkentin, 2000) benzese de algoritma olarak farklılıklar göstermektedir. Takımın geri kısmında ve tüm gölge alanında belli aralıklarda tarama yaptıklarından kesin ve güvenli bir dalma kontrolü sağlamaktadır. Yazarlar çalışmalarında yüzey üçgen setlerinden oluşan bir yüzey kullanmışlar ve stratejilerini bir kalıp parçası üzerinde test etmişlerdir.

Christope ve Emmanuel (2005) beş eksen işlemede eş kalıntı talaş yüksekliği oluşturan bir strateji geliştirmişlerdir. Stratejilerinde takım merkezini bir ofset yüzey üzerinde hareket ediyormuş gibi düşünerek *TT* noktası hesaplamışlardır. Geliştirdikleri yöntemde, bir birine komşu iki takım yolunu, aralarında eş kalıntı talaş

bırakacak şekilde hesaplamışlardır. Newton iterasyonu kullanarak yakınsama ile sonuç elde etmişlerdir. C- uzayına benzer şekilde önce takımın uç veya köşe radyüsü kadar ofset yüzey elde etmişlerdir. Daha sonra bu yüzeyleri kullanarak takımın oryantasyonuna bağlı değişen miktar kadar daha ofsetleyerek bu yüzey üzerinde takım konum verileri elde etmişlerdir.

Fang ve Ruey (2006) yaptıkları çalışmada bir nokta bulutu verisi ile elde edilen serbest şekilli bir yüzeye ait yüzey normallerinin hesabında “hareketli maske” adını verdikleri bir teknik geliştirmişlerdir. Yüzey normali 5 veya 9 adet yardımcı noktadan oluşan bir maske yardımıyla bulunmaktadır. Herhangi bir noktaya ait yüzey normali hesabı yapılacağı zaman bu noktaya komşu 4 veya 8 adet noktaya bir bezier yüzeyi uydurma işlemi gerçekleştirilmektedir. Daha sonra bu yüzeye ait teğet vektörler hesaplanarak yüzey normali hesaplanmaktadır. Yazarlar kurdukları algoritmaları bir küre üzerinde test ederek deney sonuçları ve fiziksel yüzeye ait normalleri karşılaştırmışlardır. Bu yüzey hesaplama yöntemi nokta bulutu verilerine uygulanabilmekte diğer yüzey verilerine uygulanamamaktadır.

Yu-Wen ve ark. (2006) beş eksen spiral takım yolu oluşturma tekniği ‘yüzey uyumlu haritalama modeli’ adlı bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin temelinde fiziksel yüzeyi bir düzlem üzerinde ve dairesel bir alanda ifade eden bir haritalama tekniği yer almaktadır. Bu düzlemsel bölge üzerinde oluşturulan spirale ait noktalar işlenecek fiziksel yüzey üzerine aktarılarak *TT-TK* noktaları hesaplanabilmektedir. Böylelikle daha sürekli, daha yumuşatılmış ve parça sınırlarına uygun spiral takım yolu oluşturabilmişlerdir. Böylelikle daha uzun takım yolları oluşmakta takımın kesme yapmadığı zaman yaptığı uzaklaşma-yeniden konumlama durumu ortadan kalkmakta yüksek hızda işleme için uygun takım yolları oluşturulabilmektedir. Oluşturdukları metodu 3 basamakta gerçekleştirmişlerdir. Bunlar sırasıyla; yüzey uyumlu üçgenleştirme, yüzey uyumlu haritalama, takım yolu oluşturma olarak sıralanır. Bu teknikte oluşturulan takım yolu sayesinde takım, parça merkezinden başlar ve parça üzerinden hiçbir uzaklaşma hareketi yapmadan dışa doğru genişleyerek geometrisini parça dış sınır geometrisine uydurarak hareketini tamamlar. Bu şekilde yüksek hızda işlemeye uygun takım yolu oluşturulabilmektedir.

Paul ve ark. (2007) bu çalışmalarında daha önce yapmış oldukları yay kesiştirme metodu ile takım yolu oluşturma tekniğini bu yöntem üzerinde geliştirmişler ve 3-11/22 eksen işleme adı altında yeni bir teknik olarak sunmuşlardır. Bu teknikte takım sadece 3 lineer ekseninde hareket ederken talaş kaldırmaktadır. Takım her hangi bir *TK* noktasında oryantasyon yaptıktan sonra bir sonraki *TK* noktasına yine aynı oryantasyon açıları ile talaş kaldırılmaktadır. Talaş kaldırma esnasında eğim ve dönme eksenlerine ait mekanizmalar kilitlenmektedir. Takım bu oryantasyon açısını değiştirmeden belli bölgeyi işlemekte daha sonra başka bir bölgeyi o bölgeye uygun bir oryantasyon açısı ile işlemeye devam etmektedir. Bu şekilde talaş kaldırma işleminin, eş zamanlı 5 eksen hareket ile işlemeye nazaran daha hızlı ve rijit bir kesme sağlayacağını ispatlamışlardır. Bu şekilde yüzey pürüzlülüğü ve titreşimin azaldığı ve ilerleme hızının ise 5 eksen harekete oranla daha artırılabilirdiğini vurgulamışlardır.

Hosseinkhania ve ark. (2007) yapmış oldukları çalışmada dalma eliminasyon metodu adlı yeni bir takım yolu pozisyonlama stratejisi geliştirmiş ve bu metodu başka bir takım yolu stratejisi olan yay kesiştirme metodu ile kıyaslamışlardır. Sonuç olarak kıyaslanan metodla benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Fakat bu yöntem diğer yöntemden 7,5 kat daha fazla hızlıdır. Yaptıkları çalışmada pozisyona bağlı en uygun takım oryantasyonunu hesap edebilen iki gelişmiş algoritma oluşturmuşlardır. Bunlardan ilki dalmayı nicel olarak tanımlamış ve takım oryantasyonunu bir kök bulma algoritması şeklinde ifade etmişlerdir. Diğer yaklaşım ise hızlı bir işlem yapma işlevi olan, etkisiz ızgara noktalarını nümerik olarak tespit etme tekniğidir. Bu tekniklerde takımın parçaya temas ettiği *TT* noktalarında bir yerel koordinat sistemi ve parça yüzeyini ifade eden global bir koordinat sistemi oluşturulmuştur. Parça yüzeyindeki bir noktayı global koordinat sisteminden yerel koordinat sistemine taşımak için kinematik bir transformasyon yapılmıştır. Dalma durumunu ise takıma göre iki durumda incelemiştir. Bunlar takımın yan tarafının yaptığı radyal dalma, taban kısmının yaptığı aksenel dalmadır. Her iki dalma içinde bir kök bulma algoritması kullanarak dalmaları tespit ederek takım oryantasyonunu düzeltmişlerdir. Bu işlemler için MATLAB matematiksel işlemci yazılımı ile bir algoritma geliştirmiş ve 4 farklı yüzey tipinde test etmişlerdir.

Chun ve ark. (2007) oluşturulan *TK* noktalarının tezgâh kinematiğine uygun *NC* kodlarına aktarılabilmesi için bir son işlemci (postprocessor) yazılımı geliştirmişlerdir. Beş eksen tezgâhlarda takım yolu koordinatları yerel bir koordinat sistemine göre hesap edilmektedir. Fakat her tezgâhın eğim ve dönme tipi ve mafsal uzunlukları farklılık gösterdiğinden kinematik yapı farklılık gösterir. Örneğin eğim açısı bazı tezgâhlarda tabladan bazı tezgâhlarda ise takımdan yapılıdır. Dolayısıyla *TK* verilerinin tezgâh kinematiğine uygun koordinatlara kinematik dönüşümü gerekir. Bu çalışmada yazarlar genelleştirilmiş bir tezgâh kinematiği algoritması tasarlamışlardır. Oluşturdukları yazılım vasıtasıyla kullanıcı takım konumu verilerini kendi tezgâhına uygun eğim ve dönme açılarını seçip gerekli mafsal uzunluklarını girerek, tezgâh kinematiğine ve programlama formatına (Fanuc-APT vs) uygun *NC* bloklarını oluşturabilmektedir. Yaptıkları çalışmada 3 lineer ve 4 dönel eksen olmak üzere 7 eksenli genelleştirilmiş birçok eksenli tezgâh modellemişler ve ters kinematik fonksiyonlarını çıkarmışlardır. Kullanıcı öncelikle kendi tezgâh eksenlerini tanımlamakta, daha sonra tezgâha bağlanacak takım uzunluklarını ve mafsal uzunluklarını tanımlamaktadır. Bu işlemden sonra tezgâha bağlanan parça sıfırı koordinatlarının mafsal noktalarına olan uzunlukları girilmelidir. Böylelikle parça üzerinde iş parçası koordinat sistemine göre bulunan takım konum bilgileri tezgâh koordinat sistemine göre hesaplanıp *NC* kodlarına çevrilebilmektedir. Yazarlar çalışmalarını ticari *NC* benzetim programlarıyla test etmişlerdir.

Chen-Hua ve ark. (2007) oluşturulan takım konumlarının tezgâh kinematiğine uygun *NC* kodlarına aktarılabilmesi için bir son işlemci (postprocessor) yazılımı geliştirmişlerdir. Daha önce yaptıkları benzer çalışmayı iş mili tablası belli bir açıyla eğimli olan bir tezgâha özel şekilde geliştirmişlerdir. Bu tezgâhta kullanılan özel bir başlık diğer çalışmalarında olduğu gibi tezgâh koordinat sistemine göre ortogonal olarak hareket etmemektedir. Burada yine bir yazılım geliştirip takım konumlarını tezgâh kinematiğine uygun dönüşümlerle *NC* kodlarına çeviren bir arayüz geliştirmişlerdir.

Young ve Banerjee (2007) parametrik yüzeylerin etkin bir biçimde işlenebilmesi için matematiksel işlemci yazılımı, MATLAB kullanarak bir teknik

geliştirmiştir. Yaptığı çalışma 2 kere türetilen tüm sürekli yüzeyler için uygulanabilmektedir. Kurduğu algoritmada öncelikle takım ilerleme yönünde bir adım uzunluğu hesaplamış ve o noktada uygun yanal kayma hesaplanmıştır. Yanal kayma miktarını izin verilen bir kalıntı talaş yüksekliğine göre adaptif olarak hesaplamıştır. Yaptığı çalışma bezier, yüzeyiyle sınırlı kalan ve bir matematiksel işlemciye ihtiyaç duyan sınırlı bir çalışmadır. Endüstriyel uygulamalara aktarılması sınırlı kalmaktadır. Çünkü testlerde kullandığı yüzey denkleminin değişkenlerini bir matris olarak kendisi tanımlamıştır. Çalışmayı sınırlı kılan bir diğer durum ise kurduğu algoritmanın sadece küresel uçlu sabit yarıçaplı bir takıma adapte edilmesinden kaynaklanmaktadır. Yazarlar yaptığı çalışmayı bir tezgahta işleyerek tasarım yüzeyi ile işlenen yüzeyi kıyaslayarak işleme hatalarını tespit etmişlerdir.

Sylvain ve ark. (2008) beş eksen yüksek hızda işleme stratejisinde takım oryantasyonunun optimizasyonu için bir yüzey yaklaşımı geliştirmişlerdir. Optimizasyonda makinenin daha hızlı hareket kabiliyetine sahip olması için takım oryantasyon açıları optimize edilmiştir. Burada tezgah eksenlerindeki ivme değişimleri de ölçülerek daha hassas ve hızlı bir işleme için takım oryantasyonu iyileştirilmiş gereksiz açısal hareketler minimize edilmiştir.

Jianhua ve Alan (2008) yaptıkları araştırmada beş eksen frezelemede takım oryantasyonunda yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada yüzeyi 2. derece bir yüzeye uydurarak takım oryantasyonunu gerçekleştirmişlerdir. C-uzayı yöntemi hariç diğer çalışmalarda sadece eğim açısı üzerinde optimal çözüm aranırken bu çalışmada hem eğim hem de dönme açısı ile optimal çözüm aranmıştır. Yay kesiştirme metodunun ve C-uzayı metodunun daha gelişmiş hali olan bu yöntem yine takım gölgesi altında kalan bölgede takım için uygun oryantasyon açısı hesaplamaktadır.

Nan ve Kai (2008) yaptıkları çalışmada farklı bir takım yolu oluşturma stratejisi geliştirmişlerdir. Takımı TT noktasında konik bir hacim içinde hareket kabiliyetine sahip olduğundan yola çakarak hem eğim hem de dönme açısını hesaplamışlardır. Yaptıkları konumlamaları ve yanal kaymaları yüzey eğimine göre

adaptif şekilde hesaplayarak oldukça etkin bir takım yolu oluşturmuşlardır. Takım oryantasyonunda eğim açısını minimumda tutarak etkin talaş kaldırmayı yerel dalma olmadan uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmayı izo-parametrik takım yolu uygulamaları ile kıyaslamışlardır.

Athulan ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada ortalama bir kalıntı talaş miktarına göre takım yolu hesaplamışlardır. Yaptıkları çalışmanın bir diğer aşaması ise daha önce 3-11/22 eksen işleme stratejisine benzer bir eksen kilitleme metodudur. Bu metotta yüzey analiz edilerek tablaya bir ön eğim açısı verilmiştir. Bu açı sabit tutularak bir küresel uçla işleme yapılmıştır. Fakat işleme yapılırken yanal kaymalar yüzey eğriliğine göre adaptif şekilde değişken olarak hesaplanmıştır. Bu metot yine küresel uçlu freze ile sınırlı olup sabit bir kalıntı talaş miktarı da vermemektedir. Fakat işleme zamanında oldukça verim artışı sağlamaktadır.

3. TEORİK ESASLAR

3.1. Serbest Şekilli Yüzeylerin Modellenmesi

Geometrik şekiller bilgisayar destekli olarak modellenerek, belli veritabanlarında kaydedilebilmektedir. Bu alanda 2-3 boyutlu birçok modelleme tekniği ve standart veritabanı geliştirilmiştir. Birçok uygulamada bu teknikler kullanılmakta ve her geçen gün geliştirilmektedir.

Bu tasarımların kaydedilmesi ise her ticari çizim programının kendine özel veritabanında yapılabileceği gibi, uluslar arası bazı standart veritabanları (database) ile de gerçekleştirilebilmektedir. Bu standart veri tabanları, dosyaların programlar arasında takas yapılabilmesini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Bu standartlar arasında en bilinenleri “DXF, ACIS-SAT, IGES, STEP, ASCII, PARASOLID, STL” olarak sıralanabilir. Bu dosya tipleri tüm programlar arasında ortak bir veri paylaşımını sağlamak amacıyla oluşturulmuştur.

Her hangi bir parçanın modellenmesinde çizgiler, daireler, yaylar, pirimitif olarak adlandırılan küp, koni, silindir, küre ve eğrisel çizgi ve yüzeyler (BSpline, NURBS) gibi karmaşık geometrik şekiller kullanılır. Bu şekiller kendi aralarında yükseltme, çıkarma, süpürme, döndürme, yumuşatma, budama vb. işlemlerle tasarım oluşturulur. Oluşturulan bu şekillerin geometrilerine bağlı koordinatlarının veya matematiksel ifadelerinin çıkarılabilmeleri için gerekli değişkenler özel formatlarda saklanmaktadır.

Bu formatlar içinde en karmaşık olanları şüphesiz ki serbest şekilli eğrisel çizgi ve yüzeylerin matematiksel ifadesinin çıkarılmasıdır. Bu alanda, serbest şekilli eğri ve yüzeylerin matematiksel olarak ifadesi, ilk olarak Schorenberg tarafından 1946 yılında öne sürülmüş, bilgisayar destekli tasarım alanında ise ilk uygulaması Gordon

ve Riesenfeld tarafından 1974 yılında yapılmıştır. Eğri ve yüzeylerinin matematiksel temsilinde kullanılan metotlar iki grupta incelenebilir (Sarıöz (2005)).

a) Polinomlar (*Polynomials*)

- İnterpolasyon polinomları (Lagrange, Newton, Hermite vs.)
- Yaklaşık temsil polinomları (En küçük kareler, ortogonal vs.)

b) Eğriler (*Spline Curves*)

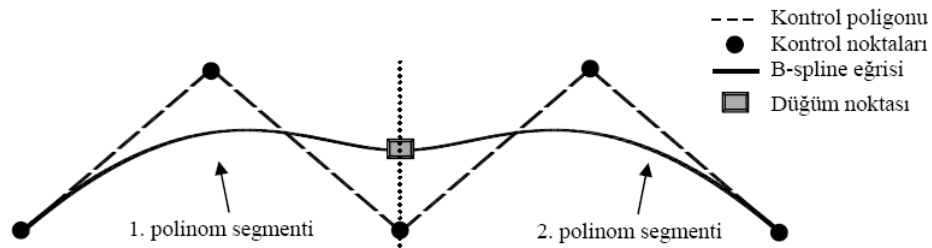
- İnterpolasyon eğrileri (Kübik eğriler, splines under tension)
- Kontrol poligonu teknikleri (Bezier, B-spline, NURBS eğrileri)

Polinomların eğri ve yüzeylere uygulanmasının başarılı olduğu söylenemez. Polinomların temsil dezavantajları nedeniyle, eğrilerin kullanılmaya başlamasıyla polinomlar büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Eğrilerin temsil gücü büyük ölçüde polinomlar gibi global bir eğri olmamasından kaynaklanmaktadır. Eğrilerinde, polinomlardaki gibi tek bir matematiksel ifade yerine eğriyi ofset noktaları arasında farklı matematiksel ifadelerle temsil etme yoluna gidilmiştir. Dolayısıyla eğrinin herhangi bir noktasında yapılan değişiklik, eğriyi sadece değişiklik yapılan bölgede yerel olarak etkilemektedir. Eğrilerinin bu özelliği bilgisayar destekli tasarım alanında çok aranan bir özelliktir. Verilen ofset noktalarında hatalı noktaların bulunması olasılığı her zaman bulunduğundan, genellikle sadece hatalı noktaların değiştirilmesi ve eğrinin diğer karakteristiklerinin bu değişiklikten etkilenmemesi istenir. Ayrıca eğrinin pek çok matematiksel ifadenin birleşmesi ile oluşması eğriye fazladan esneklik kazandırmaktadır. Eğrileri bu özellikleriyle, son yıllarda bilgisayar destekli tasarım alanında çok tercih edilmektedir. Eğriler genel olarak interpolasyon ve kontrol poligonu teknikleri olarak iki kategoride sınıflandırılır. Birinci gruptaki eğrilerin en başlıcaları kübik eğriler, gerilim altındaki eğrilerdir. İkinci grupta ise Bezier, B-spline ve NURBS eğrileri görülmektedir. Eğrileri genel olarak kullandıkları temel fonksiyonun tipine göre sınıflandırılırlar (Sarıöz 2005, Piegel 1997).

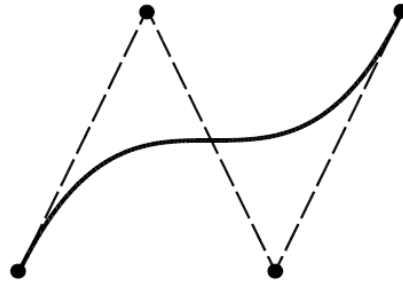
3.1.1. B-Spline eğrileri

B-spline eğri ve yüzeyleri kontrol noktaları adı verilen köşe noktaları ile tanımlanırlar. Bu noktalar kullanılarak elde edilen eğri ve yüzeyler, kontrol noktalarından geçmemekle birlikte, eğri veya yüzeyin formu tamamen bu noktaların konumlarına göre şekillenmektedir. Bu kontrol noktalarının oluşturduğu poligona kontrol poligonu denilmektedir. Bu noktalar bir mıknatıs gibi davranarak eğrinin kontrol poligonunun şeklini takip etmesini sağlar ve sonuçta kontrol poligonunun sınırları içerisinde kalan karakteristik ve düzgün bir eğri elde edilir (Sarıöz 2005). Şekil 3.1’de bir kontrol poligonu ve bir B-spline eğrisi görülmektedir.

B-spline eğrilerinin genel olarak Bezier eğrilerinin geliştirilmesi sonucu ortaya çıkmış eğriler olduğunu söyleyebiliriz. Yalnız B-spline eğrileri genelde Bezier eğrisi gibi tek parça bir eğri değildir. B-spline eğrisi en az bir ya da daha çok polinom segmentinin birleşmesinden oluşmaktadır. B-spline eğrisinin tek bir segmentten oluşması durumunda bu eğri aynı zamanda Bezier eğrisidir. Bu durumun gerçekleşebilmesi için, eğrinin kontrol noktası sayısı ile mertebesinin birbirine eşit olması gerekmektedir. Şekil 3.2’de görülen eğrinin dört kontrol noktası vardır ve eğrinin mertebesi de dört olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla bu tek parça eğri, hem B-spline eğrisi hem de Bezier eğrisidir (Choi 1991).

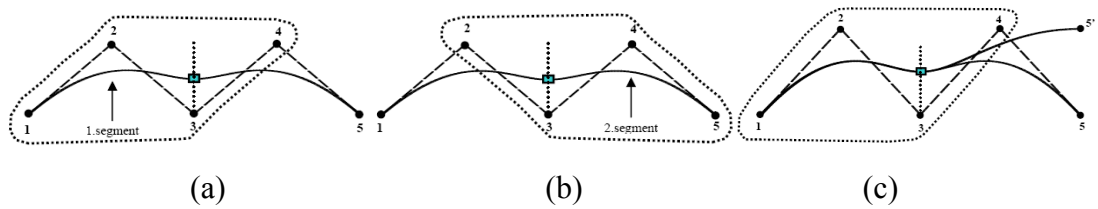


Şekil 3.1 Bir B-spline eğrisi ve kontrol poligonu



Şekil 3.2. Bezier eğrisine eşdeğer bir B-spline eğrisi.

B-spline eğrisinin derecesi Bezier eğrilerinde olduğu gibi nokta sayısına bağlı değildir. B-spline eğrisinin derecesi mertebesinin bir eksiğidir ($k-1$). B-Spline eğrisinin mertebesi, polinom segmentlerini etkileyen kontrol noktası sayısını göstermektedir. Şekil 3.3.'de, beş kontrol noktası ile çizilmiş 4. mertebeden (3. derece) bir B-spline eğrisi görülmektedir. Bu eğri iki segmentten oluşmakta ve segmentlerin birleştikleri noktalarda düğüm noktaları bulunmaktadır. B-spline eğrisinin 1. ve 2. segmentini etkileyen kontrol noktaları noktalı alanlar içerisinde görülmektedir. Çizilen eğri 4. mertebeden bir eğri olduğundan, her polinom segmentini sadece dört kontrol noktası etkilemektedir. Yani, 1. segment üzerinde 5. kontrol noktasının hiç bir etkisi yoktur. 5. nokta konumu kasti olarak değiştirilip 5' konumuna getirilirse, bu değişimin 1. segment üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı aşağıda şekil 3.3(c)'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Mertebesi 4 ve 2 segmentten oluşan B-spline eğrileri

B-spline eğrilerinin formunu etkileyen önemli bir faktör de düğüm vektörleridir. B-spline eğrisinin parametre değişimini gösteren düğüm vektörü B-spline eğrisinin kaç polinom segmentinden oluşacağını belirler. Düğüm vektörünün elemanları olan parametre değerlerine düğüm noktaları denir ve her polinom

segmentinin uç noktalarında bulunur. B-spline eğrilerinde her kontrol noktasının (B_i) bir temel fonksiyonu ($N_{i,k}$) vardır. Böylece, bir kontrol noktası (B_i) eğriyi ancak temel fonksiyonunun sıfır olduğu yere kadar etkileyebilmektedir. B-spline eğrilerini lokal kontrol kabiliyeti bu özelliğinden ileri gelmektedir. B-spline eğrisinin denklemi bu temel fonksiyonlarının ve kontrol noktalarının lineer kombinasyonu ile elde edilmektedir (Choi 1991).

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad 2 \leq k \leq n+1 \quad (3.1)$$

3.1.1.1. B-Spline Temel Fonksiyonları

B-spline temel fonksiyonlarının nümerik hesaplama açısından en uygun matematiksel ifadesini Cox ve De Boor 1972 yılında vermiştir. Her kontrol noktası için tanımlanan k . mertebeden i . normalleştirilmiş B-spline temel fonksiyonunun ifadesi aşağıdaki gibi verilmiştir (Cox 1972, De Boor 1972).

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & x_i \leq t \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t - x_i)}{x_{i+k-1} - x_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{(x_{i+k} - t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t) \quad 1 \leq i \leq n+1$$

Nümerik hesaplama açısından, bu matematiksel ifade için $0/0 \equiv 0$ kabulü yapılmaktadır. Bu ifadede;

$N_{i,k}$: mertebesi (k) olan (i). temel fonksiyonu,

t : eğrinin parametresini,

k : eğrinin mertebesini,

x_i : düğüm vektörünün elemanlarını,

$n+1$: kontrol noktalarının sayısını, göstermektedir.

Cox-De Boor formülasyonundan da görülebileceği gibi k . mertebeden bir temel fonksiyonun hesabı için 1. mertebe dahil olmak üzere k 'dan düşük mertebede tüm temel fonksiyonların hesaplanması gerekmektedir.

3.1.1.2. B-Spline düğüm vektörünün tanımı

Her B-spline eğrisi için bir düğüm vektörü tanımlanmaktadır. Bu vektör, B-spline eğrisinin parametre aralığını göstermektedir B-spline temel fonksiyonlarının denkleminde görülen X_i değerleri, eğri boyunca değişen t parametresini gösteren düğüm vektörünün $[X]$ elemanlarıdır. Monoton olarak artan reel sayılardan ($x_i \leq x_{i+1}$) oluşan düğüm vektörünün B-spline fonksiyonlarının şekillenmesinde büyük önemi vardır. B-spline eğrisi bu düğüm vektörünün elemanlarının belirlediği sayıda ve şekilde parçalara ayrılır. Yani bir B-spline eğrisinin kaç polinom segmentinden oluşacağı düğüm vektörü tarafından belirlenir. Düğüm vektörünün elemanları, t_{min} 'den t_{max} 'a doğru monoton olarak artan t parametre değerleridir (Choi 1991).

$$[x] = [(t_{min}=t_1) (t_2) \dots (t_{n+k}) (t_{max}=t_{n+1+k})] \quad (3.3)$$

3.1.2. Geometrik yüzeylerin temsilinde kullanılan matematiksel yöntemler

Eğrilere bir boyut daha eklenmesiyle yüzey tanımına geçilmektedir. Matematiksel yüzey uydurma yöntemleri arasında ilk dönüm noktasını Coons'un 1964 yılında geliştirdiği Coons yüzeyleri oluşturmuştur. Ferguson yüzeylerinin geliştirilmiş bir hali olan Coons yüzeylerinde, tüm sınır eğrileri için normalleştirilmiş kübik eğrilerini kullanmaktadır. Yüzeyin esas gövde kısmında kübik blending fonksiyonları kullanılmaktadır. Yüzeyi oluşturan dikdörtgensel yüzey parçaları (patch), köşelerde bulunan dört konum vektörü, sekiz tanjant vektörü, dört twist vektörü ve dört kübik blending fonksiyonu ile tanımlanır. Coons yüzeyleri esneklik

kabiliyeti ile başarılı bir yöntem olmasına rağmen bağlantı ve yüzey kontrol kabiliyeti ile ilgili bir takım problemleri bulunmaktadır. Bu problemlerin birçoğu Bezier yüzeylerinin geliştirilmesiyle giderilmiştir. Bahsedilen bu metotlar yüzeylerin temsilinde kullanılmış başlıca yöntemlerdir. Fakat B-spline yüzeyleri pek çok bakımdan üstün özellikleri ile son yıllarda bilgisayar destekli tasarımda daha yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Sarıöz 2005, Piegl 1997).

3.1.2.1. B-Spline yüzeyleri

B-spline eğrileri yüzeyler için genelleştirilerek B-spline yüzeyleri elde edilmektedir. B-spline yüzeyleri, B-spline eğrilerinin sahip olduğu tüm özelliklere sahiptir. Matematiksel denklemi de B-spline eğrilerine benzer olarak aşağıdaki gibidir (Cox 1972, De Boor 1972).

$$S(u, v) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) \quad \begin{array}{l} u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \\ v_{\min} \leq v \leq v_{\max}, \end{array} \quad \begin{array}{l} 2 \leq k \leq n+1, \\ 2 \leq l \leq m+1, \end{array} \quad (3.4)$$

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & x_i \leq u \leq x_{i+1} \\ 0 & \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - x_i)}{x_{i+k-1} - x_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{(x_{i+k} - u)}{x_{i+k} - x_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \quad 1 \leq i \leq n+1 \quad (3.5)$$

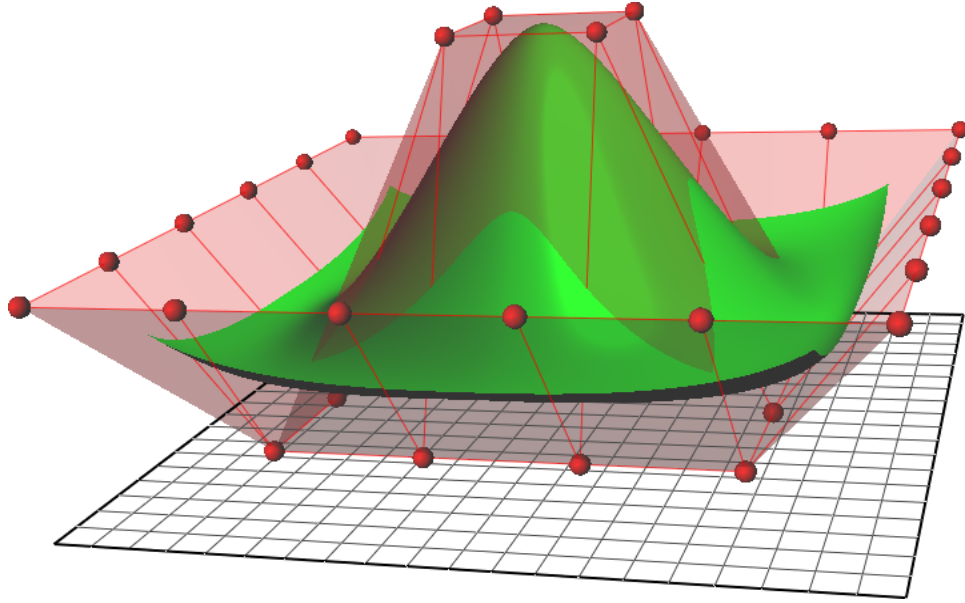
$$M_{j,1}(v) = \begin{cases} 1 & y_j \leq v \leq y_{j+1} \\ 0 & \end{cases}$$

$$M_{j,l}(v) = \frac{(v - y_j)}{y_{j+l-1} - y_j} M_{j,l-1}(v) + \frac{(y_{j+l} - v)}{y_{j+l} - y_{j+1}} M_{j+1,l-1}(v) \quad 1 \leq j \leq m+1$$

$$[x] = [x_1 \dots x_{n+k}] \quad , \quad [y] = [y_1 \dots y_{m+1}] \quad (3.6)$$

Kontrol noktaları (B_{ij}), kontrol ağı olarak adlandırılmakta ve yüzey tanımlamada kullanılacak olan köşe noktalarını göstermektedir. Şekil 3.4.'de örnek

bir B-Spline yüzeyi ve yüzeyi oluşturan kontrol noktası ağı gösterilmektedir (Wikimedia, NURBSurface.png). $N_{i,k}(u)$ ve $M_{j,l}(v)$, u ve v parametrik yönlerini takip eden $(k-1)$ ve $(l-1)$. dereceden temel B-spline fonksiyonlarıdır. Bu ifadelerde x_i ve y_j düğüm vektörlerinin elemanlarıdır. u ve v parametrik yönlerindeki kontrol noktası $(B_{i,j})$ sayısı sırasıyla $(n+1)$ ve $(m+1)$ 'dir. $(k-1, l-1)$ derece B-spline yüzeyi dikdörtgensel bir kontrol neti ile tanımlanmaktadır. Her iki parametrik yöndeki düğüm vektörleri B-spline yüzeyinin şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır.



Şekil 3.4. Bir B-Spline yüzeyi ve yüzeyi oluşturan kontrol noktası ağı

3.1.2.2. Uniform olmayan rasyonel B-spline yüzeyleri (NURBS)

Uniform olmayan B-spline eğrilerinin 2. bir boyut katılarak yüzeye çevrilmiş halidir. Temsil kabiliyeti B-spline yüzeylerine göre daha da gelişmiştir. Bu yüzey tipinde her bir kontrol poligonuna bir ağırlık fonksiyonu eklenmiştir. Bu ağırlık fonksiyonu ile yüzey istenilen kontrol poligonuna yaklaştırılıp uzaklaştırılabilmektedir. Bir NURBS yüzeyinin matematiksel ifadesi Eşitlik 3.7 ile ifade edilebilmektedir (Choi 1991).

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^{m+1} \sum_{j=1}^{n+1} N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=1}^{m+1} \sum_{j=1}^{n+1} N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) w_{i,j}} \quad (3.7)$$

Bu ifadede B-spline yüzeyine ilave olarak sadece $w_{i,j}$ ağırlık fonksiyonu eklenmiştir. Tüm temel fonksiyon ve düğüm vektörleri B-spline yüzeylerindeki gibi elde edilmektedir.

3.1.3. Standart veri tabanları

Bilgisayar uygulamalarında hafızada kaydedilen her türlü bilgi, bir veritabanı (database) formatı oluşturularak kaydedilmektedir. Böylelikle bu tür dosyaları okuyacak olan programlar, formatı belli olan bu dosyalardaki değişkenleri ararak yorumlarlar. Bilgisayar destekli tasarımda 2 ve 3 boyutlu tasarımların topolojik ve geometrik bilgilerinin kaydedilmesi, transferi, takas yapılması içinde birtakım standart veri tabanları geliştirilmiştir. Bu veritabanları “CAD/CAM” sistemleri arasında entegrasyonu sağladıklarından büyük önem arz etmektedir (Çiçek 2006).

Bu standartlar arasında uluslar arası alanda en bilinenleri “DXF, ACIS-SAT, IGES, STEP, ASCII, PARASOLID, STL” vd. olarak sıralanabilir. Tüm tasarım programları bu veritabanlarının bir veya bir kaçını destekleyerek, farklı “CAD/CAM” programlarıyla aralarında dosyalarını takas (export-import) yapabilmektedir. Her ticari programın kendine özgü ve gizli bir veritabanı vardır ve hiçbir yabancı programın bu özel veri tabanını tanıması beklenemez. Bu yüzden standart veri tabanları programlar arasında ortak bir dil gibi işlev görmektedir. Bu dosya formatları kısaca açıklanmıştır.

SAT: SAT (Save Acis Text) grafik veri standardı spatial corporation firması tarafından geliştirilmiş ve 3 boyutlu parçaların kaydedilmesinde kullanılan bir formattır. Birçok grafik ve CAD/CAM programı bu formatı tanımaktadır. Bu formatın iki tip kayıt dosyası bulunmaktadır. Bunlardan ilki herhangi bir yazı editörü ile açılabilen SAT (Save ACIS Text) uzantılı dosyadır. Diğeri ise SAB uzantılı (Save ACIS Binary) ikilik formatta bir dosya olduğu için text editöründe okunamaz. Oluşturulduğu ilk yıllardan bu güne kadar birçok sürüm (V1.6-V15) değişikliği yapılmıştır (www.spatial.com).

DXF: DXF (Drawing Exchange File) dosyaları Autodesk firması tarafından geliştirilmiş olup, en çok kullanılan grafik standardıdır. Bu dosya tipini tanımayan tasarım programı neredeyse yoktur ve 2 boyutlu tasarımlarda kullanılan tüm özellikleri bünyesinde barındırmaktadır. Çizgiler, yazılar, toleranslar, ölçülendirmeler ve her türlü 2 boyutlu çizim nesnesi bu veritabanında saklanabilmektedir. Tek dezavantajı 3 boyutlu nesnelerin (katı-yüzey) kaydedilememesidir (www.autodesk.com).

IGES: IGES (Initial Graphics Exchange Specification) değişim formatı 1979 yılında Amerika'da CAD/CAM sistemleri geliştiricileri birliği tarafından tasarlanmış ve 1981 yılında ANSI standartlarına adapte edilmiştir. IGES dosyaları SAT da olduğu gibi farklı tekniklerde kaydedilebilmektedir. Bunlar binary (ikilik sayı sistemi), ASCII (American Standart Code Information Interchange), ve Text (yazı) olarak sıralanabilir. Bu veri tabanı kendi içinde 5 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; Başlangıç, ayrıntı, adres, parametrik veri ve sonlandırıcı bölümleridir. Her bölüm kendine özgü SGDPT gibi karakterlere sahiptir. Başlangıç bölümü dosyanın oluşturulması ile ilgili bölümleri içermektedir. Ayrıntı bölümü dosyanın bütününe etkileyen genel parametreleri içerir. Adres bölümü her öge için adres bilgilerini içerir. Parametrik veri bölümü öğeler için koordinatlar, açılar gibi gerçek veriyi barındırır. Sonlandırıcı bölüm dosyayı sonlandırır ve dört terimle dosya hakkında bilgi verir (U.S. National Bureau of Standards **NBSIR 80-1978.**)

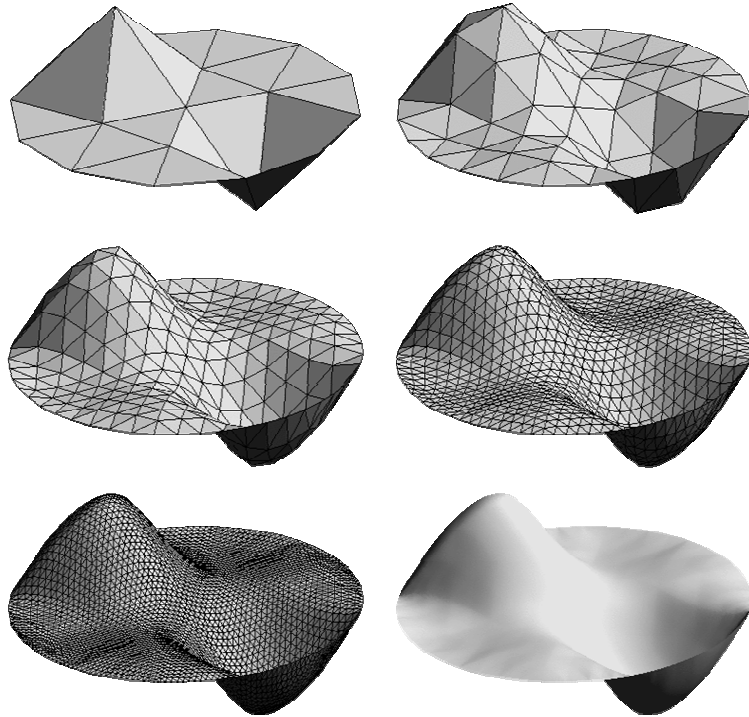
STEP: STEP (STandard for Exchange of Product data) grafik standardı, bir tasarımı mamul haline getirmek için gerekli bütün işlemlerin ve bağlı parametrelerin standardize edilmesini ve tanımlanmasını; hiçbir uygulama, tasarım ve üretim yazılımına bağlı kalmadan gerçekleştirebilmeyi sağlamak için tasarlanmıştır. Bütün diğer standartları bünyesinde toplayan STEP standardı, bu standartların aksine geometrik veri dönüşümünün yanı sıra unsurlar, tolerans ve yüzey kalitesi gibi teknolojik üretim bilgilerinin ve topolojik unsur ilişkilerinin tanımını da içermektedir. STEP standardını diğerlerinden ayıran diğer bir özellik ise esnek ve dinamik bir yapıya sahip olmasıdır. Step standardı ISO-10303 numarasıyla kayıt altına alınmış uluslar arası bir standarttır. AP203, AP214, AP224, AP233 ve AP218 gibi çeşitli formatları mevcuttur. Örneğin 214: otomotiv ve mekanik dizayn, 218: gemi yapısı dizaynı, 233: sistem mühendisliği veri kayıtları, 236: Mobilya parça ve proses veri kayıtları 224-238: STEP-NC unsur tabanlı işlem planlaması gibi çok çeşitli alanlarda kullanılan step formatlarıdır (Julian 1995, SCRA 2006).

STL: STL (STereo Litography) dosya formatı, '3D systems' adlı bir firma tarafından geliştirilmiş ve daha sonra bir çok özel CAD yazılımı tarafından da desteklenmiştir. En çok tersine mühendislik, hızlı prototipleme ve CAD/CAM entegrasyonu alanında kullanılmaktadır. Veri tabanı olarak sadece yüzeye ait geometrik veriyi ihtiva eder. Renk, yapı, malzeme, tolerans gibi hiçbir veriyi ihtiva etmediğinden çok sade bir formatı vardır. Bir STL dosyası yüzeyi ifade eden üçgenlerden ve her üçgene ait bir normal vektörden oluşur. Bütün üçgenler, 3 eksenli kartezyen koordinat sistemine göre sağ el kuralı gözeterek oluşturulur. Bu dosya formatı da yine ASCII ve ikilik (binary) formatlarında oluşturulur. İkilik sayı sisteminde dosya oluşturulmasının sebebi çok büyük ve hassas parçalarda verilerin fazla yer kaplamasının engellenmesidir. Ascii formatında STL dosyasının yapısı aşağıda belirtilmektedir (3D systems).

Tablo 3.1 STL dosya formatı

<i>kalıpyanmaca</i>	Dosya ismi
. . facet normal <i>n1 n2 n3</i> outer loop vertex <i>v11 v12 v13</i> vertex <i>v21 v22 v23</i> vertex <i>v31 v32 v33</i> endloop endfacet . .	Yüzey normali birim vektörü (xyz) Dış bağ Üçgene ait 1. köşe koordinat (xyz) Üçgene ait 2. köşe koordinat (xyz) Üçgene ait 3. köşe koordinat (xyz) Bağ sonu Yüzey sonu
END solid	Dosya sonu

STL formatında yüzeyi belli hassasiyette ifade edebilen üçgenler oluşturulurken yüzey eğriliği göz önüne alınır. Üçgen boyutu düştükçe hata oranı düşmekte ve üçgen sayısı artmaktadır. Aşağıda şekil 3.5’de bu durum izah edilmektedir (Mansour 2002).



Şekil 3.5. STL formatında üçgen sayısının artırılması

3.2. Takım Yolu Oluşturma Teknikleri

Takım yolu oluşturma işlemi, takımın talaş kaldırma esnasında ardışık olarak hareket edeceği konumların hesaplanması işlemidir. Bu hesaplama işleminde en önemli etkenler yüzey geometrisi, frezeleme yöntemi ve takım yolu aralıklarıdır. Seçilen işleme stratejisine göre takım yolu oluşturma işlemi; işlenecek yüzeyin geometrik bilgisi, takımın geometrik yapısı, takım yolu topolojisi, talaş kaldırma stratejisi ve takımın yanal kayma ile adım uzunluğuna bağlı takım yolu sıklığı gibi değişkenleri içermektedir. Bütün bu değişkenler takım yoluna bağlı olarak işleme süresine, işleme toleransına ve parça yüzey pürüzlülüğüne etki eder. Takım yolu oluşturma stratejileri takım temas (*TT*) temelli ve takım konum (*TK*) temelli olarak iki kategoride incelenmektedir (Choi 1998).

3.2.1. *TT* Temelli takım yolu oluşturma teknikleri

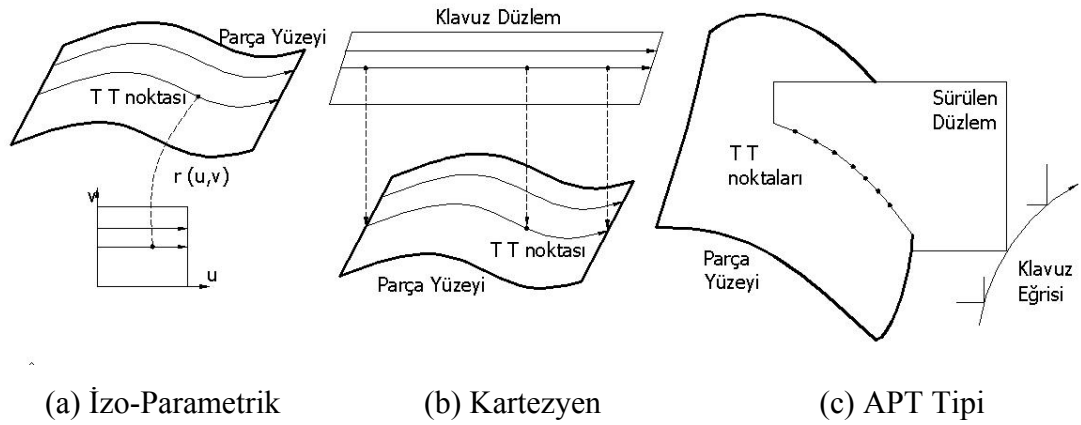
Nümerik kontrollü takım tezgâhları programlanırken, kesici takım uç merkez referans noktasının parça üzerinde noktadan noktaya olan konumlarının belli bir formatta sıralı olarak yazılması gerekir. Kesici takımın uç referans noktası bir noktaya (*TK*) konumlanırken, kesici takımın parçaya teğet temas ederek kestiği yerler (*TT*) konumlama noktasından bağımsızdır. Dolayısı ile talaş kaldırma işleminin gerçekleşmesi gereken noktalar değil, o noktalardan talaş kaldırabilecek takım konum verilerine ihtiyaç vardır.

TT temelli takım yolu oluşturma tekniği, parça yüzeyinde takım ile temas eden noktaların ardışık olarak *TK* verilerine dönüştürülmesi esasına dayanır. Bu işlemler bütünü konvansiyonel takım yolu oluşturma teknikleri olarak adlandırılır.

TT temelli takım yolu oluşturma tekniği 3 grupta incelenir (Ersoyoğlu 2005). Bunlar;

- 1- İzo-parametrik metot: TT noktaları bir parametre bölgesinde (u,v) planlanarak, oluşan TT noktaları tekrar parça yüzeyine taşınır.
- 2- Kartezyen metot: TT noktaları bir kılavuz düzlem üzerinde planlanarak tekrar parça yüzeyine transfer edilir.
- 3- APT metot: TT noktaları, bir kılavuz çizgisi eşliğinde, parça yüzeyi üzerinde hareket eden bir düzlemin kesiştirilmesi ile elde edilmektedir.

Aşağıda Şekil 3.6'da bu 3 takım yolu oluşturma metodu şematik olarak gösterilmektedir (Choi 1998).



Şekil 3.6. TT temelli takım yolu oluşturma teknikleri

3.2.2. TK temelli takım yolu oluşturma teknikleri

Bu teknikte takım konumu direk olarak hesap edilmektedir. Bunun için takım konum yüzeyi kullanılır ve takım yolu bu yüzey üzerinde oluşturulur. Bu yöntemin genel ismi şekil uzayı (C-scape) olarak adlandırılmaktadır. *TK* temelli takım yolu oluşturma tekniği birim işleme operasyonuna (BİO) göre kategorize edilir. Serbest şekilli yüzeylerin işlenmesinde kullanılan birim işleme operasyonları göz önüne alınarak 4 grupta incelenebilir (Ersoyoğlu 2005).

- 1- Hacim tipi BİO: Cep boşaltma, kademe boşaltma, düzlem-adımlı kaba boşaltma
- 2- Tarama tipi BİO: Alan kesme, profil kesme
- 3- 3B Eğri tip BİO: Kalem tipi dip köşe kesme, dip köşe radyüsü işleme
- 4- 2B Eğri tipi BİO: Kanal açma, 2 boyutlu profil işleme

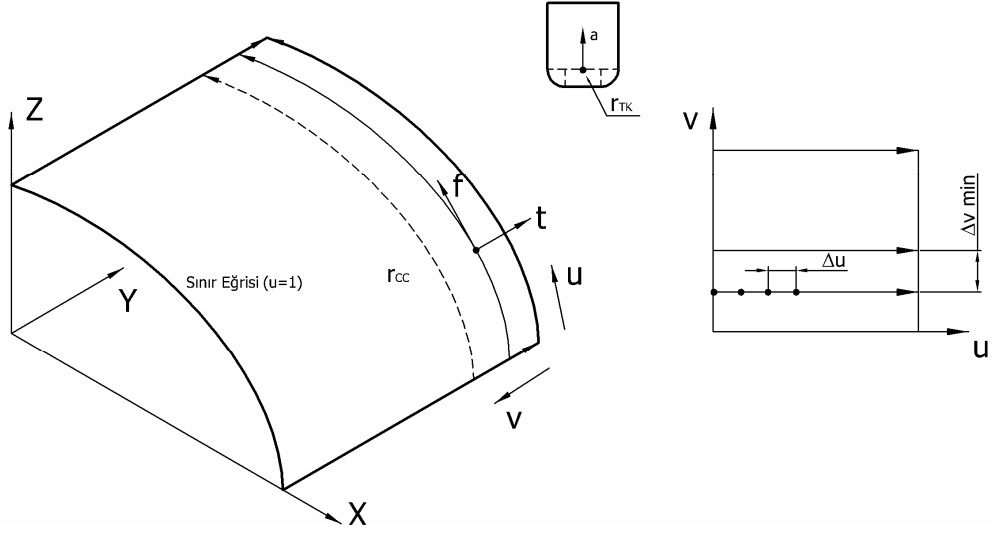
Hacim tipi frezeleme kaba işleme, tarama tipi işleme ince ve yarı kaba işlemlerde tercih edilir. 3B eğri tip BİO'lar takımın yanaşamadığı dip köşelerde kalan talaşlar için, 2B BİO'lar ise prizmatik parçaların işlenmesinde tercih edilmektedir.

3.2.3. İzo parametrik metot için takım yolu verisi hesaplama

İzo parametrik takım yolu için *TK* verilerinin hesaplanabilmesi için Şekil 3.7'de bir dışbükey yüzey örneği ve parametrik alan ifadesi gösterilmiştir. Bu yüzeyi işlemek için kullanılacak olan takım, köşeleri yuvarlatılmış bir freze takımı, işleme tipi ise tek yönlü yukarı doğru işleme tipidir.

Bu parça için BİO tanımlama formatı aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Choi 1998).

SE-paralel, alan kesme, [tek yön-yukarı, köşe. radyüslü takım (ρ, χ) , $\lambda(\tau_i, \tau_o)$ $\omega(\eta)$],



Şekil 3.7. İzo-parametrik takım yolu tekniği için örnek yüzey ve parametre alanı

SE= Sınır eğrileri

ρ, χ = Kesici takım radyüsü, köşe radyüsü

$\lambda(\tau_i, \tau_o)$ = toleransa bağlı adım uzunluğu

$\omega(\eta)$ = takım yolu aralığı (yanal kayma) kalıntı talaş yüksekliğine bağlı (η)

Şekilde 3.7'de görüldüğü gibi takım yolları, $r(u,v)$ parametrik yüzeyinde v parametresi sabit tutularak $v=0$ sınır eğrisinden başlanarak elde edilmişlerdir. Takım yolu yukarı yönlü frezeleme işlemi oluşturmaktadır. Şekildeki TT noktasında takım ilerleme yönü vektörü f , yana doğru teğet vektör ise t olarak gösterilmiştir. Bu iki teğet vektör ve TT noktasındaki n birim normal vektörü TT koordinat çerçevesini oluşturmaktadır. Bu vektörler eşitlik 3.8-10 ile hesaplanabilir (Jun 2003).

$$n=(n_x, n_y, n_z)= (r_u \times r_v) / |r_u \times r_v| \quad (3.8)$$

$$f=(f_x, f_y, f_z)= (r_u) / |r_u| \quad (3.9)$$

$$t=f \times n \quad (3.10)$$

Bu eşitliklerde tanımlanan r_u ve r_v $r(u,v)$ yüzeyinin TT noktasındaki kısmi türevleridir. TK verilerinin hesabı 3 adımda gerçekleşir. Bunlar; Haritalama, adımlama ve yanal kayma prosedürlerinin yapılmasıdır.

3.2.3.1. Haritalama

Haritalama işlemi TT noktalarından TK verisinin elde edilmesi işlemidir. Burada yüzeye ve takıma bağlı olarak genel denklemler yazılabilir. Örneğin köşesi yuvarlatılmış bir takım için yazılan denklemde köşe radyüsü takım yarıçapına eşit olursa takım küresel uçlu bir takıma dönüşür. Veya köşe radyüsü ise sıfır olarak girilirse takım düz uçlu parmak frezeye dönüşür. TT noktasından TK verisi elde etmek için kullanılan denklemler aşağıda belirtilmiştir (Choi 1998).

$$r_{TK} = r_{TT} + \chi \cdot n + (\rho - \chi) \cdot [n - (a \cdot n) \cdot a] / [1 - (a \cdot n)^2]^{1/2} \quad a \cdot n \neq 1 \quad \text{ise} \quad (3.11)$$

$$r_{TK} = r_{TT} + \chi \cdot a \pm (\rho - \chi) \cdot f \quad \text{eğer } a \cdot n = 1 \quad (3.12)$$

burada;

ρ, χ = Kesici takım radyüsü, köşe radyüsü

$r_{TT} = r(u,v)$ yüzeyine ait TT noktası

$n = (n_x, n_x, n_z)$: birin yüzey normal vektörü

a = takım eksenini birim vektörü

f = ilerleme yönü birim vektörü

3 eksen frezeleme işlemlerinde $a = (0, 0, 1)$ olmaktadır. Küresel uçlu bir takımda $\rho = \chi$ olarak düşünülürse; $r_{TK} = r_{TT} + \chi \cdot n$ şekline indirgenebilir.

3.2.3.2. Adımlama

Adımlama işlemi takım yolu aralıkları ve takımın her bir komutta lineer olarak ne kadar ilerleyeceğinin belirlendiği adımdır. Bu işlem parametrik yüzeyde u ve v adımlarının uzunluğunun belirlenmesidir. Burada bu adımların kısalığı yüzey hatalarını azalttığı gibi takım yolu adım sayısını ve işleme süresini de artırır. İlerleme adımı uzunluğu λ , yanal kayma aralığı ω değerlerinin bilindiğini varsayarsak, parametrik artış miktarları eşitlik 3.13 ve 3.14 ile hesaplanabilir (Choi 1998).

$$u = u + \Delta u \quad , \quad \Delta u = \lambda / |r_u| \quad (3.13)$$

$$\Delta v_{min} = \min(\Delta v_{min}, \Delta v) \quad , \quad \Delta v = \omega / |r_u| \quad (3.14)$$

Eğer ilerleme adımı uzunluğu λ , yanal kayma aralığı ω değerleri bilinmiyorsa burada yüzey eğriliğine, takım tipi ve geometrisine bağlı çeşitli hesaplama yöntemleri mevcuttur. Özellikle 5 eksen frezelemede takım oryantasyon açıları ile takım işleme profili elipse döndüğü düşünülürse bu adımların hesaplanması daha da karmaşık hal almaktadır. 3 eksen frezelemede yüzeyin eğriliği (içbükey, dışbükey), takım geometrisi ve istenen yüzey toleransına göre hesaplar kolaylıkla yapılabilmektedir.

3.2.3.3. Yanal adım

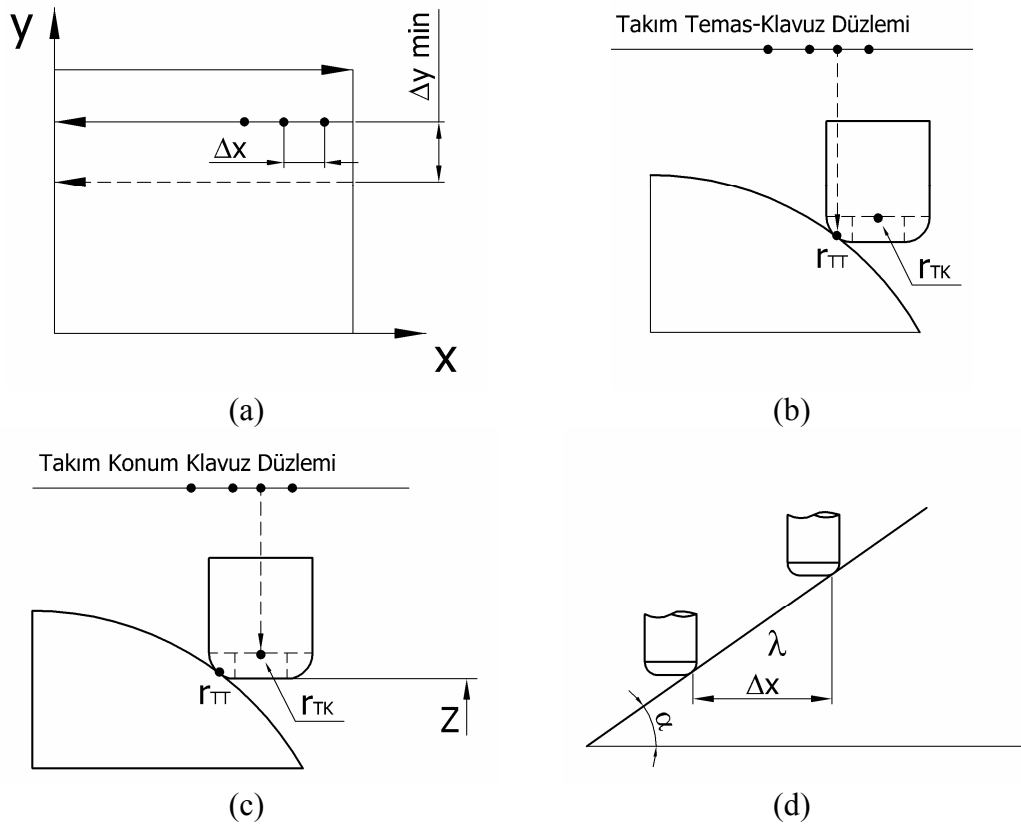
Her bir izo-parametrik u değeri sona erip yeni döngü başlangıcında, v parametresinde yapılacak olan ilerleme artışıdır. Yanal adım veya yanal kayma olarak ifade edilen bu değer direk olarak yüzey işleme hatalarına dolayısıyla yüzey pürüzlülüğüne etki eder ve $v^* = v^* + \Delta v_{min}$ şeklinde hesap edilir.

3.2.4. Kartezyen metot için takım yolu verisi hesaplama

Kartezyen *TK* verilerinin hesap edilmesi için daha önce izo-parametrik metot için kullanılan Şekil 3.7. kullanılacaktır. İşleme formatı ise aşağıda belirtilmiştir.

Xy-paralel alan kesme [tek yön-yukarı, köşeleri radyüslü takım (ρ, χ), $\lambda(\tau_i, \tau_o)$ $\omega(\eta)$]

İzo parametrik metotta kullanılan f, t koordinat çerçevesi bu metot içinde geçerlidir. Şekil 3.8(a)'da görüldüğü gibi her ne kadar takım yolları X-Y düzleminde yatay olarak oluşturulsa da burada iki farklı teknik ortaya çıkmaktadır (Ersoyoğlu 2005).



Şekil 3.8. Kartezyen takım yolu oluşturma tekniğinde *TT* verilerinin hesaplanması

Bu tekniklerden birincisi Şekil 3.8(b)'de gösterilen *TT* noktalarını esas alarak parça takım temas noktalarını direk elde eden *TT*-kartezyen metod, ikincisi ise Şekil

3.8(c)'de gösterilen ve direk olarak *TK* verilerinin hesabın sağlayan *TK*-kartezyen metotlarıdır. Her ikisinde de bir kılavuz düzlem mevcuttur ve istenen *TT* ve *TK* verileri bu düzlem yardımı ile bulunmaktadır.

3.2.4.1. Haritalama

Haritalama işlemi daha önce izo-parametrik metotta olduğu gibi *TT* verisinden *TK* verisinin elde edilmesi işlemidir. Bu işlem sadece *TT*-kartezyen metot için geçerlidir. Bir kılavuz düzlem noktasından (x,y) bir *TK* verisinin elde edilmesi iki aşamadan oluşur. Bunlar; klavuz düzlemindeki (x,y) 'den parametrik alan (u,v) noktasına daha sonra $r_{TT}(u,v)$ 'den r_{TK} noktasına taşıma işlemidir.

Haritalama işleminin ilk basamağı, dikey bir çizgi ile bir parametrik $r(u,v)$ yüzeyinin kesişme noktasının bulunması için çok ideal olan 2B Jakobien dönüşüm algoritması kullanarak yapılabilir. Bu noktalar bulunduktan sonra *TK* verilerinin hesabında izo-parametrik yöntemde kullanılan takıma bağlı formülasyonlar kullanılabilir. *TT* kartezyen metotta ise x,y noktaları belli olduğu için bulunması gereken koordinat sadece z eksen koordinatıdır. Bu işlem nümerik olarak yapılabilir.

3.2.4.2. Adımlama

Bu adım yine izo parametrik yöntemle aynıdır. Formülasyonlarda farklı olarak aşağıdaki değişiklikler yapılabilir. Şekil 3.8(d)'de görüldüğü gibi takımın yüzey üzerinde ilerleme doğrultusunda yapmış olduğu adımlar λ aralıklarına bölünmüştür. Burada takım yolları (-) yöne doğru olduğu için parametre alanında da (-) yönde kayma yapılmalıdır (Choi 1998).

$$x = x - \Delta x \quad \Delta x = \lambda. \text{Cos}(\alpha_f) \quad (3.15)$$

$$\Delta y_{min} = \Delta y_{min}, \Delta y \quad \Delta y = w.\text{cos}(\alpha_r) \quad (3.16)$$

α_t α_f : sırasıyla t ve f yönlerinde yüzey eğim açısı

Δx : XY düzlemindeki ileri artış miktarı

Δy_{min} : XY düzlemindeki yan artış miktarı

3.2.4.3. Yanal adım

Her bir paso bittiği anda yapılması gereken yanal kayma aşağıdaki şekilde formülüne edilebilir. $X = x_0$ başlangıç değeri sıfırlanır;

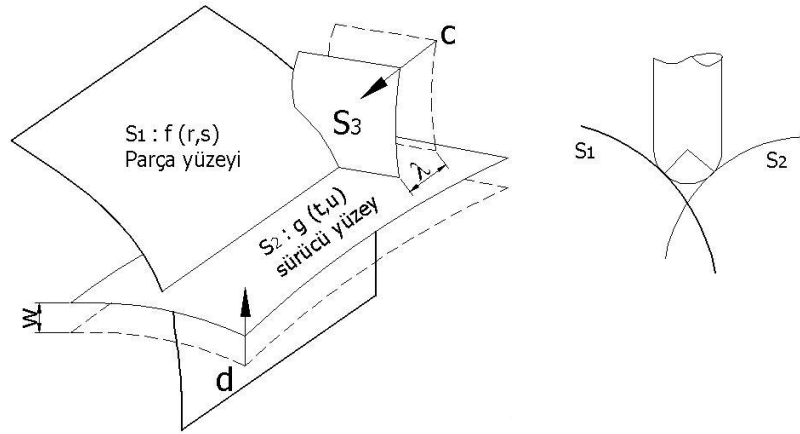
$$y^* = y^* - \Delta y_{min}^* \quad (3.17)$$

Şekil 3.8(a)'dan ve yukarıdaki formülasyondan da anlaşılacağı gibi Δy_{min} bir önceki y değerinden çıkarılmıştır. Bir sonraki y değeri geçerli olan y değerinden daha küçük olmalıdır. *TK*-kartezyen metodu *TT*-kartezyen ve izo-parametrik metotla kıyaslandığında, içbükey noktalardaki dalma riskinin daha az olduğu söylenebilir. Fakat bu yöntemde özellikle klavuz düzlemin parça yüzeyine tam dik duruma yaklaştığı yani $\alpha_t = 90^\circ$ ye yaklaştığı durumlarda bazı hesaplama zorlukları ortaya çıkmaktadır.

3.2.5. APT tipi takım yolu verisi hesaplama

Daha önceki metotlarda olduğu gibi bu yöntemde haritalama, adımlama ve yanal kayma aşamalarından oluşur. Şekil 3.9'da belirtildiği gibi işlenecek olan yüzey *S1*, sürücü yüzey ise *S2* olarak belirtilmiştir. Bu takım yolu oluşturma metodu *S1* ve *S2* yüzeyi ile sürekli olarak takım temasının korunarak takımın köşeler arasında sürülmesi esasına dayanır. Bir *S1* yüzeyini işleyebilmek için *S2* yüzeyler serisi elde edilmelidir.

Sürücü yüzey seti Şekil 3.9’da görüldüğü gibi d doğrultu vektörü yönünde belli aralıklarda kaydırılmaktadır. $S2$ yüzeyi her hangi bir yüzeye göre sınırlandırılmak isteniyorsa bir kontrol yüzeyi ($S3$) yüzeyler ile birleştirilir. Bu kontrol yüzeyi şekilde belirtilen c yön vektörü vasıtasıyla kaydırılarak ara kontrol yüzeyleri elde edilebilir.



Şekil 3.9. APT tipi takım yolu oluşturma tekniği

3.2.5.1. Haritalama

Bu işlem her bir TT verisi için TK verisini bulmak için yapılır. Bu işlem $S1$, $S2$ ve $S3$ yüzeylerinin ofsetlenmesi ve bu ofset yüzeylerinin kesişim noktalarının bulunması esasına dayanır. Bu işlem için geliştirilmiş nümerik hesaplama prosedürü aşağıdaki gibidir (Faux 1979).

$$f \equiv f(r,s)$$

$$g \equiv g(t,u)$$

$$h \equiv h(v,w)$$

m , n ve o ise sırasıyla f, g, h 'a ait birim normal vektörleridir.

$$f^o = f + \rho m; \quad g^o = g + \rho n; \quad h^o = h + \rho o;$$

ρ küresel uçlu takımın yarıçapı olarak düşünülürse; ofsetlenmiş teğet düzlemler

$$\pi_1 : \mathbf{m} \cdot \mathbf{r} = m ; \quad \pi_2 : \mathbf{n} \cdot \mathbf{r} = n ; \quad \pi_3 : \mathbf{o} \cdot \mathbf{r} = 0$$

Bu üç düzlemin kesişmesi ile oluşan q noktası ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$q = [m(n \times o) + n(o \times m) + o(m \times n)] \cdot m \cdot (n \times o) \quad (3.18)$$

Başlangıç için seçilen tahmini p noktasından son TK noktasına ait q noktasının hesabında aşağıdaki algoritma izlenir (Choi 1998).

- 1- TK noktasına ait başlangıç tahmini noktasını gir
- 2- p 'ye en yakın $f(r,s)$ üzerinde parametre alanı noktasını (r^t, s^t) bul
- 3- p 'ye en yakın $g(t,u)$ üzerinde parametre alanı noktasını (t^t, u^t) bul
- 4- p 'ye en yakın $h(v,w)$ üzerinde parametre alanı noktasını (v^t, w^t) bul
- 5- m, n, o yüzey birim normallerini, (r^t, s^t) (t^t, u^t) (v^t, w^t) noktalarındaki f^o g^o h^o ofset noktalarını değerlendir.
- 6- q noktasına ait denklem ile ofset teğet düzlemdeki kesişme noktasını bul
- 7- Eğer $|p-q| < \varepsilon$ ise q geri dön değilse $p=q$ olur ve adım 2 ye gidilir.

3.2.5.2. Adımlama

Adımlama işlemi iki ofset yüzeyin ($f^o(r,s)$ - $g^o(t,u)$) kesişme problemi gibi düşünülüp nümerik hesap yapma esasına dayanır. Bu işlem için kurulan algoritma aşağıdaki gibidir. Bu algoritma küresel uçlu takım için geliştirilmiştir. Köşeleri radyüslü takım için de algoritma geliştirilebilir. Fakat bu işlem için birçok nümerik işlem yapılması gerekir (Choi 1998).

- 1- Geçerli TK verisine ait q değerini gir. TT noktasının parametrik alan verileri (r^t, s^t, t^t, u^t) ve adım uzunluğu λ .
- 2- Sırasıyla $f(r^t, s^t)$ ve $n(t^t, u^t)$ noktalarına ait m ne n birim normallerini bul.
- 3- Bir tahmini nokta hesapla $p=q \pm \lambda (m \times n) / |m \times n|$, adımlama yönü seç
- 4- Jl algoritması kullanarak f ve g noktaları üzerinde en yakın (r^t, s^t) (t^t, u^t) noktalarını bul.
- 5- Yeni bulunan parametre alanında m, n , birim normallerini ve f^o ve g^o ofset noktalarını bul
- 6- Bir sonraki q noktasını hesapla
- 7- Eğer $|p-q| < \varepsilon$ ise q geri dön değilse $p=q$ olur ve adım 4 ye git.

3.2.5.3.Yanal adım

Aktif takım yolu tamamlandıktan sonra bir sonraki takım yolu için yapılacak yanal kayma $S2$ sürücü yüzeyinin ω kadar artırılması gerekir. Yanal artış işlemi aşağıda ifade edilmiştir (Faux 1979).

$$g(t, u) = g(t, u) + w \cdot d \quad (3.19)$$

Burada d sürücü şekil3.9'da gösterildiği gibi yüzeye ait ofset vektörüdür. APT tip takım yolu oluşturma metodu çok yönlü bir yapıya sahiptir. Fakat nümerik hesaplama zorluğu ve hatalardan dolayı tercih edilme oranı düşüktür. APT tipi takım yolu oluşturma tekniği özellikle sabit-Z değerli kontur işleme operasyonları ve kalem tipi bitirme operasyonları için ideal bir çözümdür.

3.2.6. Takım yolu oluşturmada şekil uzayı (C-space) yaklaşımı

Şekil uzayı yaklaşımı *TK* verileri kullanarak yeni bir takım yolu oluşturma yöntemidir. Bu yöntem güvenli manipülatör hareketi planlama tekniğinin takım yoluna adapte edilmiş halidir. Bu yöntem diğer yöntemlerle kıyaslandığında; dalma ve çarpma riskini yok etmesi, kesme yüklerinin daha dengeli olması ve kesici hareketlerinin daha yumuşak oluşu öne çıkar. Bir takım yolu oluşturma işleminden beklenen özellikler şöyle sıralanır (Choi 1998).

- 1- Dalmaları engelleyecek
- 2- Çarpışma olmayacak
- 3- Kesme yüklerini dengeleyebilecek
- 4- Son temizleme talaşı için takım yolu oluşturabilecek
- 5- Takım yolu düzgünlüğü sağlayacak
- 6- Kolaylıkla doğrulanabilecek

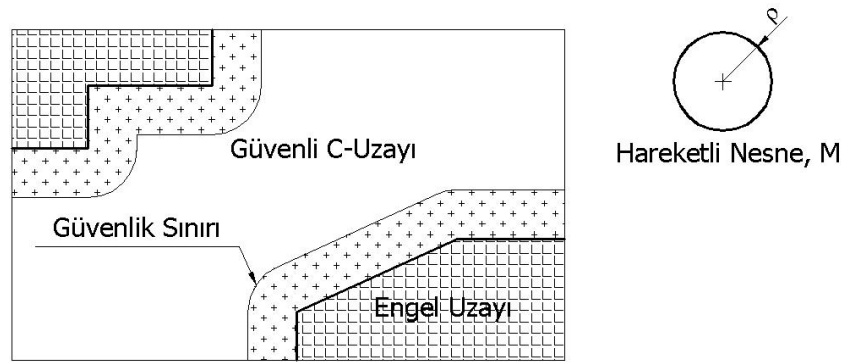
Yukarıda sayılanların hepside yüksek hızda işleme için gerekli takım yolu özellikleridir. Çünkü sayılanların hepsi yüksek hızda işlemede kritik öneme sahiptir. Daha önce bahsedilen takım yolu oluşturma yöntemlerinin hepsi yukarıda bahsedilen özelliklerde belli bir limite kadar başarılıdır. C-uzayı uzaysal hareket planlama işlemlerinde özellikle manipülatör transfer hareketlerinin planlamasında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemdeki temel adımlar aşağıda verilmiştir.

- 1- Hazırda bulunan tüm engel noktaları $\{O_j\}$ içinde hareket eden bir nesne için güvenli bir C-uzayı bulunur.
- 2- Bu C-uzayında nesne için güvenli hareket yolları bul.

Burada bahsedilen güvenli C-Uzayı, O_j engel noktaları ve hareketli nesne M 'nin üst üste binmesini engelleyecek şekiller dizisidir.

$$M \cap (U O_j) = \Phi \quad (3.20)$$

C-Uzayının temel mantığı, engel noktalarından hareketli nesnenin genişliği kadar bir ofset alanı oluşturmaktır. Hareketli nesne merkezi bu ofsetlenmiş sınır dışına çıkmaz. Bu bölge güvenli bölge olarak adlandırılır. Bu bölge dışında kalan ise engel alanı olarak adlandırılır. Aşağıda şekil 3.10'da C-Uzayının gösterimi yer almaktadır (Lozano 1979).



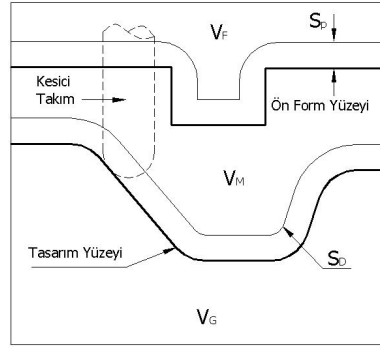
Şekil. 3.10. C-uzayı şematik gösterimi

Takımın serbestçe hareket edebileceği bölgeler ve takımın hareket ederek talaş kaldıracakları bölgeler tanımlanarak C-uzayı oluşturulur. Burada işlenecek yüzeyin takım geometrisine bağlı olarak ofsetlenmiş sınırı güvenlik sınırı olarak adlandırılır. Bu güvenlik sınır eğrisi TK verisini oluşturur. Şekil 3.11'de 3 eksen işleme için oluşturulan C-uzayı açıklanmaya çalışılmıştır. Şekilden de anlaşılacağı gibi tasarım yüzeyi ve ön form yüzeyi, takıma bağlı belli bir öteleme ile iki yeni yüzey elde edilmiştir. Bunlar şekilde gösterildiği gibi S_D ve yüzeyleridir. Takımın hareketine bağlı oluşturulması gereken hacim ise 3 ayrı bölge olarak tanımlanır. Bunlar;

V_F : "Serbest dolaşım" C-Uzayı Hacmi (S_p yüzeyinin üzerinde)

V_M : "İşleme" C-Uzayı Hacmi (S_p ve S_D arasında)

V_G : "Dalma" uzayı hacmi (S_D yüzeyinin altında)

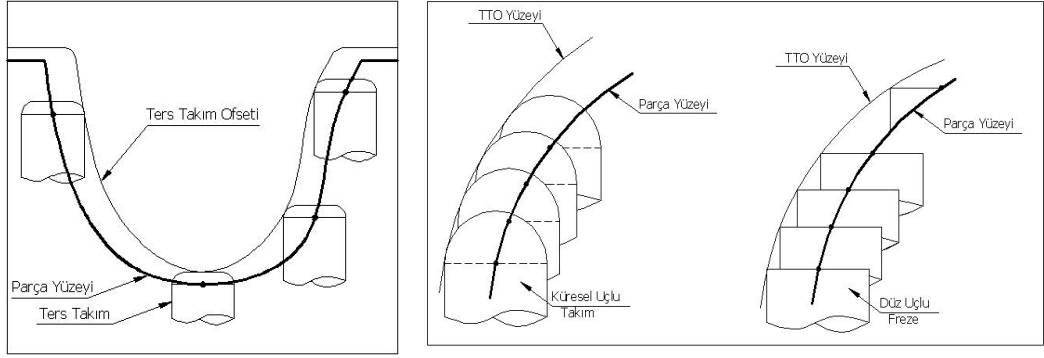


Şekil 3.11. Üç eksen frezeleme işlemi için C-Uzayı

Bu sayılan elemanlar C-uzayının elemanlarıdır. C-uzayı yaklaşımının temel özellikleri aşağıda açıklanmıştır (Choi 1998).

- Üç eksen işlemede her zaman tek bir geçerli TK yüzeyi elde edilir
- TK Yüzeyi, ters takım ofseti diye adlandırılan bir yüzeye denktir.
- Küresel uçlu takımlarla işleme yapılırken, işlenen yüzey G^1 sürekli bir yüzeyse içbükey dalma oluşmaz.
- Kesici takıma gelen yükler S_D tasarım yüzeyinin eğriliğine bağlı olarak tahmin edilebilir. Burada talaş derinliğinin uniform olması gerekir. İçbükey noktalarda talaş yükü fazla, dışbükey yüzeylerde ise azdır.

Birinci özellik C-uzayı yaklaşımı her zaman tek ve geçerli bir TK yüzeyi elde edilebileceğini göstermektedir. Bunun sebebi 2 özellikte belirtilen ters takım ofsetidir. Bu yöntem diğer yöntemlere nazaran her zaman kesin ve doğru bir çözüm vermektedir. Aşağıda şekil 3.12’de bu bahsedilen ters takım ofseti yüzeyinin oluşturulması gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Ters takım ofsetinin oluşturulması

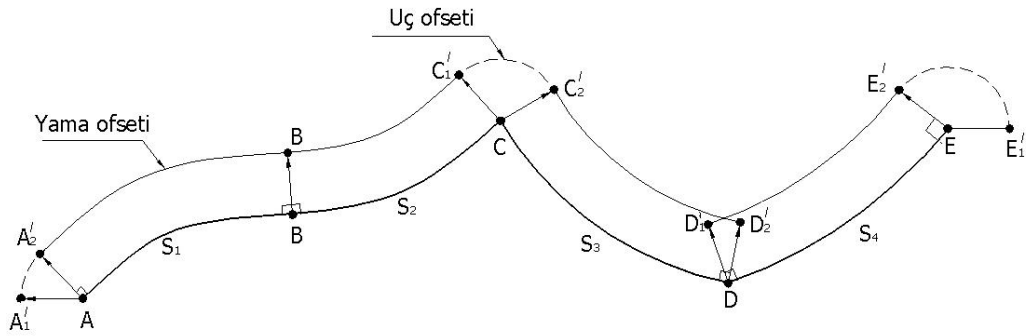
Tasarım yüzeyi üçgenleştirilmiş yüzeylerle veya Z-Harita modelleriyle modellenebilir (Choi 1988, Sheng ve Hirsch 1992). Z-Haritaları aynı zamanda G-Tampon modeli olarak da isimlendirilmektedir. Bu tekniklerin temeli Z eksenine ait değerlerin, XY eksenlerine bağlı 2D sayı dizinlerinden oluşmasıdır. XY koordinatları düzenli ızgara aralıklarında belirlenir. Z-haritalarının elemanları $Z[i,j]$ 'nin, x,y koordinatları aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$x[i] = x [0] \gamma_x \cdot i \quad ; \quad y[j] = y [0] \gamma_y \cdot j \quad (3.21)$$

$x [0], y [0]$ noktaları yüzeyin sol alt köşesi ızgara noktası, γ_x, γ_y ise her iki ızgara yönünde ızgara aralıklarıdır. Z-haritaları üçgen yüzey parçaları şeklinde de tanımlanabilmektedir. Üçgen yüzeylerle daha yumuşak yüzeyler elde edilebilir. Yüzey hücreleri parametrik *coons* yamaları şeklinde de ifade edilebilir (Farin, 1993). Dik yüzeylerin, keskin köşelerin Z-haritalarıyla hatasız olarak tanımlanabilmesi bu yöntemi çok tercih edilir bir yöntem haline getirmiştir. Ford ve Chrysler gibi büyük firmalar kalıpları işlemek için Z-harita destekli CAM modelleri kullanmaktadır. Z-haritaları kullanarak *TK* yüzeylerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemler ters takım ofseti (TTO) ve ofset yüzey tekniğidir.

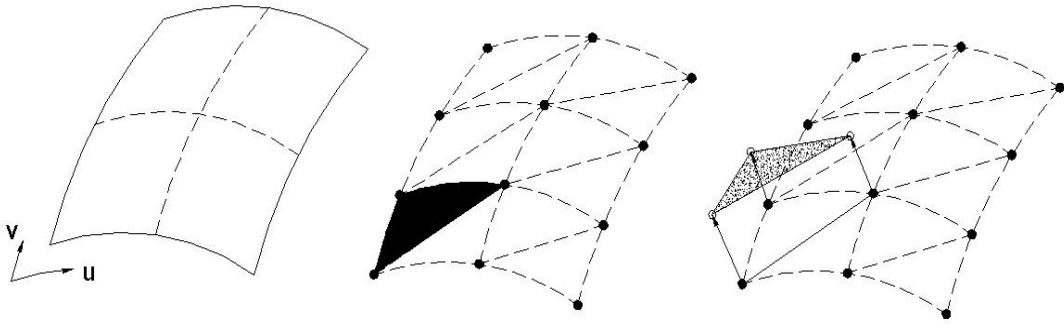
3.2.6.1. Ofsetleme ile TK yüzeyinin Z-haritasının çıkarılması

Bu teknikte öncelikle modelin bir Z-haritası çıkarılarak, bu haritanın belli değerlerde ofsetlenmesi ile *TK* yüzeyine ait yeni bir Z-haritası elde edilir. Burada 2D ters jakobien algoritması kararsız hale gelerek geçerliliğini yitirir. Burada ofset yüzey tekniği kullanılır. Bu teknik hesaplama açısından yavaş olmasına rağmen özellikle bitirme operasyonları için kesin sonuç vermektedir (Austin 1997). Aşağıda şekil 3.13'de bir yüzey kesiti ve bu yüzeye ait ofset yüzeyi görülmektedir. Bu yüzey 4 farklı parametrik yüzey yamasası ve 5 sınır noktasından oluşmaktadır. Bu yüzeyde A-E sınır noktaları, B noktası yumuşak bir ortak nokta, C dışbükey ve D içbükey bir noktadır.



Şekil 3.13. *TK* yüzeyinde yüzey yamasası ve uç ofsetleme

İçbükey ve dışbükey yüzeyler arasında kalan noktalar ofsetlenmesi durumunda farklı segmentlerde yüzey normaline göre 2 farklı ofset noktası oluşabilir. Şekil 3.15'de görüldüğü gibi C-D noktası için iki farklı ofset noktası oluşmaktadır. Bu iki noktaya göre yeni bir kesişim noktası oluşturulması gereklidir. Parametrik yüzey yamaları ofsetlenirken, CAD modelinden alınan yüzey bilgileri kullanılarak üçgenleştirme işlemi yapılır (Austin 1997). Aşağıda şekil 3.14'de parametrik yüzeyin üçgenleştirme ve ofsetleme şekli açıklanmaktadır.



Şekil 3.14. Parametrik yüzeyin üçgenleştirilmesi ve ofsetlenmesi

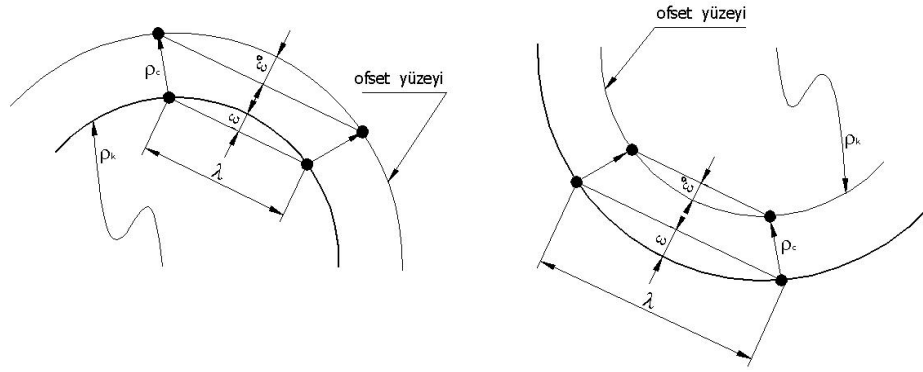
Bu teknik C-uzayı metodunda da tercih edilen bir tekniktir. Üçgenleştirme işlemi yapılırken kullanılacak olan üçgenlerin boyutlarına bağlı çözünürlük, iki yüzey noktası arasında oluşan kiriş uzunluğu λ , kabul edilen tolerans τ ve üçgenleştirme esnasında oluşan hata oranı ise ε gibi değişkenlerine bağlıdır. Burada iki nokta arasına kiriş uydurma gibi nümerik çözümler uygulanmaktadır. Bu işlemde çözünürlük yüzey eğriliğine göre değişmektedir. Yüzey eğriliği ρ_k ve hata oranı ε 'ye bağlı olarak değişen kiriş uzunluğu λ eşitlik 3.22 ile hesaplanabilir. İçbükey ve dışbükey eğrilerde oluşan kiriş ve hata oranı aşağıda şekil 3.15'de gösterilmiştir. Dışbükey yüzeylerde ofsetleme yapıldığı zaman yeni ofset yüzeye ait hata oranı orijinal yüzeydeki hata oranından farklıdır. Yeni oluşturulan yüzeye ait hata oranı ε^o , takım radyüsü ρ_c ve yüzey eğriliği ρ_k olarak kabul gösterilirse, hata oranı eşitlik 3.23 ile hesaplanabilir (Choi 1991).

$$\lambda = 2(2 \cdot \rho_k \cdot \varepsilon - \varepsilon^2)^{1/2} \quad (3.22)$$

$$\varepsilon^o = \varepsilon \cdot (\rho_k \pm \rho_c) / \rho_k \quad (+dış, - içbükey) \quad (3.23)$$

İçbükey bölgelerde yüzey eğriliği, ρ_k takım radyüsü ρ_c 'ye eşit veya daha küçük olduğu durumlarda formülasyonlar tanımsız hale dönüşmektedir. Bu tür noktalara takım tam olarak sığmadığı için bu noktalar haritalama işleminde göz ardı edilir. Eğriliği takım eğriliğinden daha küçük olan bu noktalara daha küçük çaplı takımlarla bitirme işlemi uygulanabilir. Özellikle dip köşe noktalarda kalan bu talaş için özel kalem kesme prosedürü de uygulanabilir. Kalem tipi kesme işlemi, takımın

yaklaşmadığı takım radyüsünden küçük olan bölgelerdeki yüzeylere ait üçgenleştirme verileri tekrar yorumlanarak takım yolu oluşturulması esasına dayanır.



Şekil 3.15. Dışbükey ve içbükey yüzeylerde ofsetleme

3.3. Beş Eksen Frezeleme Tekniği

Frezeleme işlemi en az bir kesici uca sahip, dönel bir kesici takımın sabit bir iş parçasına göre rölatif bir hareket yaparak elde edilen talaş kaldırma tekniğidir. İmalat işlemlerinde özellikle kalıp imalatında çok kullanılan bir talaş kaldırma yöntemidir. Kullanılan tezgâhın tipine göre, parça veya takım lineer/dairesel olarak çeşitli eksenlerde hareket edebilmektedir. Eksen sayılarına göre frezeleme metotları sınıflandırılabilir. En basit frezeleme metodu 2 eksenli frezelemedir. Bu frezeleme tekniği pantograf gibi 2 boyutlu basit desenlerin malzeme üzerine işlendiği tekniktir. 2.5 eksen frezeleme ise 2 boyutlu bir geometrinin sabit bir derinlikte parça üzerine işlenmesidir. Cep boşaltma, kontur frezeleme, tarama çakısı ile düzlem yüzey işleme, kanal açma vb. operasyonlar 2.5 eksen işleme örnekleridir. Bu teknikte takım kullanıcı tarafından girilen bir Z değerine kadar inerek 2 boyutlu geometriyi o derinlikte işler. 3 eksen işleme ise 3 boyutlu eğrisel yüzeylerin işlenmesinde kullanılır. Takım 3 eksende aynı anda hareket edebilmektedir. Özellikle serbest şekilli parçaların işlenmesinde parça yüzeyine göre takım yolu oluşturularak eğrisel geometriler elde edilir. 4 eksen işleme, tezgâh tablası üzerine takılmış bir divizör veya dönel tabla vasıtasıyla parçayı belli eksenlerde çevirebilen bir işleme yeteneğine sahiptir. Talaş kaldırma işlemi 4. eksen sabitlendikten sonra yapılabileceği gibi 4 eksen eşzamanlı bir şekilde de talaş kaldırabilir. 5 eksen frezeleme tekniği ise 3 eksen frezeleme tekniğine ek olarak, takıma veya iş parçasına verilen 2 adet eğim veya dönme hareketi ile sağlanan bir işleme yöntemidir.

5 eksen işleme yapabilen freze tezgâhlarında kesici takım tablaya göre belli düzlemlerde eğilebilmekte, iş parçası ise belli eksenlerde dönebilmektedir. Bu şekilde birçok tezgâh üreticisi 9 farklı eksende, iş parçasına veya tablaya eğim veya dönme hareketi verebilen tezgâh üretmişlerdir. 5 eksen CNC yatay/dikey işleme merkezleri özellikle kalıp parçalarının hassas ve hızlı biçimde işlenmesinde oldukça tercih edilen bir tezgâh haline gelmişlerdir. Serbest şekilli eğrisel yüzeylerin 5 eksenli işlenmesi 3 eksen işlemeye göre birçok avantaja sahiptir. Bunlar hızlı talaş kaldırma oranı, gelişmiş yüzey bitirme talaş tekniği ve elle parlatma (polisaj)

işleminin elimine edilmesi olarak sayılabilir. Bazı araştırmalarda beş eksen frezeleme üç eksen'e göre 10-20 kat daha fazla verimlilik artışı sağlamaktadır (Vickers 1989).

Beş eksen freze tezgâhlarının kullanılmasının 2 temel sebebi verimlilik ve kolay erişilebilirliktir. Kalıpcılıkta 5 eksen tezgâhların kullanılmasının en temel sebebi takım yolu sayısının azaltılarak çok hassas yüzeyler elde edilebilmesidir. Özellikle eğrisel yüzeylerde düz uçlu takımların kullanılması büyük avantaj sağlamaktadır. Üç eksen frezelemede çok derin kalıplarda kalıp tabanını işleyebilmek için çok uzun takımların kullanılması gerekir. Böyle durumlarda takımın uzun olması frezeleme işlemi sırasında titreşimler oluşturur. Beş eksen frezeleme işleminde, kısa takımlar parçaya göre açı değiştirilerek kalıp derinliklerine rahatlıkla erişebilmektedir.

3.3.1. Beş eksen işleme yapabilen tezgâhların özellikleri

Beş eksen işleme yapabilen sayısal denetimli tezgâhlar yatay veya dikey işleme merkezlerine ilaveten 2 adet dönel eksen takımı ilavesi ile elde edilir. Bir beş eksen tezgah 3 adet prizmatik (P) 2 adet döngüsel (R) mafsalsal hareketine sahiptir. Beş eksen işleme merkezleri bazı standart kategorilerde toplanmıştır. Bunlar tezgâhın hareket kabiliyetine göre 3 grupta kategorize edilmişlerdir (Bohez 2002). Bunlar;

- (1) P-P-P-R-R grubu
- (2) R-R-P-P-P grubu
- (3) R-P-P-P-R grubu

Şeklinde sayılabilir. Prizmatik hareketler X - Y - Z eksenleri ile döngüsel hareketler ise A - B - C eksenleri ile ifade edilir. Bu dönme eksenleri de standartlaştırılarak şu şekilde ifade edilir. Bunlar;

A eksenini *X* eksenini etrafında dönme.

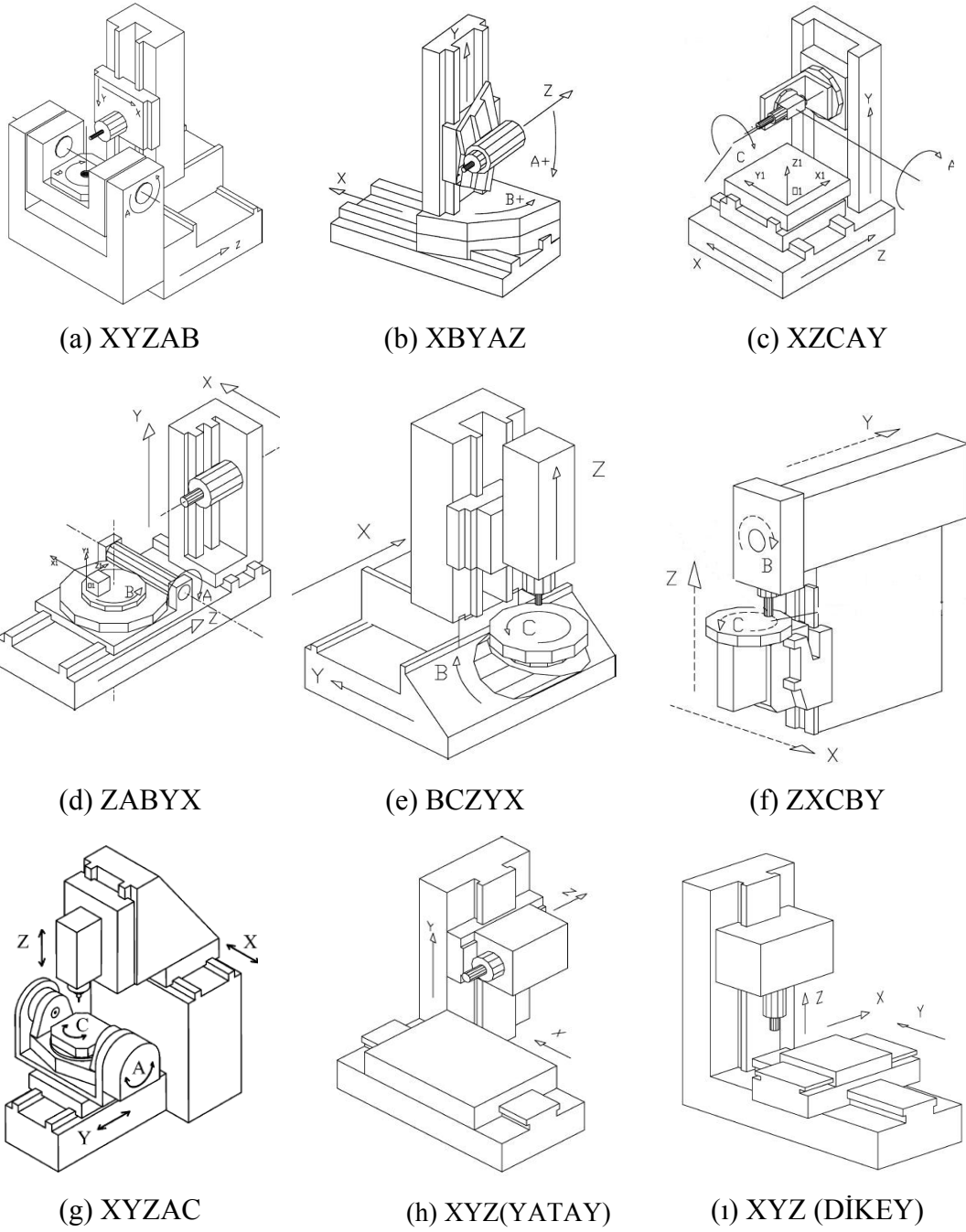
B eksenini *Y* eksenini etrafında dönme.

C eksenini *Z* eksenini etrafında dönme

şeklinde tanımlanmaktadır. Dönel eksenler (*A-B-C*) tezgâh üzerinde dönme-eğilme gibi hareket kabiliyetine sahiptir. Bu şekilde 3 kategoride toplanan tezgâhlar 6 tipte sınıflanmıştır. Bu tezgâh tipleri;

- 1- Tip 1: (P-P-P-A-C) bir dönel tabla (*C*) ve bir eğimli tabla (*A* eksenini)
- 2- Tip 2: (P-P-P-B-A) bir eğimli tabla (*A*) ve bir dönel tabla (*B* eksenini)
- 3- Tip 3: (A-C-P-P-P) bir eğimli takım (*A*) kafası ve bir dönel takım kafası (*C*)
- 4- Tip 4: (B-A-P-P-P) bir dönel takım kafası (*B*) ve bir eğimli takım kafası (*A*)
- 5- Tip 5: (A-P-P-P-C) bir eğimli takım kafası ve bir dönel tabla (*C*)
- 6- Tip 6: (B-P-P-P-A) bir döngüsel kafa (*B*) ve eğimli tabla (*A*)

Şeklinde standartlaşmıştır. Şekil 3.16'da 3 eksen tezgâhlarının yanında bu tezgâh tipleri de gösterilmektedir (Bohez 2002). 5 eksen takım tezgâhlarında işleme yapmak için gerekli takım yolları hesaplandıktan sonra, bu takım yollarının *NC* kodlarına dönüştürülebilmesi için en son adım olan son işlemci basamağından geçirilmesi gerekir. 3 ekseninde bu işlem sadece tezgâh kodlarının belli formatlarda, takım yollarına uyumlu şekilde sıralanması şeklinde yapılmaktadır. Örneğin Fanuc kontrol ünitesine sahip bir tezgâha uygun formatta dönüşüm yapılırken APT programlama dilinde takıma verilen bir GOTO hareket kodu G1 olarak çevrilerek yanına gerekli takım koordinatları yazılmaktadır. Bu dönüşüm işlemi basit bir kelime işlemcisi vasıtasıyla yapılabilir. Fakat 5 eksen işlemede, her tip tezgâhta farklı bir eksen takımı kullanılması ve dönel eksen takımı mafsal uzunluklarının farklı olmasından dolayı son işlemci aynı zamanda tezgâhın kinematik zincirlerine bağlı olarak koordinat dönüşümü de yapmaktadır.

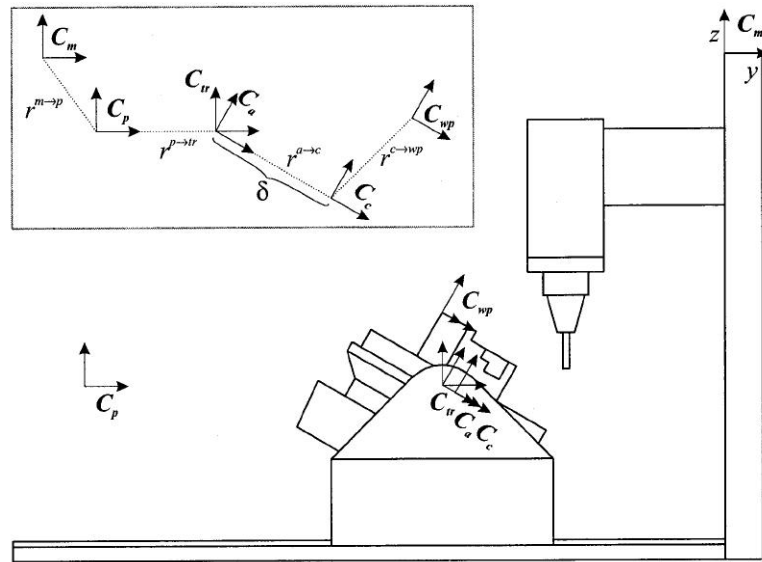


Şekil 3.16. 3-5 Eksen tezgah tipleri

Burada bilinmesi gereken tezgâhın eğilme ve dönme mekanizmasına ve mafsalları uzunluklarına bağlı tezgâh kinematikiğidir. Takım yolları oluşturulup *TK* verileri elde edildikten sonra *NC* kodlarına çevrilirken mutlaka tezgâh mafsalları uzunlukları, iş parçasının tabla üzerindeki konumu ve takım uzunluğuna bağlı değişkenlerle ters kinematik işlemler yapılarak kodlar elde edilmelidir (Chun-Cheng

2007, David 2004). Bu dönüşüm işlemleri için tezgâh ve iş parçası üzerinde koordinat sistemleri oluşturulmuştur. Eğimli-döner (tilt-rotary) tablaya sahip beş eksen dik işleme tezgâhına ait gerekli dönüşümler ve koordinat sistemleri aşağıda Şekil 3.17’de açıklanmıştır.

Makine üreticileri tezgah üzerinde makine koordinat sistemi C_m adında bir koordinat sistemi (global koordinat sistemi) tanımlar. Bu koordinat sistemine ait orijin (home pozisyonu) genelde makinenin pozitif uçlarında olup bu koordinat sisteminde tüm koordinatlar negatif değerlidir. Tüm tezgâh hareketleri bu koordinat sistemine göre yapılır. Tezgâh imalatçıları aynı zamanda dönel ve eğim eksen uzaklıklarının makine koordinat sistemine olan uzaklıklarını da tanımlamak durumundadır. Bu uzaklıklar ters kinematik fonksiyonlarla takım konumlarını gerçek NC kodlarına çevirmede kritik öneme sahiptir. Bu eksen takımının makine koordinat sistemine göre uzaklığı C_p dönel eksen koordinat sistemi olarak adlandırılır. Bu nokta tablanın tam orta noktasıdır. Tabla üzerine yerleştirilen C_{tr} koordinat sistemi tabla ile birlikte hareket eder ve C_m makine koordinat sistemine göre gerçek uzaklığı verir. Bu koordinat sistemi sadece lineer uzaklığı göstermektedir ve tabla eğim ve dönüşüyle açı değiştirmez (David 2004).



Şekil 3.17. Beş eksen (eğimli-döner) tezgâhta oluşan koordinat çerçeveleri

Tezgâh referansdayken C_p ve C_{tr} çakışık durumdadır. C_a ve TT koordinat sistemleri sırasıyla eğim ve dönme açılarını belirtir. Her iki referans sistemi de tabla üzerinde olup C_m ve C_p koordinat sistemine göre hareketlidir. C_a ve TT koordinat sistemi arasındaki uzaklık δ ile gösterilmektedir. Parça koordinat sistemi C_{wp} ise tasarım esnasında parça üzerinde her hangi bir noktaya konumlanmış bir koordinat sistemidir. Bu nokta parçanın makine koordinat sistemine uzaklığını belirtir.

3.3.2. Beş eksen eğimli döner tablalı tezgâhta ileri kinematik

Her hangi bir noktanın, bir koordinat sisteminden diğer bir koordinat sistemine (C_1 - C_2) aktarılması $r^{l \rightarrow 2}$ şeklinde gösterilsin. İlk koordinat sisteminde her hangi bir nokta ise p^l şeklinde gösterilsin. Sonuç olarak makine koordinat sisteminden C_m iş parçası koordinat C_{wp} sistemine geçiş için oluşan toplam dönüşüm aşağıdaki gibidir (Ko 2001).

$$p^m = T_{r^m \rightarrow p} T_{r^p \rightarrow tr} R_{x,a} T_{(0,\delta,0)} R_{z,c} T_{r^c \rightarrow wp} p^{wp} \quad (3.24)$$

Daha sade bir şekilde ;

$$\left[\begin{array}{c|c} \left[\begin{array}{c} R \\ [3 \times 3] \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} T \\ [3 \times 1] \end{array} \right] \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \quad (3.25)$$

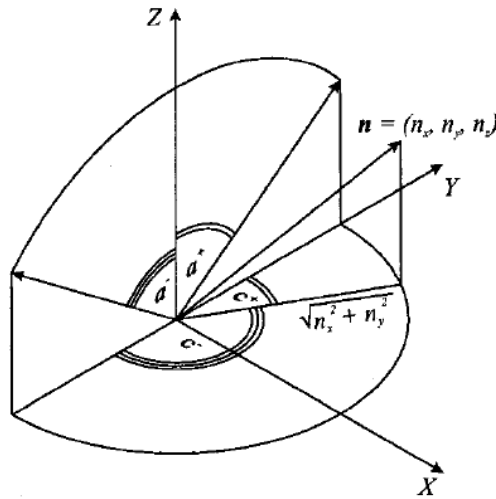
$$R = \begin{bmatrix} \cos(c) & -\sin(c) & 0 \\ \cos(a)\sin(c) & \cos(a)\cos(c) & -\sin(a) \\ \sin(a)\sin(c) & \sin(a)\cos(c) & \cos(a) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos(c)r_x^{c \rightarrow wp} - \sin(c)r_y^{c \rightarrow wp} + r_x^{m \rightarrow p} + r_x^{p \rightarrow tr} \\ \cos(a)\sin(c)r_x^{c \rightarrow wp} + \cos(a)\cos(c)r_y^{c \rightarrow wp} - \sin(a)r_z^{c \rightarrow wp} + r_y^{m \rightarrow p} + r_y^{p \rightarrow tr} + \cos(a)\delta \\ \sin(a)\sin(c)r_x^{c \rightarrow wp} + \sin(a)\cos(c)r_y^{c \rightarrow wp} + \cos(a)r_z^{c \rightarrow wp} + r_z^{m \rightarrow p} + r_z^{p \rightarrow tr} + \sin(a)\delta \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

R matrisinin sütunları iş parçası koordinat sisteminin oryantasyonunun makine koordinat sistemine dönüşümünü sağlar. Benzer olarak T matrisi iş parçası koordinat sisteminin makine koordinat sistemine aktarılmasını sağlar.

3.3.3. Beş eksen eğimli döner tablalı tezgâhta ters kinematik dönüşümler

Beş eksen takım yolu, iş parçası koordinat sistemine göre tanımlanmış takım pozisyonu $t_p = (x, y, z)$ ve takım oryantasyonu için gerekli normal vektörü; $n = (n_x, n_y, n_z)$ serilerinden oluşur. Bu ifadeler kısaca takım konum verisi (*TK DATA*) olarak adlandırılarak ayrı bir dosyada kaydedilir. Bu veriler bir son işlemci vasıtasıyla tezgâha özel, ters kinematik fonksiyonlarla 5 eksen bileşenlerine (X, Y, Z, A, C) çevrilir. Bu çevirme işlemin ilk adımı eğim ve dönme açılarının (A, C) normal vektör yardımıyla hesap edilmesidir. Bu işlemde sonra takım pozisyon koordinatları hesap edilir. Örnek bir normal vektör ve bileşenleri şekil 3.18'de belirtilmiştir.



Şekil 3.18. Normal vektörü bileşenleri a, c açılarının tespiti.

3.3.3.1. Oryantasyon açılarının (a,c) bulunması

Eğimli döner bir tablada takım her hangi bir noktaya belli bir açıda konumlandığı zaman takım oryantasyonu yüzey normali n ile iş parçası koordinat sistemine göre tanımlanır. Takım oryantasyonu, denklem 3.26 kullanılarak R^{-1} matrisinin 3. sütunu ile belirlenir (David 2004).

$$\begin{bmatrix} \sin(a) \sin(c) \\ \sin(a) \cos(c) \\ \cos(a) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Bu ifade kullanılarak a,c açıları ve n oryantasyonu elde edilebilir. Denklem ilk iki satırı kullanılarak aşağıda ki ifadeler elde edilebilir.

$$\frac{n_x}{n_y} = \frac{\sin(a) \sin(c)}{\sin(a) \cos(c)} = \frac{\sin(c)}{\cos(c)} = \tan(c) \quad (3.29)$$

$$c = \tan^{-1}(n_x/n_y).$$

Eğim açısının bulunmasında yine ilk iki satır kullanarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$n_x^2 + n_y^2 = (\sin(a) \sin(c))^2 + (\sin(a) \cos(c))^2 = \sin^2(a) (\sin^2(c) + \cos^2(c)) = \sin^2(a). \quad (3.30)$$

$$\frac{\pm \sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{n_z} = \frac{\sin(a)}{\cos(a)} = \tan(a) \quad (3.31)$$

Eğim açılarının pozitif veya negatif olma durumları şekil 3.19'da belirtilmiştir. Eğim ve dönme açısı global Z eksenine göre tanımlanır. Öncelikle normal vektörün YZ düzlemine iz düşümü bulunur. Z eksenine bu iz düşüme gidebilmek için $+Y$ eksenine doğru dönüyorsa eğim açısı $+$ olur. Negatif durum ise Z ekseninin $-Y$ eksenine doğru eğilmesiyle oluşur. Denklem 3.24'ün kullanılması bazı durumlarda iki farklı sonuç ortaya çıkarabilir. Aynı yüzey normali

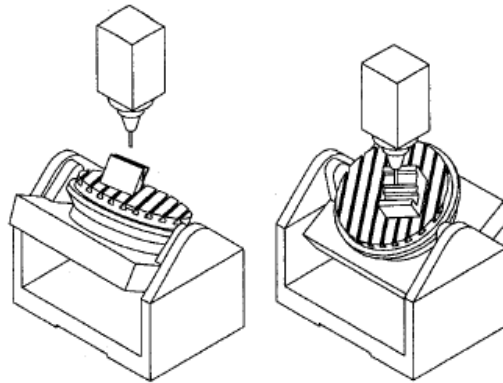
her iki alternatifte de elde edilebilir. Bu durum şekil 3.22’de belirtilmiştir. Denklem 3.24 böyle bir alternatif ortaya çıkardığı için eşitlik 3.32 kullanılması alternatif durumu ortadan kaldırır.

$$\frac{n_y}{n_z} = \frac{\sin(a) \cos(c)}{\cos(a)} = \tan(a) \cos(c) \quad (3.32)$$

Bu denklemde c açısı bir önceki işlemde hesaplandığı için a açısı hesabında alternatif durum ortadan kalkmış olur. Programlamada ise a, c açıları NC kodlarında $a = -A$ ve $c = -C$ şeklinde dönüştürülmelidir.

3.3.4. Beş eksen takım yolu oluşturma metodolojisi

Beş eksen frezelemede takım yolu oluştururken, 3 eksende kullanılan metotlar bir takım zorluklar ortaya çıkarmaktadır. APT tipi takım yolu oluşturma tekniğinde kesin ve doğru bir çözüm üretmesine rağmen nümerik çözümlerin çok fazla zorluk çıkarması zaman kaybına neden olduğu görülmektedir (Hansen ve Arbab 1988).



Şekil 3.19. Tabla pozisyonlamada alternatif oryantasyonlar

C-uzayı metodunun temelini teşkil eden ters takım ofset yüzeyi elde etme tekniği ise, 3 ekseninde olduğu gibi takım oryantasyonuna bağlı sabit bir ofset miktarı elde edilemediği için çok sınırlıdır (Chen ve Ravani 1987). Çünkü bu ters takım ofseti tekniğinde yüzey ofset mesafesi sabit bir takım oryantasyonu ile elde edilebilmektedir. Fakat 5 eksen takım yolu oluştururken her bir TT noktasında farklı bir takım oryantasyonu dolayısıyla farklı bir ofset değerleri gerekmektedir.

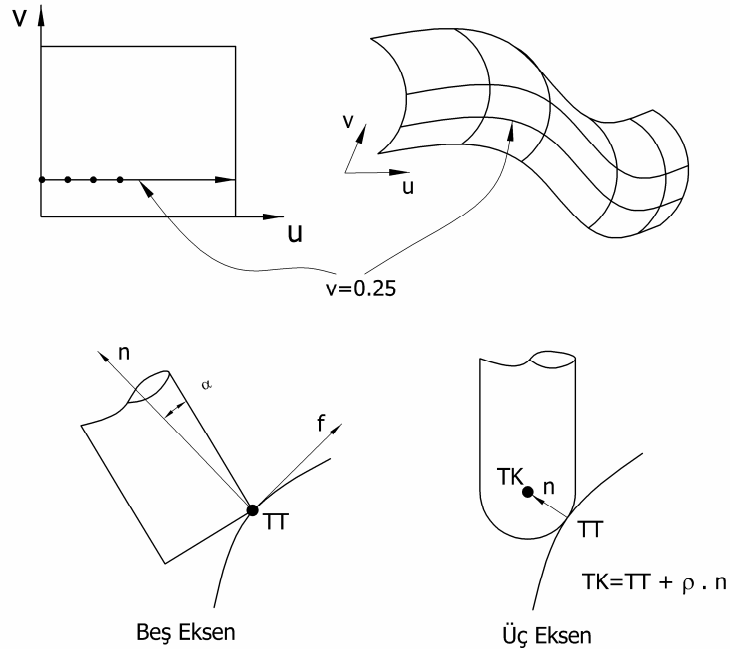
Beş eksen işlemede oluşturulan takım yolları 3 eksene göre çok farklı tekniklerle yapılabilmektedir. Takım yolu oluşturma teknikleri üç eksen takım yolu oluşturma tekniklerine benzemekle beraber, takıma ait 2 adet oryantasyon açısı takım yolu oluşturmada karşımıza çıkmaktadır. Bu iki açı takım pozisyonuna ilave edilirken tezgâh limitleri, talaş kaldırma oranı, dalma durumları ve serbestlik derecelerinin bu tezgâhta beş olduğu da göz önüne alınırsa beş eksen takım yolu oluşturma algoritmalarının çok daha da kompleks bir hal aldığı söylenebilir.

Beş eksen takım yolu oluşturulurken C-uzayı tekniği kontrol edilmesi zor bir hal almaktadır. Bu yüzden C-uzayı yöntemi parçalı olarak yapılabilmektedir. Önce takım konumlandırması ($TT=x,y,z$) için bir C-uzayı, daha sonra bu konuma bağlı ikincil bir iteratif dalma durumu analizi yapıp takım oryantasyonu ($O=\alpha,\beta$) için bir C-uzayı geliştirilmektedir.

5 eksen frezeleme işleminde, takım TT noktasında yüzey normaline göre tam olarak oryantasyon yapmaktadır. Örneğin 5 eksen işlemede kullanılan bir düz uçlu parmak frezeye eğim açısı verilerek takım yüzey eğriliğine tam olarak uydurulabilmektedir. Düz uçlu parmak frezeye verilen bu eğim açısı ile efektif kesici radyüsü değişerek takım küresel uçlu bir takım gibi kesme işlemi yapabilmektedir (Vickers ve Quan 1989). Örneğin 40 mm çaplı bir düz parmak frezeye $\alpha=25^\circ$ eğim açısı ve 4 mm yanıl ilerleme verildiği anda oluşan takım yolu aralıklarındaki yükseltmeler 0.012 mm şeklinde oluşurken, aynı işleme değerlerinde küresel bir takım kullanılırdı oluşan yükseltmeler 0.1 mm şeklinde oluşmaktadır.

Beş eksen frezelemede gerekli takım yollarını oluşturmak için 3 eksen yöntemlerine benzer çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan en basit olanı sabit parametrik artırım kullanan izo-parametrik metottur. Aşağıda şekil 3.20’de bir parametrik alandan bir parça yüzeyine geçiş ve parametrik noktalardan elde edilen TT verilerinden TK verilerinin elde edilmesi gösterilmektedir. Parametrik alanda herhangi bir yönde parametre (u,v) artışıyla parça üzerindeki TT noktaları sırasıyla bulunabilmektedir. Bulunan bu TT noktalarını kullanarak takım yolları için gerekli TK verileri de yüzeyin normali ve takımın durumuna göre hesaplanabilmektedir (Choi 1998).

Yöntem kolay gibi görünse de uygulaması oldukça kompleks ve güçlükler arz etmektedir. Eğrisel bir yüzeyin işlenmesi için gerekli NC programı, lineer interpolasyonla elde edilmiş birçok küçük takım yolu adımlarından (λ) oluşmaktadır. Aynı zamanda her bir izo-parametrik değer artırılmasına tekabül eden takım yolu aralıkları (ω) oluşacak yüzey pürüzlülüğüne direkt etki edeceğinden kontrolü dikkatle yapılmalıdır. Şekil 3.20’de görüldüğü gibi parametrik alanda yapılan eş aralıklı artırımlar (Δv) kartezyen düzlemde eş aralıklar oluşturmamaktadır.



Şekil 3.20. Parametrik alanda yüzey ilişkisi ve 3-5 eksen frezeleme

Çok fazla sayıda yamadan oluşan, içbükey yüzeyler dalma işlemine daha müsaittirler. Daha öncede bahsedildiği gibi 3 eksende kullanılan, APT, izo-parametrik, kartezyen C-uzayı gibi takım yolu oluşturma teknikleri ile 5 eksen işlemede de takım yolu oluşturulabilmektedir. 5 eksen takım yolu oluşturma tekniği daha çok 3 eksende oluşturulmuş *TK* verilerinin takım oryantasyonu eklenerek 5 eksene çıkarılması esasına dayanır.

3.3.4.1 Poligonlaştırılmış yüzeyde takım yolu oluşturma

Beş eksen takım yolu oluşturma tekniklerinde en çok tercih edilen yüzey tanımlama yöntemlerden birisi de yüzeyin poligonlarla tanımlanmasıdır. Bu yöntemde model, parametrik bir yüzey verisinden elde edilerek poligonlaştırılmış (üçgenleştirilmiş) bir yüzey olarak ifade edilmektedir. İşleme yönünün bulunması ve sürekliliği üçgen yüzeylerle dik düzlemlerin kesiştirilmesi ile elde edilir. Takım temas noktaları hesaplandıktan sonra takıma ait oryantasyon genel ve yerel bölgelerde oluşan dalma ve çarpımlar göz önüne alınarak yapılır. Burada yine takımın üçgen yüzey parçalarına temas edip etmediklerini algılayan algoritmalar kurulmaktadır.

Yüzey üzerindeki *TT* noktaları hesap edildikten sonra takım yolları oluşturulabilir. Bu *TT* noktaları bir segment koordinatı listesi şeklinde ifade edilir. Bu *TT* noktaları dikey bir düzlem ile üçgenleştirilmiş yüzeyin kesiştirilmesi ile elde edilir. *TK* noktaları arasındaki adım uzunluğunun kontrolü *TT* noktaları arasındaki artışla kontrol edilebilmektedir. *TT* noktaları elde edildikten sonra direkt olarak *TK* verilerinin elde edilmesi poligonlaştırma işleminin aynı zamanda takım adım uzunluğunu da (λ) poligonlaştırma işlemi esnasında yüzeye göre ayarlamış olmasından kaynaklanmaktadır. *TT* noktaları bulunup indekslendikten sonra yapılması gereken işlem dalmaya bağlı takım oryantasyonunun ayarlanmasıdır. Bu işlemler için kullanılan temel prosedür sırasıyla şu şekildedir.

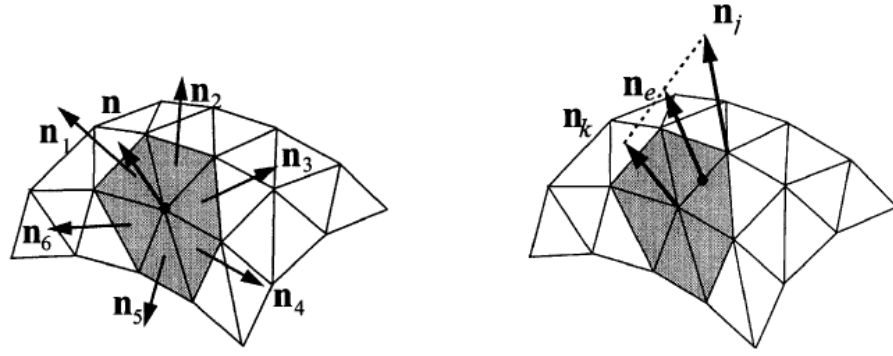
- 1-Belli bir toleransa göre parametrik yüzey çokgenleştirme işlemi.
- 2- Takımın adım uzunluğu dikkate alınarak TT noktalarının bulunması.
- 3- TK verilerinin elde edilmesi
- 4- Duvarlar ve derin içbükey yüzeyler dikkate alınarak dalma ve çarpma eliminasyonu için takım oryantasyonunun yapılması.

3.3.4.1.1. Parametrik yüzeyin çokgenleştirilmesi

Bir parça yüzeyi genellikle parametrik yüzey yamalarından oluşmaktadır. Bu yüzeyler çok küçük boyutlarda çokgenlere bölünerek (dikdörtgen, üçgen) belli tolerans değerinde yaklaşık olarak ifadesi mümkün olmaktadır. Böylelikle yüzeyler üçgen yüzey setleri (STS, Surface Triangle Set) ile ifade edilebilir. Eğrisel bir yüzeyin yüzey üçgen setlerine dönüştüren birçok yöntem vardır (Austin 1997).

3 eksen takım yolu oluşturma tekniğinde kullanılan ve yüzeyin noktalarla ifadesi olan Z -haritaları ve EZ -haritaları 3 eksen küresel takımla frezeleme için idealken, bu teknik 5 eksen de özellikle düz uçlu bir freze için etkili bir teknik değildir. Aynı eşdeğerde bir hassasiyet için Z -haritasından daha az üçgenleştirme noktası elde edilmesi gerekir. Örnek olarak izin verilebilir hata oranı 0.01 mm, takım çapı 10 mm, 10x10 mm dikdörtgensel bir alanı küresel takım için 333 ve düz uçlu takım için 250.000 Z -harita noktası ile tanımlanması gerekirken aynı işlem sadece 2 üçgenleştirme verisi ile tanımlanabilmektedir.

Poligonlaştırma işlemi matematiksel işlemleri kolaylaştırmak ve mümkün olan dalma ve girişimlerin tespitinin güvenilirliği artırması, yüzey normaline bağlı takım oryantasyonunun bulunması, kesme kenar yükseltilerinin hesaplanması gibi bütün takım yolu oluşturma adımlarında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu üçgenleştirme işlemi ve her bir üçgene ait normal vektör analizleri aşağıda şekil 3.21'de görülmektedir.



Şekil 3.21. Yüzey üçgenleştirme ve normal vektörü analizi.

Üçgenleştirme işleminde yüzey belli sürücü düzlemlerle dilimlenerek belli sayıda nokta oluşturularak, köşeler dizini elde edilir. Altı adet üçgenden oluşan çokgenin ortasındaki ortak normal vektörü çokgeni oluşturan üçgenlere ait üçgen normallerinin lineer interpolasyonu ile elde edilebilir (Jun 2003).

$$n = \text{normalleştirme} \left(\sum d_i^w n_i \right) \quad (3.33)$$

n_i : i nci üçgenin normal vektörü, d_i : üçgen ağırlık merkezi ile köşe arasındaki mesafe, w : ağırlık faktörüdür. Kenarlara ait normal vektör, n_e köşelerdeki n_j ve n_k vektörlerinin lineer enterpolasyonu ile hesaplanmaktadır (Jun 2003).

$$t \in [0,1]$$

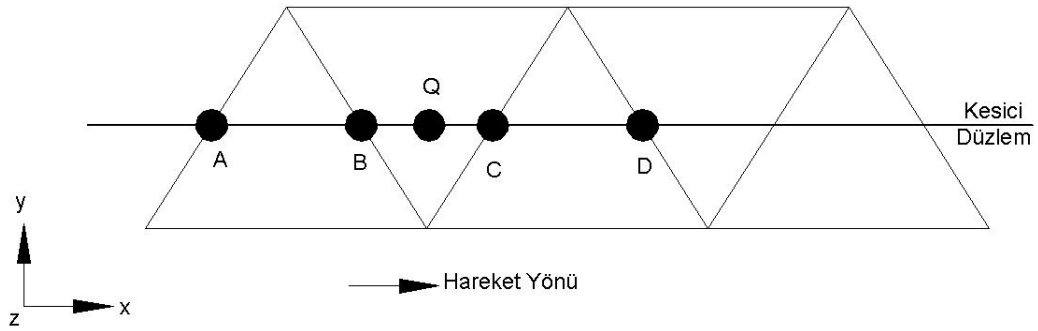
$$n_e(t) = \text{normalleştir} ((1-t) n_j + t n_k) \quad (3.34)$$

3.3.4.1.2. Takım temas verilerinin bulunması

Beş eksen işleminde gerekli olan TK verileri iki yaklaşımla oluşturulabilir. Bunlardan birincisi direkt TK verilerinin parça yüzeyinden elde edilmesi diğeri, parça yüzeyindeki TT verilerinden TK verilerinin elde edilmesidir. Direkt TT verilerinin elde edilmesinde takım direkt parça yüzeyine düşürülür ve bazı sabitler kullanılarak TK verisi elde edilir. Bu yöntem 5 eksen frezeleme için, TT noktasının ve oryantasyonun

bulunabilmesi açısından çok zor ve karışık bir yöntemdir. Bu yüzden alternatif yöntem olan TT verisinden TK verisinin elde edilmesi çok daha kolay ve güvenli olduğundan dolayı tercih edilmektedir. Bu yöntemde takım pozisyonlaması ve oryantasyonu rahatlıkla hesap edilebilmekte, parça yüzeyi ile takım arasında dalma ve çarpma kontrol altına alınabilmektedir. Bu yöntemde TT noktalarının koordinatları, bir ortogonal düzlem (XY,ZX,ZY) ile üçgen yüzey setlerinin kesişmesi ile elde edilir. Daha farklı takım yolu oluşturmak için kesici düzlem istenilen açıda ayarlanabilir.

Birbirine komşu TT noktaları arasındaki uzaklık, kesici düzlemin üçgenleri kestiği noktalar arasındaki uzaklıkla orantılıdır. Aşağıda şekil 3.22’de kesici düzlem ile üçgen setlerinin kesişmesi gösterilmektedir.



Şekil 3.22. Kesici düzlem ile üçgenlerin kesişmesi ile köşelerin oluşması

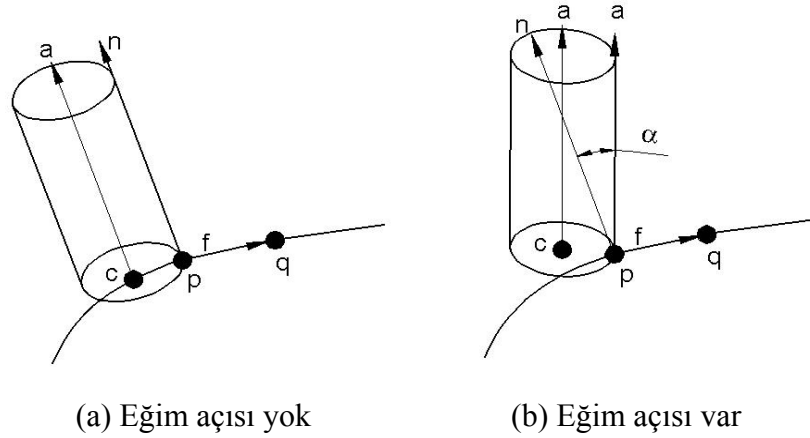
Takım yolu adımları (λ) yüzeyi tam ifade eden üçgen verilerden elde edildiği için, takımın hareketleri yüzeye tam olarak uymaktadır. Bu durum takım adımlarının uygunluğunun doğrulanması için basit bir çözüm sunmaktadır. Yukarıda şekil 3.25’de belirtildiği gibi hareket yönü (+x) istikametinde AB, segmenti kesici düzlemle üçgenlerin kesiştiği noktalardan meydana gelmiştir. B’den az bir miktarda ilerleme ile Q noktası elde edilmiş ve bu nokta BC segmentine dâhil edilerek işleme hareket yönünde tüm üçgenler bitene kadar devam edilmiştir.

3.3.4.1.3. TK verilerinin bulunması

TT noktasında parça yüzeyine teğet olarak temas eden takımın merkez koordinatları TT verisi olarak adlandırılır. Bu noktaların bulunabilmesi için, TT noktasındaki yüzey normal vektörü ve takım eksen vektörleri ile çözüm aranmalıdır. TT noktasında yüzey normaline dik olan ve takımın taban düzlemine paralel olan düzlemde takım radyüsü daire şeklindedir ve takım radyüsüne eşittir.

Doğru bir TK verisinin elde edilebilmesi için TT noktasında oluşan bu takım merkezi düzlemine ait yüzey normal vektörü, ilerleme yön vektörü, takım eksen vektörü bilinmelidir. Aşağıda şekil 3.23’de gösterildiği gibi her hangi bir TT noktasında bulunan vektörler şu şekildedir (Jun 2003).

- 1- Aktif TT noktası p 'ye ait yüzey normal vektörü
- 2- Takım eksen vektörü 'a' (düz parmak freze)
- 3- İlerleme yön vektörü 'f' (p 'den q noktasına doğru)



Şekil 3.23. Kesici takım merkezinin ofsetlenmesi

Şekil 3.23(a)'da görüldüğü gibi eğim açısı verilmemişken yüzey normali ' n ' ve takım eksen vektörü ' a ' birbirine paralel ve takım ilerleme yön vektörü ' f ' diktir. Takım merkez noktası ' c ' takım merkezi düzlemi ile takım taban dairesinin kesişim noktasındadır. Takım merkezi düzlemine ait TT noktasındaki normal vektör $t=n \times f$ şeklinde ifade edilir. Bu durumda c noktası aşağıdaki formülasyonla bulunur (Lo 1999).

$$c = p - \rho.f \quad (3.35)$$

Burada ρ kesici takım radyüsünü belirtmektedir. Şekil 3.23(b)'de ise bir miktar eğim açısı (α) verilmiş bir takım-yüzey durumu görülmektedir. Eğim açısı takımın yüzey normaline göre bir miktar yatırılması ile elde edilmektedir. Eğrisel bir yüzey boyunca yüzey normali de sürekli değişmektedir. TT noktalarının XY düzlemi üzerine izdüşümü düz bir çizgi şeklinde olurken TK noktalarının aynı şekilde düz olması beklenemez. Bu uygulama aslında sadece eğim açısı ile sınırlı kalmaz. Takım bazen iş parçası etrafında yüzey normali ekseninde döndürülebilir. Bu döndürme işlemi dalma olayını ortadan kaldıracabileceği gibi eğim açısının tezgâh limit değerlere ulaşmasının da önüne geçer.

3.3.4.1.4. Takım pozisyonuna bağlı dalma kontrolü ve düzeltilmesi

Dalma olayının olup olmadığı, TT verisinden TK verisi elde edildikten sonra mutlaka yapılması gereken bir durumdur. Dalma durumu ortaya çıkmış ise yeni oryantasyon açıları belirlenip TK verisi güncellenmelidir. Bir TK verisi ancak takım ile yüzey arasında bir dalma gerçekleşmediği takdirde kabul edilebilir. Eğrisel yüzeyler işlenirken, kesici ucun istenmeyen bölgelere talaş kaldırarak dalması ve takım gövde-tutucusunun istenmeyen yüzeylere hızla çarpması takım yollarının oluşturulmasındaki en önemli 2 ana problemdir. Şekil 3.24(a,b)'de görüldüğü gibi 2 tip dalma vardır. Bunlar yerel dalma ve geri dalmadır. Şekil 3.24(c)'de ise global çarpışma gösterilmiştir. Yerel dalma, takımın parça yüzeyine temas ettiği nokta olan

dalma durumu kontrol edilecektir. Dalma olayı çözüldükten sonra bir sonraki TT noktası için işleme devam edilecektir.

Dalma durumu üçgenlerin köşe noktalarında, kenar noktalarında veya üçgenlerin içinde gerçekleşebilmektedir. Dalma işleminin oluşup oluşmadığı için ise çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algılama işlemini hızlandırmak için dalma taraması önce köşe sonra kenar ve en son üçgenin içinde aranmalıdır.

3.3.5. Beş eksen frezelemede takım oryantasyon açıları.

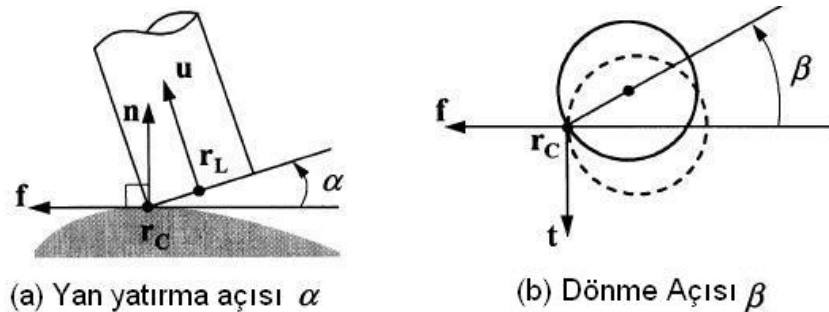
Beş eksen frezelemede kullanılan 2 temel açı aşağıda şekil 3.25'de gösterilmektedir. Şekil 3.28(a)'da gösterilen eğim açısı, takımın temas noktası etrafında eğim verilmesi ile oluşmaktadır. Burada kullanılan 3 temel birim vektör ve TT noktası (f, t, n, r_c) TT -koordinat sistemi olarak adlandırılan yerel bir koordinat sistemi oluşturur (Jun, 2003). Şekil 3.25(a,b)'de görülen bu yerel TT -koordinat sisteminde;

r_c : TT noktasını

f : Yüzeye teğet olan ve takım ilerleme yönünü belirten birim vektörünü

n : Yüzeyin normaline ait birim vektörü

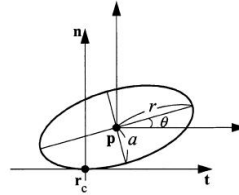
t : Yüzeye teğet birim vektörünü ($t=f \times n$) simgelemektedir.



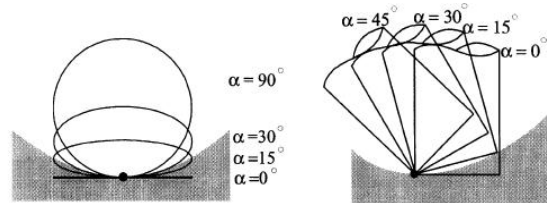
Şekil 3.25. Eğim ve dönme açısı

Düz uçlu parmak frezenin takım eksen vektörü u birim vektörü ile gösterilirse takım eğim açısı α : n vektörü ile u vektörü arasında kalan açıdır. Şekil 3.25(b)'de ise 5 eksen frezelemede kullanılan dönme açısı görülmektedir.

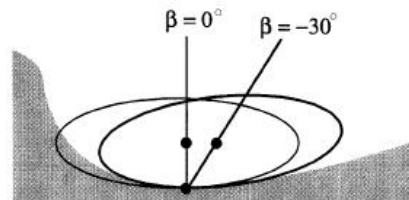
Dönme açısı parçanın yüzey normalini eksen kabul ederek, TT noktası etrafında parçanın çevrilmesi ile oluşur. Takım oryantasyonu bu iki açı ile (α, β) ile belirlenir. Şekil 3.26'da görüldüğü gibi takıma her hangi bir oryantasyon açısı verildiği takdirde kesici takımın kesme yapan noktasındaki iz düşüm profili değişmektedir. Serbest şekilli yüzeylerin işlenmesinde, istenmeyen dalmalardan kaçınmak ve takım profilini yüzeye uydurmak için takım TT noktasında α açısı ile hem yana doğru yatırılıp aynı zamanda β açısıyla yüzey normali etrafında çevrilerek kesici profilin şekli kesilen parça profiline uydurulabilir. Şekil 3.26(a)'da düz uçlu bir kesicinin taban yüzeyinin f ilerleme yönünden bakılmasıyla elde edilen kesici profili görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi $t-n$ düzleminde oluşan bu geometri bir elips oluşturur ve efektif kesici elipsi olarak adlandırılır (Jun ve ark. 2003).



(a) Takım oryantasyonu ile değişen kesici elipsi



(b) Eğim açısının (α) etkileri



(c) Dönme açısının (β) etkileri

Şekil 3.26. Yan yatırma ve dönme açısının etkileri

Şekil 3.26(b,c)'de görüldüğü gibi bu iki açı değiştirilerek elde edilen efektif kesici elipsi, işlenecek yüzeye rahatlıkla uydurulabilir. Eğim açısı α negatif olmayan ve 0 ile 90° arasında bir değere sahip iken dönme açısı β negatif değerler alabilmektedir. Bir takım oryantasyonuna bağlı TK verisinin hesabında her iki açıda etki etmektedir. Bir TT noktasında oluşturulan koordinat çerçevesi $C = (r_c, n, f, t)$ şeklinde oluşmaktadır. Takım oryantasyonu $O=(\alpha, \beta)$ ve TK verisi $TK = (r_c, n)$ şeklinde ifade edilir. Kesici takım vektörü a , yüzey normali n , ilerleme yön vektörü f , teğet vektör t , TT noktası r_c ve TK noktası p olmak üzere takım oryantasyonuna bağlı takım eksen vektörü a ve takım konumu p noktası ise;

$$a = \cos \alpha \cdot n + \sin \alpha (\cos \beta \cdot f + \sin \beta \cdot t) \quad (3.36)$$

$$p = r_c + \rho \cdot (n - (a \cdot n) / (1 - (a \cdot n)^2)^{1/2}, \quad \text{eğer } a \cdot n \neq 1 \text{ ise} \quad (3.37)$$

$$p = r_c - \rho (\cos \beta \cdot f + \sin \beta \cdot t), \quad \text{eğer } a \cdot n = 1 \text{ ise} \quad (3.38)$$

şeklinde bulunur (Lo 1999).

3.3.6. C-Uzayı metodunda beş eksen takım yolu oluşturma

Beş eksen takım yolu uygulamalarında C-uzayı tekniğinin uygulanması karmaşık olmasından dolayı iki aşamalı olarak uygulanmaktadır. İlk aşama TT noktasına pozisyonlama, ikinci aşama ise pozisyona bağlı kalarak takım oryantasyonunun (O) bulunması için kurulan C-uzayıdır. Bu iki adımdan sonra yapılması gereken işlem, pozisyona ve oryantasyona bağlı TK verilerinin hesap edilmesidir.

3.3.6.1. C-uzayı metoduyla takım pozisyonunun bulunması

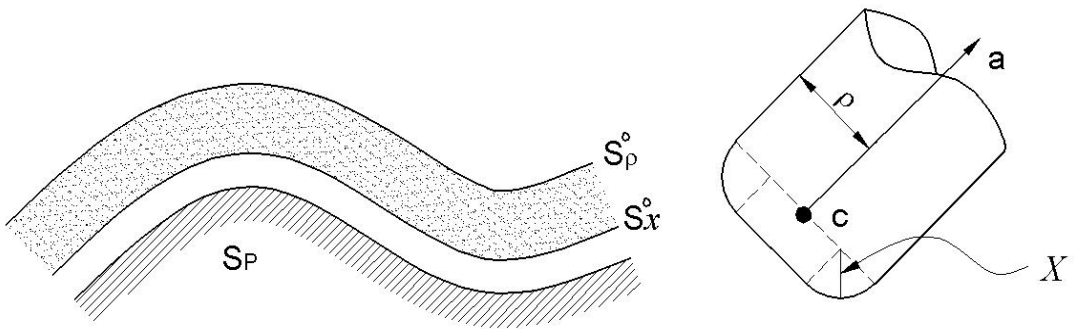
Verilen bir S_p yüzeyinin, köşeleri radyüslü bir takım ile 5 eksenle işlenmesi için kurulan C-Uzayı aşağıda şekil 3.27’de belirtilmektedir. Bu teknikte öncelikle 2 adet ofset yüzey elde edilmelidir. Şekil 3.27’de görüldüğü gibi ofset yüzeyler S_p^o tasarım yüzeyinin ρ kadar ve S_x^o yüzeyi ise takım köşe radyüsü kadar ofsetlenmesi ile elde edilmiştir. Bu iki ofset yüzey arasında kalan bölüm TK hacmi V_{TK} olarak sınırlandırılmıştır. Burada kullanılan takım düz uçlu bir takım olursa $S_x^o \equiv S_p$ şekline, küresel bir takım olursa $S_x^o \equiv S_p^o$ şekline dönüşmektedir (Choi 1998).

$\lambda(c,a)$ takım eksen çizgisinin ifade etmektedir.

$$\lambda(c,a): r(t) = c + t \cdot a \quad 0 \leq t \leq L \quad (3.39)$$

L takım uzunluğu, takım konum verisi ise $L=(c,a)$ şeklinde gösterilmekte ve bundan sonraki adımlar takım konumunun geçerliliğine bağlıdır. Bu geçerlilik;

- TK noktası TK hacminde yani V_{TK} içinde olmalıdır.
- $\lambda(c,a)$ ile S_p^o arasında sadece 1 adet kesişme noktası bulunmalıdır.



Şekil 3.27. Takım pozisyonlama için kurulan C-uzayı

Birinci şart sadece dalmaları engellemek için öngörülmekte fakat bunu garanti etmemektedir. 2 şart ise takımın dalma ve çarpma olmaksızın sadece 1 noktada teğetsel bir nokta temasının olması gerektiğini şart koşturmaktadır. Tüm küresel ve yanal (silindirik) frezeleme işleminde TK hacmi takım yarıçapının (ρ) kadar ofsetlenmesi ile elde edilen yüzey sınırı kadardır. Böylece yukarıda bahsedilen ve dalma olayını engelleyen 2 şart şu şekilde düzenlenebilir (Choi 1998).

- TK noktası ρ ofset yüzeyi üzerinde olmalıdır. $c \in S_\rho^0$
- Takım eksen çizgisi $\lambda(c,a)$, S_ρ^0 ofset yüzeyini tek noktada kesmelidir.

3.3.6.2. C-uzayı taraması ile takım oryantasyonunun bulunması

Parametrik yüzeylerin ifade edilmesinde kullanılan yüzeylere ait üçgenleştirme tekniği takım oryantasyonunda dalma ve çarpışmaların tespitinde de kullanılabilir. Daha önce üç eksen frezeleme işleminde takım yolu oluşturulurken kullanılan şekil uzayı C-uzayı 5 eksen frezelemede takım oryantasyonunun bulunmasında da kullanılmaktadır.

C-uzayı metoduyla her bir TT noktasının dalma ve çarpışma durumları tespit edilip önlenirken aynı zamanda uygun bir frezeleme için gerekli takım yollarının da talaş kaldırma oranı göz önüne alınarak optimizasyonu sağlanabilmektedir. Şekil uzayında tezgâhın oryantasyon limitleri de göz önüne alınarak takımın bu oryantasyonu limitlerine yaklaşmaması sağlanabilir. Her bir TT noktasında takımın yaptığı oryantasyona bağlı aşırı açı değişiklikleri de engellenerek yüksek hızda işleme tekniğine uygun, yumuşak bir NC takım yolu oluşturulabilmektedir. Bazı uygulamalarda da eğim açısı parça profiline göre sınırlandırılabilir. Örneğin bir gemi pervanesinin işlenmesinde herhangi bir kanat kısmı işlenirken takım, iki kanat arasında talaş kaldırmaktadır. Alt kısımdaki pervane kanadı işlenirken çok fazla eğim açısı verildiği zaman takım üst kısımdaki pervane kanadına çarpabilmektedir. Böyle bir durumda şekil uzayında takım oryantasyonunda α , β 'ya

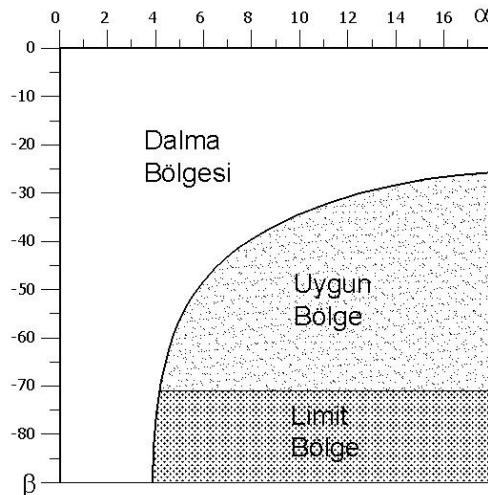
kısıtlar girilerek ($\alpha \in [2^\circ -15^\circ]$, $\beta \in [-85^\circ, 0]$) takımın sürekli eğik bir vaziyette alt kısımdaki kanattan talaş kaldırması sağlanabilmektedir (Choi ve ark 1991). Şekil 3.28'de bir kesici oryantasyon haritası ve üç temel bölge gösterilmektedir. Şekil uzayı metoduyla takım oryantasyonu belirlenirken, kesici oryantasyon haritası olarak adlandırılan bir grafik oluşturulmaktadır. Bu haritada 3 temel bölge vardır. Bu bölgeler;

Dalma/çarpma bölgesi: Takımın parçaya daldığı veya çarptığı bölgeyi

Uygun bölge: Dalma ve çarpmanın oluşmadığı uygun oryantasyon bölgesini

Limit bölge: Tezgâhın erişemediği limit açılı bölgeleri veya parçaya göre kullanıcı tarafından girilen kısıt bölgelerini temsil etmektedir.

Şekil uzayı oluşturulup uygun bölge alanı belirlendikten sonra bu uygun bölgeden seçilecek α, β takım oryantasyon açıları bir optimizasyon işlemine tabi tutulabilir. Burada göz önüne alınması gereken optimizasyon değişkenleri, takım oryantasyonuna ve yanal ilerlemeye bağlı değişen maksimum izin verilebilir kesme kenar yükselteleri, talaş kaldırma oranı, işleme zamanı ve yumuşak takım yollarının oluşturulması gibi birbirini etkileyen değişkenlerdir.



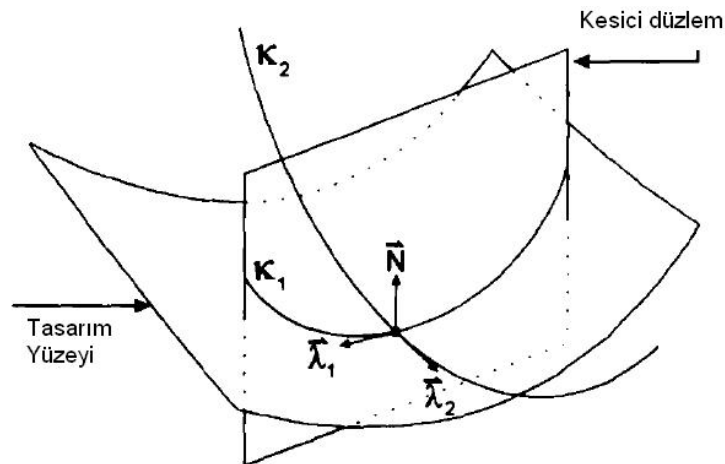
Şekil 3.28. Kesici oryantasyon haritasında bölgelerin gösterimi

3.3.7. Eğrilik eşleştirmeye bağlı takım yolu oluşturma ve takım oryantasyonu

Bir frezeleme takımı, talaş kaldırdığı yüzeye oryantasyon açılarının ayarlanması ile takım eğriliği ve yüzey eğriliği bir birine uydurularak pozisyonlanabilmektedir. Bu işlem içbükey yüzeylerde daha büyük önem arz eder. İşlenecek bu içbükey yüzeyler dairesel, parabolik, hiperbolik veya eğriliği işleme boyunca değişen B-Spline-NURBS yüzeyler olabilir.

Yüzey eğriliği eşleştirme metodu hakkında 2 temel çalışma yapılmıştır. Bunlardan ilki birincil eksen (Rao ve ark 1997), diğeri ise takım seçimi üzerine yapılmıştır (Jensen ve ark. 2001). Rao ve ark. yapmış olduğu çalışmada 5 eksen işleme yapılırken, takımın yaptığı yanal ilerlemeye ve takım oryantasyonuyla değişen kesici geometrisine bağlı aralarda kalan kesme kenar yükseltilerinin azaltılması için bir metot geliştirmişlerdir. Bu metotta yüzey eğriliği ve kesici takım profili eğriliğinin birbirine eşleştirilmesi hakkında nümerik bir simülasyon çalışması yapılmıştır.

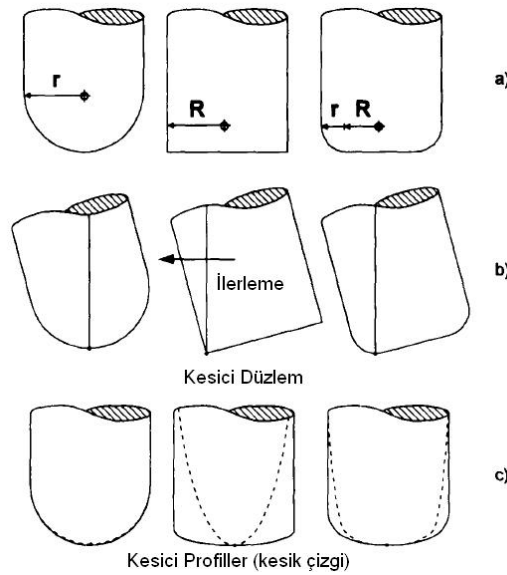
Bu metot, tasarım yüzeyinin her hangi bir noktasından bir kesici düzlem geçirilmesi ve düzlemin o noktada oluşan yüzey normali etrafında döndürülmesi ile oluşturulan maksimum κ_1 ve minimum κ_2 eğriliklerin hesabını içermektedir. Aşağıda şekil 3.29’da bu kesici düzlem ve oluşan eğrilikler ifade edilmiştir.



Şekil 3.29. Tasarım yüzeyinin kesici düzlemlerle kesilmesi ile oluşan eğrilikler

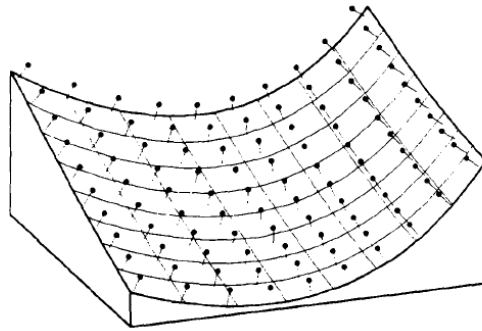
Her hangi bir takıma eğim açısı verildiği takdirde kesme profili değişir. Kesme profili değişen takımın her iki yönde de eğriliğinin eğim açısına bağlı olarak bilinmesi gerekir. Bu iki yöndeki eğrilik değerleri yüzey eğriliğine uydurulabilirse kesme kenar yükseltisi (h) / yanal kayma (ω) oranı düşer. Böylelikle işleme zamanı oldukça düşürülmüş olur. Aşağıda şekil 3.30'da 5 eksen işlemede genel olarak kullanılan 3 tip takıma ait kesici profili değişimi görülmektedir. Kesici düzlem ilerleme yönüne diktir. 3 eksen frezelemede küresel ve radyüslü takıma ait eğrilik düz uçlu parmak frezeyle göre daha kullanışlı olmasından dolayı bu takımların işlerken oluşturduğu yüzey pürüzlülüğü daha az olması beklenir. Fakat 5 eksen düz takım eğriliğinin eşleşmesi bakımından daha kullanışlıdır. Küresel takıma ne kadar eğim verilirse verilsin eğrilik değişmemektedir. Radyüslü takımın ise sabit bir maksimum eğriliği vardır. Bu değer $\kappa_{T1}=1/r$ şeklinde hesaplanabilir. Minimum eğrilik ise $\kappa_{T2}=(\sin \alpha) / [R+r (\sin \alpha)]$ şeklinde hesaplanır (Rao 1997).

Bu iki ifade ile her iki yöndeki takım eğriliği bulunur. Bu eğrilikler takım temas noktalarında yüzeyle bir birine uydurularak özellikle iç bükey noktalarda oldukça etkin bir frezeleme sağlanır. Eğriliklerin uydurulma işlemi şekil 3.29'da belirtilen yön vektörlerine ait $[\lambda_1 \lambda_2 N]$ bir üçlü transformasyon matrisi ile yapılmaktadır (Rao 1997).

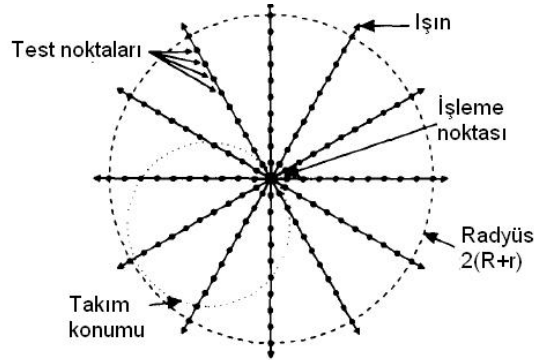


Şekil 3.30. Küresel, düz, köşeleri yuvarlatılmış takım için kesici profilleri

Bu metotta TT noktaları ofset tekniği ile bulunur. Ofset tekniği takıma göre yüzey normallerini kullanarak elde edilmektedir. Aşağıda şekil 3.31’de yüzey normallerinin ofsetlenerek elde edilen noktalar belirtilmektedir. Bu yöntemde elde edilen takım temas noktası ve oryantasyon açıları belirlendikten sonra dalma analizi ve varsa eleminasyon işlemi yapılmalıdır. Bu işlem için yine farklı bir algoritma geliştirilmiştir. Dalma analizi için, takım temas noktası merkez kabul edilerek yarıçapı $2(R+r)$ olan bir daire alanı belirlenir. İşleme noktasından daire etrafına ışınlar çizilir ve bu ışınlar üzerine test noktaları oluşturulur. Aşağıda şekil 3.32’de bu belirlenen daire alanı gösterilmiştir. Bu noktalardan her biri ile o noktaya göre parametrik yüzey arasında dalma durumları analiz edilir. Dalma durumu ortaya çıktığı zaman dalmanın düzeltilmesi için eğim açısı değiştirilmelidir. Eğim açısı değiştiği zaman değişen kesici profili tekrar yüzey eğrilğine uyup uymadığı kontrol edilir.



Şekil 3.31. Yüzey normallerinin ofsetlenmesi



Şekil 3.32. Dalma analizi için test noktası deseni

Bu çalışmada yüzey eğriliğinin bulunmasında çeşitli teknikler geliştirmiş ve bu eğriliklere göre kesici takım seçim kriterleri geliştirmişlerdir. En temel yüzey eğriliği yüzey denklemlerinin diferansiyel özellikleri kullanarak bulunmaktadır. Fakat burada tanımlanan yüzey denklemleri çok komplikedir. Bir diğer eğrilik bulma yöntemi ise takım ile yüzey temas noktasında ortak teğetlere sahip küreler oluşturmaktır. Bu küre ile yüzey temas noktası ortak bir teğet düzleme sahiptir. Kürenin radyüsü ρ_n ve yüzeyin normal eğriliği κ_n ise $\rho_n = 1/\kappa_n$ şeklinde hesaplanır.

Yüzey eşleştirme yapılırken her iki yöndeki teğet vektörlerinin bulunduğu yöne ait eğriliklerin takım oryantasyonu ile değişen takım eğriliğinden küçük veya eşit olması gerekir. Takım eğriliği takım boyutuna ve oryantasyon açlarına bağlı olarak değişmektedir. Aşağıda takıma ait her iki yönde temel eğriliklerin matematiksel ifadesi yer almaktadır (Jensen ve ark 2002).

$$|\kappa_1| = \left| \frac{r_t z_{tt} - z_t r_{tt}}{\sqrt{(r_t^2 + z_t^2)^3}} \right| \quad (3.40)$$

$$|\kappa_2| = \frac{1}{r} |\cos \varphi| = \left| \frac{z_t}{r \sqrt{r_t^2 + z_t^2}} \right| \quad (3.41)$$

Bu iki eğrilikten κ_1 yüzeyin meridyenine teğet, diğeri κ_2 ise paralele teğet olan temel eğriliklerin ifadesidir. Burada r_t ve z_t t 'ye bağlı bir profil fonksiyonudur. Köşesi yuvarlatılmış bir takımın yüzeyi, bir eksen etrafında döndürülen daireye benzetilerek bir simit şeklini alır. Bu yüzeyin matematiksel olarak ifadesi aşağıdaki gibidir (Jensen ve ark 2002).

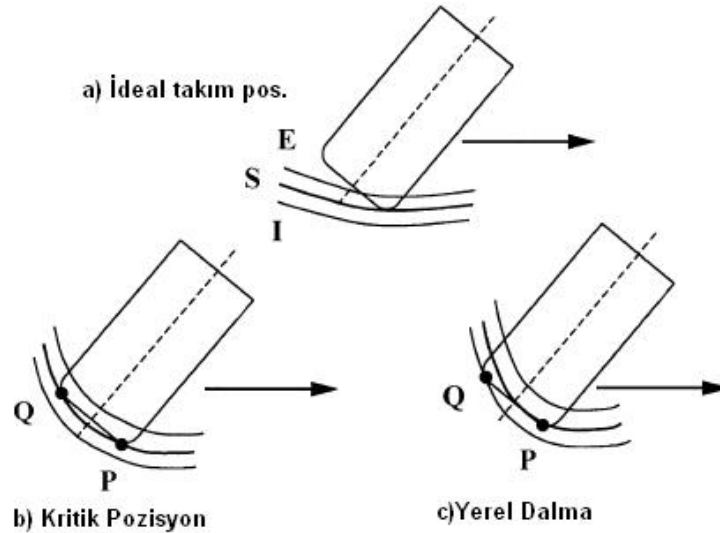
$$r(t) = r_l + r_f \cos t \quad (3.42)$$

$$z(t) = r_f (1 - \sin t) \quad 0 \leq t \leq \pi/2 \quad (3.43)$$

Düz uçlu ve radyüse sahip olmayan bir freze takımı için $r_l = R$ ve $r_f = 0$ alınabilir. Aşağıdaki eşitliklerde belirtilen profil fonksiyonları kullanılarak bir simit yüzeyinin eğriliği elde edilir (Jensen 2002).

$$\kappa_1 = \frac{1}{r_f}; \quad \kappa_2 = \frac{\cos t}{r_1 + r_f \cos t} \quad (3.44)$$

Takım oryantasyonuna bağlı olarak değişen eğrilik, yüzey eğriliğine göre uyumsuz olduğu zaman dalma olayı meydana gelir. Bu dalma olayı belli bir sınır toleransına kadar kabul edilebilir. Bu işleme toleransı istenen yüzeyin altında ve üstünde olabilir. Bir eğrisel $S(u,v)$ parametrik yüzeyin maksimum toleransı δ_o , minimum toleransı δ_i olup, burada oluşan işleme hatası e ; $\delta_o \leq e \leq \delta_i$ şeklinde ifade edilebilir. δ_o dış tolerans, δ_i dış tolerans olarak ifade edilir. Her iki tolerans değerine bağlı olarak $S(u,v)$ yüzeyinin altında I ve yüzeyin üzerinde E ile ifade edilen iki yeni ofset yüzeyi oluşturulur. Oluşturulan bu iki yeni yüzey arasında takımın temas ettiği nokta ve oryantasyona göre dalmalar kontrol edilebilir. Aşağıdaki şekil 3.33'de bu yüzey ve takım durumları gösterilmektedir (Jensen 2002).



Şekil 3.33. İdeal - kritik takım pozisyonu ve yerel dalma

Yukarıdaki şekle göre oluşan dış ve iç yüzeyler, n yüzey normali birim vektörü olmak üzere ;

$$E = S + \delta_o n \quad (3.45)$$

$$I = S + \delta_i n \quad (3.46)$$

şeklinde oluşmaktadır. Takım temas noktası P ve takım geri temas noktası Q olarak adlandırılırsa, Q noktasının yüzeyin üzerinde olması bitirme operasyonu için en ideal pozisyonudur ve bu durumlarda dalma meydana gelmez. P ve Q noktasının aynı anda yüzeye teması kritik bir oryantasyon noktasıdır ve her ne kadar gerekli toleransları sağlasa da bitirme operasyonları için ideal değildir. Q noktası istenen yüzeyin altındaki I yüzeyine temas ederse dalma olayı meydana gelir. Q noktası ile $S(u,v)$ işlenecek bitirme yüzeyi arasındaki uzaklık h ile gösterilirse;

Q noktası yüzeyin o noktadaki normaline göre pozitif taraftaysa $h > 0$

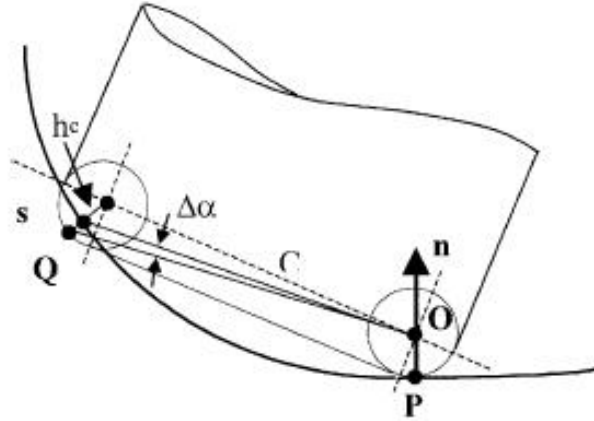
Q noktası yüzeyin o noktadaki normaline göre negatif taraftaysa $h < 0$

Q yüzey üzerindeyse $h = 0$ olmaktadır.

P noktası TT noktası olacak şekilde, Q temas noktası ve yüzey arasındaki mesafe yüzey tolerans durumlarına göre 3 şekilde gruplanabilir. Bunlar;

$$h > \delta_o, -\delta_i \leq h \leq \delta_o, h < -\delta_i \text{ şeklindedir.}$$

Yerel dalmalar takım tabanı ile yüzey arasındaki en kısa mesafenin h_{min} matematiksel hesabı ile bulunabilir. Takımın parça yüzeyinin altına indiği durumlarda h_{min} negatif değer alır. Dalmanın olduğu durumlarda $h_{min} < 0$ durumu ortaya çıkar. Dalmayı ortadan kaldırmak için iki yöntem mevcuttur. Bunlardan birincisi takımın oryantasyon açısını yeniden düzenlemektir. Diğerisi ise takım çapını küçültmektir ki bu yöntem talaş kaldırma oranını düşürür. Yerel dalmalar hesap edilirken takım tabanı ile parça yüzeyi arasındaki mesafe bulunmalıdır. Köşeleri yuvarlatılmış bir takımın tabanı bir simit olarak, düz uçlu bir parmak freze ise bir daire olarak düşünülebilir. Aşağıdaki şekil 3.34'da parça yüzeyine bir noktada temas eden ve dalma meydana gelmiş bir takım oryantasyonu görülmektedir.



Şekil 3.34. Takım gerisinin dalması ve eliminasyonu

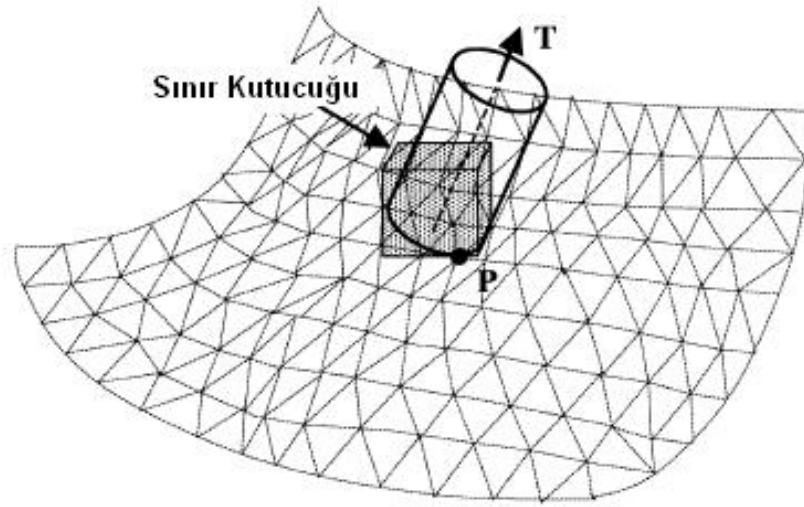
Köşeleri radyüslü bir takımın bir $S(u,v)$ yüzeyine P noktasında temas ettiğini, takım tabanında oluşan simitin eksenini ile oluşan C dairesinin radyüsünü r_f varsayalım. Takım tabanı ile yüzey arasındaki mesafe h , takım alt simiti C dairesinin yüzeye olan uzaklığı ise h_c ile gösterilirse; $h = | h_c - r_f |$ şeklinde ifade edilir. δ_e kabul edilebilir yüzey toleransı olursa, yerel takım dalmasını önlemek için $h \leq \delta_e$ durumu söz konusu olmalıdır. Takım tabanı ile yüzey arasındaki mesafe h , yüzey toleransı δ_e 'den daha küçük olursa eğim açısı α daha da büyütülmelidir. Şekil 3.40'a göre O noktası P noktasında yüzeye temas eden takımın radyüs merkezidir. Bu nokta $O = P + r_f \cdot x \cdot n$ şeklinde bulunur. Q noktası ise takımın dalma yapmış olduğu diğer uç radyüsününün taban noktası olsun. O noktası takım oryantasyonunun gerçekleştiği dönme eksenidir. Dalmayı engellemek için, gerekli eğim açısı $\Delta\alpha$ şu şekilde hesaplanır (Jensen 2002).

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\delta_e - h}{|s - O| \cdot (T \times k)}\right) \quad (3.47)$$

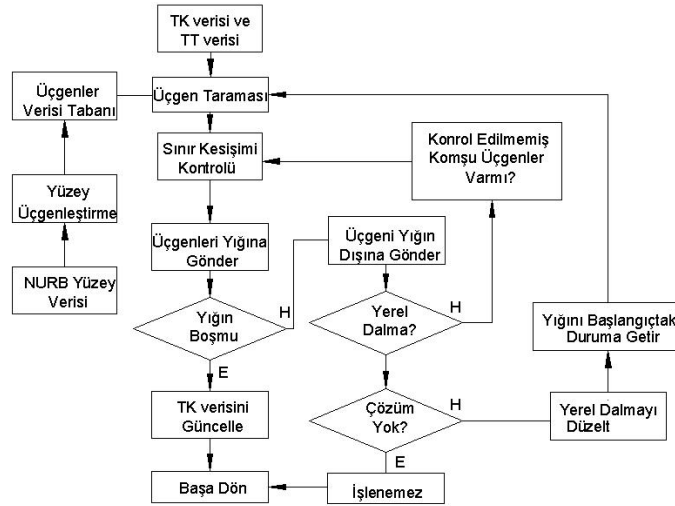
Takım oryantasyonunun değiştirilmesine bağlı olarak yerel dalmaların bulunup düzeltilmesi işleminde yüzey ve takım verilerinin daha hızlı kontrol edilebilmesi için yüzey üçgen geometrilere bölünebilmektedir. Böylelikle yüzey

verileri azalmakta bilgisayarın işlem hızı artmaktadır. Sadece takımın temas bölgesi içine giren üçgenlerde dalma işlemi aranmakta takımın sınır bölgesi dışında kalan yerlerdeki üçgenler işleme alınmamaktadır. Aşağıda şekil 3.35’de takımın alt sınır bölgesi içinde kalan sınır kutucuğu ve üçgenleştirilmiş yüzey seti görülmektedir.

Takım dalmasını engellemek için kullanılan bir diğer yöntemde takım geometrisi ve boyutunu değiştirmektir. Bu işlem için kurulan algoritmalarda takım kütüphanesi içinde bulunan takımlar denenerek dalma ortadan kaldırılmaya çalışılır. Burada düşünülmesi gereken en önemli parametre talaş kaldırma oranının maksimum seviyede tutulması için gerekli takım boyutudur. Yerel dalmayı engellemek için geliştirilmiş takım oryantasyonunun değiştirilmesi için kurulan algoritma şekil 3.36’da verilmiştir.



Şekil 3.35. Sınır kutucuğu ve üçgenleştirilmiş yüzey seti



Şekil 3.36. Takım oryantasyonunun değiştirilmesi ile dalmanın engellenmesi

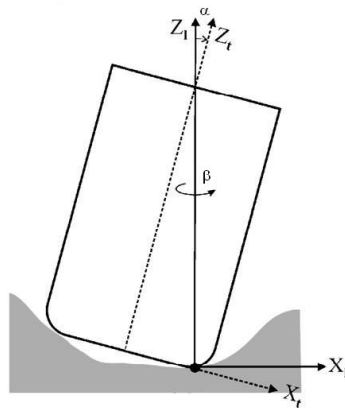
NURBS yüzey verisinden alınan bilgiler, çeşitli üçgenleştirme algoritmaları kullanarak yeni bir veriler dizini oluşturulur. Bu veriler oluşturulan Takım konumu (*TK*) ve takım temas (*TT*) noktası verileri ile bir analiz işlemine tabi tutulur. *TT* noktası etrafındaki üçgenler bir yığın şeklinde gruplanır ve bu yığın boşalana kadar tüm üçgenler için yerel dalmalar kontrol edilir. Dalmanın olduğu noktalarda yeni bir *TK* belirlenir. *TT* noktalarında bir değişim söz konusu değildir. Bu işlemler her *TT* noktası için tekrarlanır ve yeni takım oryantasyonu belirlenir.

Takım seçiminde kullanılan algoritma ise takım kütüphanesinde bulunan takımları uygun bir şekilde seçer. Burada yine yüzey verisi ile dalma kontrol edilerek gerekli düzeltmeler takım değiştirme ile yapılmaktadır. Dalma durumu ortaya çıktığında kurulan algoritmaya bağlı olarak takım kütüphanesinden yeni bir takım seçimi yapılır ve tekrar dalma incelenir. Uygun bir takım seçene kadar büyük boyutlu takımlardan küçük boyutlu takımlara doğru seçim yapılır.

3.3.8. Dalma eliminasyonuna bağlı takım yolu oluşturma tekniği

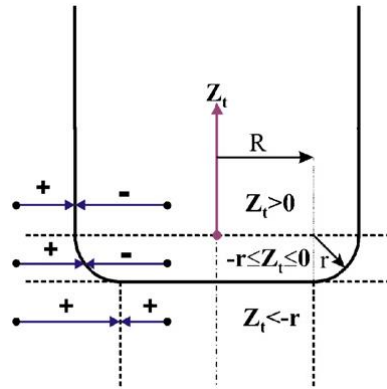
Bu yöntemde takım dalmasının engellenmesi için farklı bir takım yolu oluşturma stratejisi geliştirilmiştir (Hosseinkhani ve ark 2007). Bu metotta takım pozisyonuna bağlı en uygun takım oryantasyonunu hesap edebilen iki gelişmiş algoritma kurulmuştur. Bunlardan ilki dalmayı nicel bir durum olarak tanımlamış ve takım oryantasyonunu bir kök bulma algoritması şeklinde ifade etmişlerdir. Diğer yaklaşım ise hızlı bir işlem yapma işlevi olan, etkisiz ızgara noktalarını nümerik olarak tespit etme tekniğidir. Bu tekniklerde takımın parçaya temas ettiği TT noktalarında bir yerel (takım) koordinat sistemi ve parça yüzeyini ifade eden global bir koordinat sistemi oluşturulmuştur. Parça yüzeyindeki bir noktayı global koordinat sisteminden takım koordinat sistemine taşımak için kinematik bir transformasyon yapılmıştır. Dalma durumunu ise takıma göre iki durumda incelemiştir. Bunlar takımın yan tarafının yaptığı radyal dalma, taban kısmının yaptığı aksenel daldır. Her iki dalma içinde bir kök bulma algoritması kullanarak dalmaları tespit ederek takım oryantasyonunu düzeltmişlerdir.

Bu teknikte parça yüzeyi $S(u,v)$ parametrik yüzeyi olarak ifade edilmekte ve takım için yerel bir koordinat sistemi tanımlanmaktadır. Takım parça yüzeyinde herhangi bir TT noktasına teğetsel olarak temas ettiği noktada, takım ekseninin XZ düzleminde, yerel koordinat eksenini ile takım eksenini arasında oluşan aı eğim açısı ' α ' ile ifade edilmiştir. Aşağıda şekil 3.37'de bu eğim açısı ifade edilmektedir.



şekil 3.37. Eğim açısı (α)

Optimal bir takım oryantasyonu, bu eğim açısının dalma olmadan en küçük değerlerde seçilmesi ile gerçekleşir. Bu şekilde talaş kaldırma oranı en yüksek seviye ulaşmakta işleme zamanı düşmektedir. Fakat her zaman α eğim açısı dalmayı engellemek için yeterli değildir. Bu durumda dönme açısı β devreye girmektedir. Parça yüzeyindeki bir noktayı global koordinat sisteminden takım koordinat sistemine taşımak için kinematik bir transformasyon yapılmalıdır. Bu metotta dalma durumu iki tipte tanımlanmıştır. Bunlar aksel ve radyal yönlerdeki dalmalardır. Radyal yöndeki dalma şekil 3.38’de belirtilmiştir (Hosseinkhani ve ark. 2007).

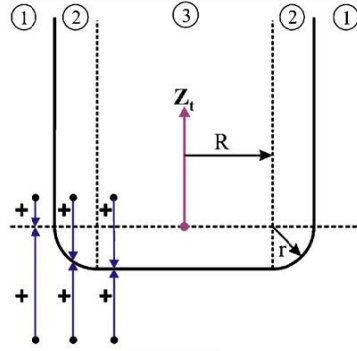


Şekil 3.38. Radyal yönde takım dalması

Radyal yöndeki takım dalması, tanımlanan her hangi bir noktanın, takım yan yüzeyi ile veya yan yüzeyin imajinel uzantısı noktasının radyal yönde aralarındaki mesafedir. Takım içinde dalma durumu mevcut ise dalma negatif olarak tanımlanır. Radyal dalma derinliği (RDD) ise şu şekilde tanımlanır (Hosseinkhani ve ark. 2007).

$$\text{RDD} \cdot \begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix} = \begin{cases} \text{abs}(\sqrt{X_t^2 + Y_t^2} - R) & \text{if } Z_t < -r \\ \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} - (R + \sqrt{r^2 - Z_t^2}) & \text{if } -r \leq Z_t \leq 0 \\ \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} - (R + r) & \text{if } Z_t > 0 \end{cases} \quad (3.48)$$

Eksenel yöndeki takım dalması ise şekil 3.39’da belirtilmektedir. aksel yöndeki takım dalması, tanımlanan her hangi bir noktanın, takım taban yüzeyi ile veya yan yüzeyin imajinel uzantısı noktasının radyal yönde aralarındaki mesafedir.



Şekil 3.39. Eksenel yönde dalma

Eksenel yöndeki dalma derinliği (EDD) ise;

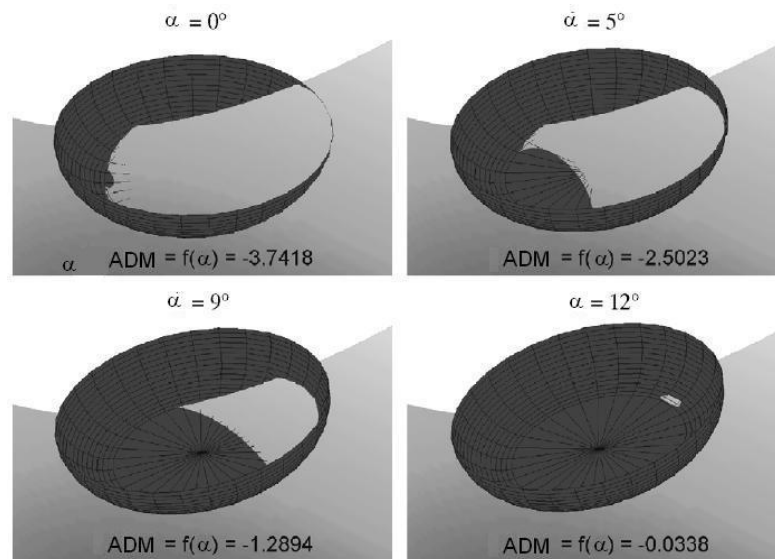
$$EDD \left(\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} \right) = \begin{cases} \text{abs}(Z_t + r) & \text{if } \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} < R \\ \text{abs} \left(Z_t + \sqrt{r^2 - \left(\sqrt{X_t^2 + Y_t^2} - R \right)^2} \right) & \text{if } R \leq \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} \leq R + r \\ \text{abs}(Z_t) & \text{if } \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} > R + r \end{cases} \quad (3.49)$$

- ① $\sqrt{X_t^2 + Y_t^2} \geq R + r$
- ② $R < \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} < R + r$
- ③ $\sqrt{X_t^2 + Y_t^2} \leq R$

şeklinde tanımlanır.

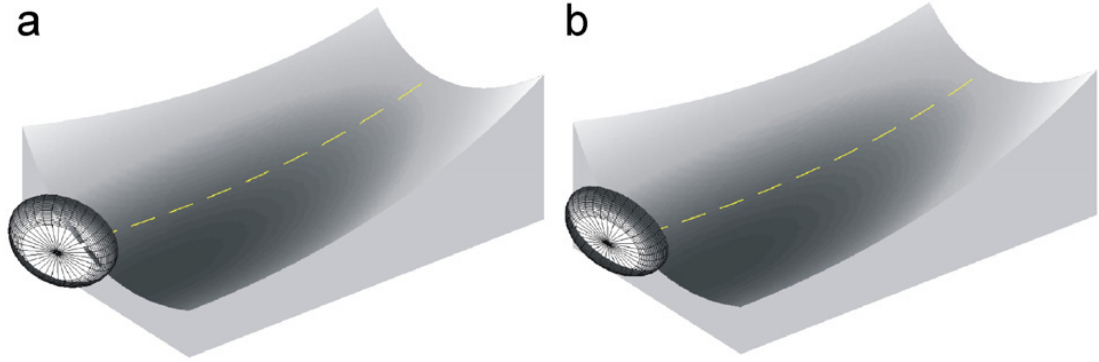
Bu iki dalma miktarı bir biri ile çarpılarak Dalma_Yoğunluk_Faktörü (DYF) adlı yeni bir fonksiyon tanımlanmıştır. Bu DYF faktörünün (-) değer alması dalmanın anlık bile olsa, bahsi geçen noktanın takımın içinde olduğunu gösterir. Bu tanım DYF'nin tüm uzayda sürekli bir fonksiyon olduğunu gösterir. Takım iç bölge sınırlarının içerisinde her bir nokta için DYF fonksiyonu kabul edilebilir bir yaklaşımdır.

Bu metodu diğer yöntemlerle kıyasladığımız zaman, diğer metotlar gibi nokta temelli yerel eğrilik hesabı yaklaşımı değil alan temelli bir yaklaşım sunduğu anlaşılmaktadır. Dalma eliminasyon yönteminde dalma olayının kontrol edilmesi için parça yüzeyini denk olarak ifade eden ızgara (mesh) nokta setleri kullanılmaktadır. Bu nokta setleri parça yüzeyini ifade edecek ve takım yüzeyiyle arasındaki mesafeyi bulabilecek sayıda olmalıdır. Bu noktalar sadece dalma kontrolü için oluşturulmakta, takım temas noktaları için kullanılmamaktadır. Bu ızgara noktaları belli olduktan sonra takıma eğim açısı verilmeden, her hangi bir yöntemle belirlenmiş TT noktalarına pozisyonlama yapılır. Yani başlangıç için $\alpha=0$ kabulü yapılır. O noktadaki global koordinatlar takım koordinat sistemine aktarılır. Bu işlemden sonra dalma yoğunluk fonksiyonu hesaplanır. Bu işlemde elde edilen değerler 2 boyutlu bir matriste (dalma matrisi) toplanır. Bu matriste oluşan negatif değerler başka bir sınır kutucuğuna atılır ve bu değerler dalma yapan ızgara noktalarını (DIN) ifade eder. Bu işlemden sonra anlık dalma miktarı (ADM) hesaplanır. Dalma miktarının (ADM) durumuna göre takım eğiminde artışlara gidilir ve α artırılarak başa dönülür. Dalma ortadan kalkıncaya kadar her bir adımda α artırılır. Aşağıda şekil 3.40'da bu α artış miktarına bağlı değişen ADM miktarları 4 adımda gösterilmektedir. Eğim açısı α bu şekilde artırılarak uygun bir oryantasyon bulunur. Eğim açısı küçükten büyüğe doğru artırıldığı için aynı zamanda bir optimizasyon işlemi de yapılmış olmaktadır.



Şekil 3.40. Eğim açısının değişimine bağlı anlık dalma miktarının değişimi

Şekil 3.41’de yerel dalma eliminasyonu, şekil 3.42 de ise dalma eliminasyon yönteminin algoritması görülmektedir.



Şekil 3.41. Yerel dalmanın eleminasyonu

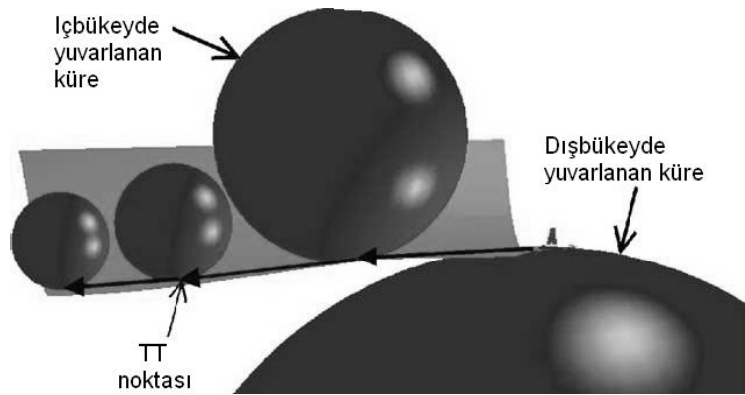


Şekil 3.42. Dalma eliminasyon yönteminin algoritması

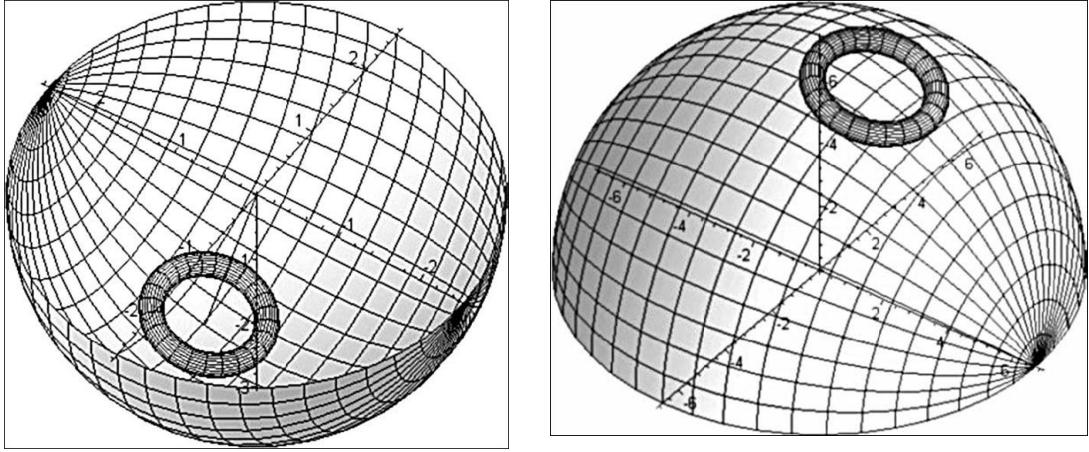
3.3.9. Yuvarlanan küre metodu

Gray ve ark. (2003) yapmış olduğu bu araştırma, daha önce yaptıkları yüzey eğriliği eşleştirmeli bir çalışma olan birincil eksen metodu çalışmasının devamı niteliğindedir. Bu metot diğer yöntemlere nazaran daha uygulanabilir ve hesaplama yöntemi kolay bir yöntemdir. Bu metot bir eğrisel yüzey üzerinde yarıçapı değişken bir kürenin yuvarlatılması ve küre üzerindeki ufak bir bölgesinin işlenen yüzey parçalarına yaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Kürenin yarıçapı yüzey eğriliğine göre yüzey üzerinde tanımlanan ızgara noktalarına göre değişmektedir. Her bir ızgara noktası için dışbükey ve içbükey bölgelere özel bir radyüs (pseudo-radyüs) hesaplanmaktadır. Yüzeye göre radyüs hesap edildiği için aynı zamanda dalma eliminasyonu da gerçekleşmekte ikincil bir dalma kontrolü ve düzeltilmesi işleme ihtiyacı duymamaktadır. Metot çok sade bir metot olup sadece yüzey koordinatları ve yüzey normali hesabı ile yapılabilir. Aşağıda şekil 3.43’de yuvarlanan küre metodu ifade edilmiştir.

Yuvarlanan küre metodunda takım küre içinde pozisyonlandığı müddetçe tek bir takım temas noktası oluşmakta ve küre o noktada yüzeyi temsil etmektedir. Şekil 3.44’de bu durum belirtilmektedir. Burada en kritik hesap küre radyüsünün hesabıdır. Küre radyüsü TT noktasının etrafında birbirine çok yakın ızgara noktalarının oluşturduğu özel bir radyüs ile bulunmaktadır (Gray ve ark 2003).



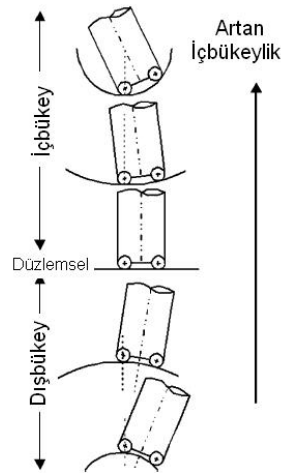
Şekil 3.43. Yuvarlanan küre metodu



Şekil 3.44. İçbükey ve dışbükey bölgede köşeleri yuvarlatılmış bir takım için oluşan küre

Bu radyüs hesaplama işlemi yüzey koordinatları ve normalleri bilindiği için kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Özellikle çok küçük içbükey bölgelerde yüzey eğriliği küre eğriliğine denk ve tek bir noktada takım teması olduğundan dalma olayını ortadan kaldırmaktadır.

Birincil eksen metodunda tek bir noktaya eğrilik uydurulurken bu metotta yüzeye eğrilik uydurulmaktadır. İçbükey ve dışbükey bölgelere göre oluşan pseudo radyüsünün eğriliğine göre küre oluşurken, düzlemsel yüzeylerde sonsuz eğrilikte küre oluşmaktadır. Oluşan radyüse göre yüzey eğriliğinin içbükey-dışbükey-düzlemsel olduğu anlaşılabilir. İçbükey yüzeylerde takım yolu oluşturma dış bükey yüzeylerde de uygulanabilmektedir. Bu durum metodun çok işlevsel ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Aşağıda şekil 3.45’de pseudo radyüsünün değişimi görülmektedir. Yuvarlanan küre radyüsünün hesaplanması bu metodun kilit noktasıdır. Radyüs takım temas noktasının etrafındaki yüzey bölgesine bağlıdır. Bu metotta takım temas noktası belirlendikten sonra takım taban yüzeyi gölgesi altında kalan bölgede ızgara noktaları oluşturulur. Her bir temas noktasında oluşturulan bu ızgara noktaları ile radyüs hesaplanır.

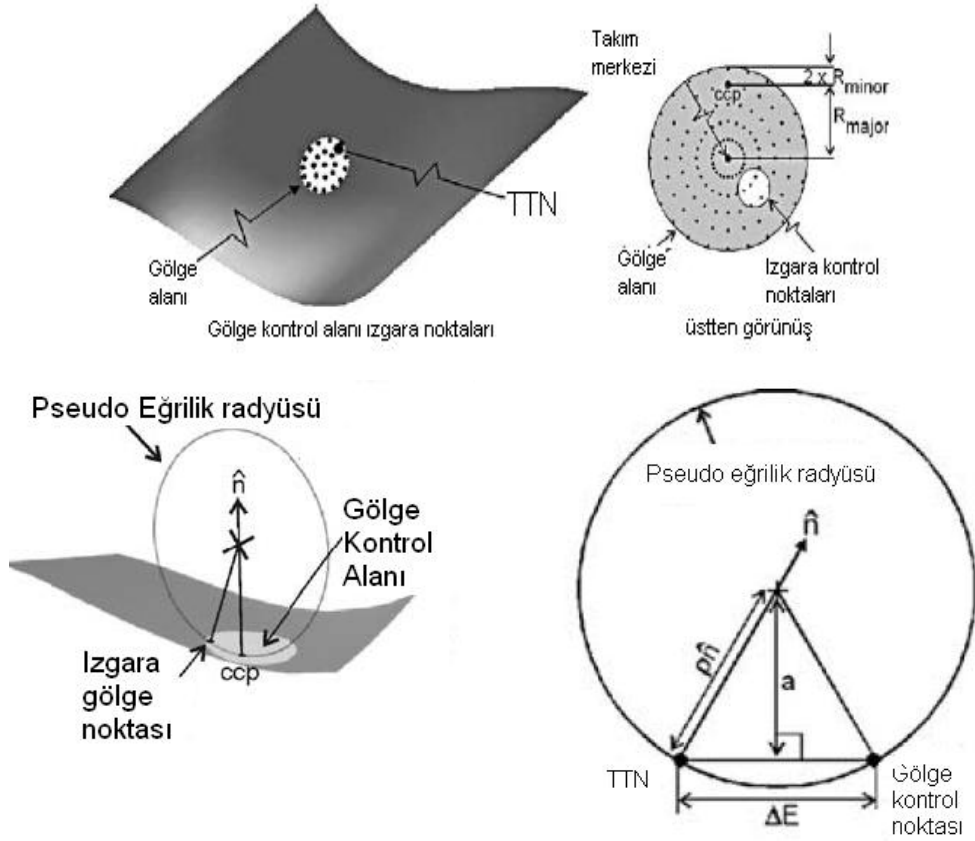


Şekil 3.45. Yüzey eğriliğine göre değişen içbükeylik

Bu radyüsün merkezi takım temas noktasından geçen yüzey normali üzerinde olup, radyüsü takım temas noktasından ve gölge altındaki ızgara noktalarından geçmektedir. Çoğu durumda bu noktaların her birinden aynı anda küre matematiksel olarak geçemeyeceğinden, her bir ızgara noktasından ve takım temas noktasından merkezi yüzey normali üzerinde olan tüm küreler hesap edilir. Oluşturulan kürelerden en içbükey olanı bulunur. Bu küre en içbükey eğrilik yüzeyini temsil eden küre olduğu için aynı zamanda dalma olayını da ortadan kaldırmış olur. Küre radyüsü aşağıdaki formülle hesap edilebilir. Burada E takım temas noktasından gölge noktasına olan vektörü, n takım temas noktasında oluşan yüzey normalini ρ ise pseudo eğrilik radyüsünü belirtmektedir. Şekil 3.46'da ise gölge ızgara noktalarının oluşumu görülmektedir.

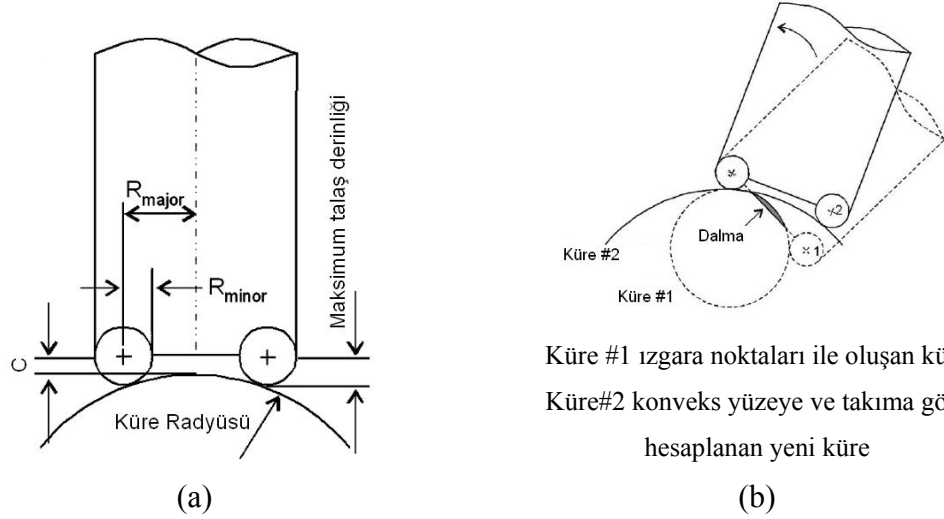
$$\rho = \frac{-\vec{E} \cdot \vec{E}}{2 \times \hat{n} \cdot \vec{E}} \quad (3.50)$$

Fonksiyonel parametrik bir yüzey kullanıldığı zaman, kontrol noktaları sıralı bir dizin halinde u, v parametre alanından alınarak kartezyen koordinat sistemine aktarılabilir. Fonksiyonel yüzey yamaları için belirli aralıklarda $\Delta u, \Delta v$ artışlarıyla takım temas noktası etrafında ızgara noktaları oluşturulabilir.



Şekil 3.46. Gölge ızgara noktaları ve pseudo eğrilik radyüsünün oluşumu ve düzlemsel görünümü

Konveks yüzeylerde eğrilik eşleştirme yapılırken, parça yüzeyindeki çıkıntılı yüzey ile takım tabanında kesme yapmayan bölge dikkate alınmalıdır. Yüzey üzerindeki çıkıntı küre radyüsünden daha küçükse takımın kesme yapmayan merkezinde çarpma olması muhtemeldir. Aşağıda şekil 3.47(a)'da bu durum ifade edilmiştir. Böyle bir dalma durumunda ızgara noktaları ile hesaplanan küre (#1) radyüsü kullanılmaz. Bunun yerine takım tabanında ki boşluk mesafesini de (C) göz önüne alarak bu bölge için özel bir küre radyüsü (#2) hesaplanır. Bu işlem aşağıda şekil 3.47(b)'de ifade edilmiştir.



Şekil 3.47 (a) Konveks yüzeyde takım alt boşluğu (b) konveks yüzeyde dalma

Konveks yüzeyler için hesaplanması gereken küre radyüsü ifadesi ise şu şekilde bulunur (Gray ve ark 2003).

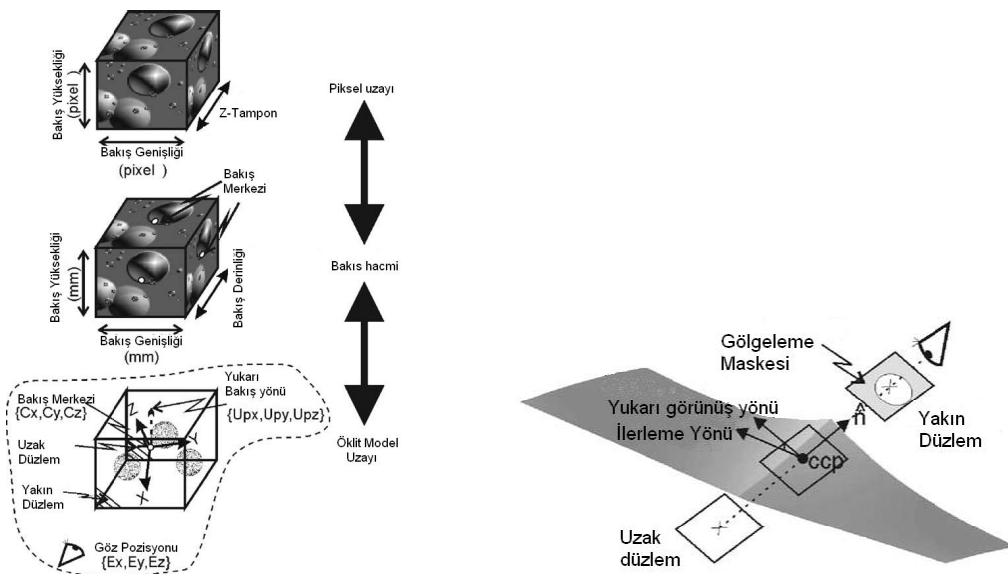
$$R_{küre-konveks} = \frac{-(C_{güvenlik}^2 + R_{major}^2 - r_{minor}^2)}{2x(r_{minor} - C)} \quad (3.51)$$

Görüldüğü gibi ızgara noktalarının oluşturduğu küre dışbükey yüzeylerde takımın orta kısmında istenmeyen bir girişime sebep olabilir. Bu durumlarda yeni hesaplanan küre radyüsünün kullanılması gerekir. Burada belirlenmesi gereken güvenlik mesafesi 'C' R_{major} ve R_{minor} kullanıcı tarafından takım kütüphanesinde girilen takım bilgileridir. Yuvarlanan küre metodunda takım pozisyonlaması yüzeyin durumuna göre yapılmaktadır. İçbükey yüzeylerde takım küre içinde, dışbükey yüzeylerde takım küre dışında konumlanır.

3.3.10. Grafik destekli yuvarlanan küre metodu

Gray, ve ark. (2003) daha önce yapmış oldukları yuvarlanan küre metodunun, bilgisayar grafiği desteğiyle geliştirdikleri yeni bir metottur. Yuvarlanan küre metodunda takım pozisyonlarına ait koordinatlar ve yüzey normaleri parametrik yüzey verisinden, elde edilmişti. Bu yöntemde ise bilgisayar grafiği ve parametrik yüzey yerine üçgenleştirilmiş yüzey verileri kullanarak koordinatlar ve küre yarıçapı hesabı yapılmaktadır. Böylelikle çok yamalı yüzey verileri için takım yolu oluşturulabilmektedir.

Grafik destekli bu metotta izlenen yol daha önceki metotta aynıdır. Takım yolu oluşturmak için öncelikle bir ızgara gölge noktaları oluşturulur ve ardından pseudo eğrilik radyüsü bulunur. Bu radyüsün ve yüzeyin eğrilğine göre takım pozisyonu elde edilir. Yuvarlanan küre metodunda kullanılan tüm formüller bu metotta da geçerlidir. Bu metotta sadece koordinatların elde edilme yöntemi grafik desteklidir. Koordinatlar bilgisayarın modeli kaplama (render) yaparken elde edilen koordinatların kartezyen koordinat sistemine aktarılması temeline dayanmaktadır. Aşağıda şekil 3.48’de bu dönüşüm işlemi şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.48. Piksel uzayının grafik yardımıyla öklit uzayına aktarılması

Bilgisayar ortamında bir nesne kaplama yapılırken her bir piksele bir X,Y koordinat atamaktadır. Belli bakış doğrultularında ve derinlik tamponlarında (depth-buffer) oluşturulan düzlemlerde elde edilen bu koordinatlar belli interpolasyonlar ile kartezyen koordinat sistemine aktarılmaktadır. Piksel koordinatlarından elde edilen X,Y koordinatlarına derinlik tamponu mesafesi de 3. boyut katarak Z eksen koordinatı da elde edilmiş olur.

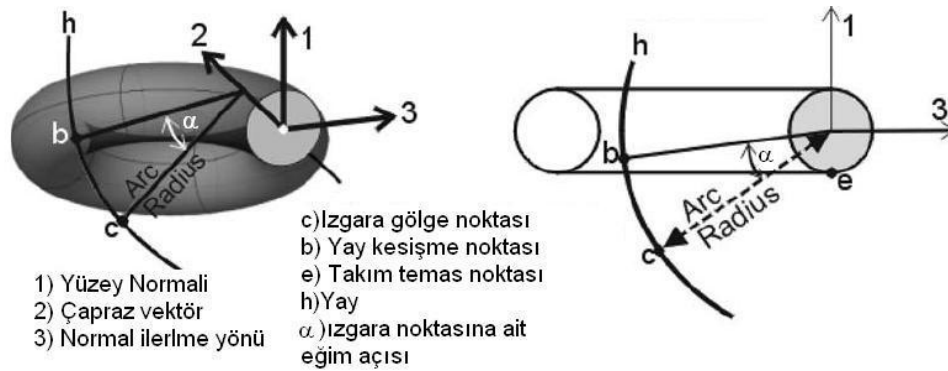
Böylelikle yüzey üzerine düşürülen takım gölgesi alanında ızgara noktaları farklı renklerde kaplanarak yüzey üzerindeki gölge kontrol noktalarının koordinatları rahatlıkla çıkarılabilir. Gölge kontrol noktalarının sayısı istenildiği kadar artırılabilir. Bu noktalarla lineer bir dönüşüm yapılarak kartezyen koordinat sistemine geçilir ve yüzey normalleri de hesap edilir. Takım temas noktası ve kaplanan gölge kontrol noktalarına ait pikseller arasındaki mesafe de tayin edildikten sonra pseudo radyüsü önceki metotta belirtilen formülasyonlar kullanarak belirlenebilir.

3.3.11. Yay kesiştirme metodu

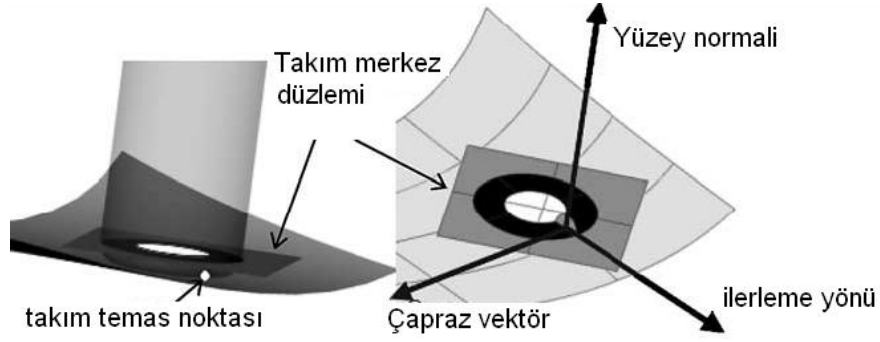
Yay kesiştirme metodu (Paul ve ark. 2005) aynı yazarların daha önce yaptıkları yuvarlanan küre metodunun (Rolling Ball Method) geliştirilmiş halidir. Yuvarlanan küre modelinde kesici takım parça eğriliğine göre parçaya tek bir noktada temas etmekte ve dalma durumunu ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca ikincil bir iteratif dalma ve düzeltme kontrolüne gerek duymamaktadır. Fakat bu metodun en büyük dezavantajı takım oryantasyonunun çok basit bir şekilde bulunup optimizasyon yapılamamasıdır. YKM metodu aynı zamanda takım oryantasyonunu optimize etmektedir. YKM metodu yuvarlanan küre metodu gibi alan temelli bir metod olup ikincil bir dalma kontrolü ve düzeltme adımına ihtiyaç hissetmez. Bu metotta grafik destekli yuvarlanan küre metodunda olduğu gibi yine grafik destekli bir yüzey tanımlı gerçekleştirilmiştir. Takım temas verileri için her hangi bir parametrik yüzey verisi kullanılmamıştır. Bu grafik destekli yöntemde, bilgisayarın üretmiş olduğu kaplama piksel koordinatları kullanılmıştır. Her hangi bir

noktada yüzey verisi elde etmek için bir bakış doğrultusu belirlenmiş ve bir maske kullanarak yüzey parçasına ait pikseller bulunmuştur. Kaplama esnasında bilgisayarın türettiği bu piksel koordinatları kartezyen koordinat sistemine aktarılmaktadır.

Yay kesiştirme metodu öncelikle bir TT notası ve bu noktalara ait yüzey normal verilerinin nümerik olarak bulunması işlemi ile başlar. Burada en küçük kareler yöntemiyle yüzey uydurma tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemde ızgara gölge noktası (c) çapraz vektör (2) etrafında döndürülmesi bir yay oluşturmaktadır. Bu yayın uzunluğu gölge ızgara noktası ile çapraz vektör arasındaki en küçük ve çapraz vektöre dik mesafe kadardır. Eğim açısı (α) takım simit radyüsünün ızgara gölge noktasına değinceye kadar çapraz vektörün etrafında dönme açısına tekabül eder (Şekil 3.49). Aynı zamanda α açısı ön pozisyonlama açısı arasındaki fark kadardır. Bazı durumlarda oluşturulan yayın takım simidine temas etmeme durumu ortaya çıkabilmektedir. Bu durumda takım temas noktasında teğet düzlemi ile bir ön kesişme kontrol işlemi gerçekleştirilmelidir. Bu teğet düzlem aynı zamanda takım temas noktasında oluşan takım taban düzlemidir. Şekil 3.50’de belirtilen bu alanlar (siyah-beyaz) kesme işlemi yapan takım simit geometrisinin ve kesme işlemi yapmayan takım orta kısmının iz düşümüdür. Eğer yay bu iki bölgesi kesiyorsa bir sonraki adıma geçilir. Eğer ızgara gölge noktasından oluşturulan yay bu bölgeleri kesmiyorsa bu nokta takım pozisyonlamasında kullanılmaz. Yayın siyah veya beyaz bölgeyle kesişmesi durumuna göre iki durum karşımıza çıkar.



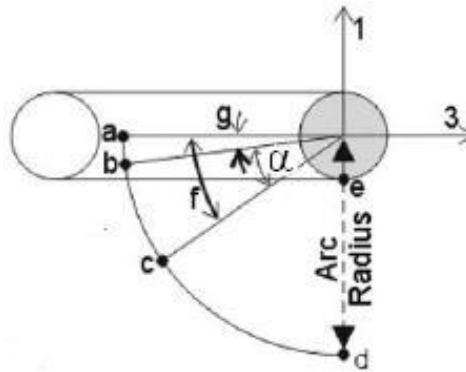
Şekil 3.49. Yay kesiştirme ve ızgara gölge noktasının oluşumu



Şekil 3.50. Takım temas noktasında takım merkez düzlemi ve takım tabanı izdüşümleri

Durum 1:

Yay şeklindeki siyah bölgeyle kesişmesi durumunda takım merkez düzlemi ile kesişme noktası arasındaki açı hesaplanmalıdır. Bu açı şekil 3.51’de belirtilmiştir. Bu durumda karşımıza iki farklı kesişme açısı ortaya çıkar. Kesişme noktası takım merkezi düzleminin altında veya üzerinde gerçekleşebilir. Böyle bir durumda takım uç radyüs merkezinden ikili bir kesişme analizi yapılır. Izgara gölge noktası (b) ve takım merkez düzlemi (a) arasında oluşan açı (g) bulunur. Bu noktanın düzlemin altında olması durumunda $\alpha = f - g$ ve üzerinde olması durumunda $\alpha = -(f + g)$ şeklinde eğim açısı hesaplanır. Eğim açısı aynı zamanda takım eksenini ile yüzey normali arasındaki açı farkıdır.



Şekil 3.51. Siyah bölgede kesişme durumunda oluşan eğim açısı

Durum 2.

Bu durum kesiştirme yayının beyaz bölge ile teması ile ortaya çıkar. Beyaz bölge takımın kesme yapmayan ve takım taban düzleminin biraz üzerinde ve ona paralel olan bir düzlemdir. Bu düzlemler arasındaki mesafe kullanıcı tarafından girilen bir güvenlik değeridir. Durum 1 de olduğu gibi g açısının hesap edilmesi gerekir. Bu açının hesabı aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir. Bu eşitlikte R_{major} takım orta kısmının (beyaz bölge) radyüsü, R_{minor} ise köşe radyüsünü, C ise takımın merkezi güvenlik düzlem mesafesini, belirtmektedir.

$$g = \text{Sin}^{-1} = \frac{R_{minor} - C}{\text{kesismeyayi}} \quad (3.52)$$

Fark açısı g hesaplandıktan sonra oryantasyon açısı yine durum 1 de olduğu gibi bu noktanın düzlemin altında olması durumunda $\alpha = f - g$ ve üzerinde olması durumunda $\alpha = -(f + g)$ şeklinde hesaplanır.

Tüm ızgara gölge noktalarında takım düzlemiyle kesişen yaylar için 1 ve 2 durumlarının oluşumuna göre eğim açısı hesaplanır. Bunun dışında kalan yani takım düzlemiyle kesişmeyen yaylar için herhangi bir hesap yapılmaz. Açıkça görülüyor ki ızgara gölge noktaları yeteri kadar sıklıkta oluşturulduğu takdirde dalma durumu ortaya çıkmaz. Aynı metot parametrik yüzeyler içinde uygulanabilir. Fakat yüzey yamaları arasında hesap yapmak oldukça zorlaşır.

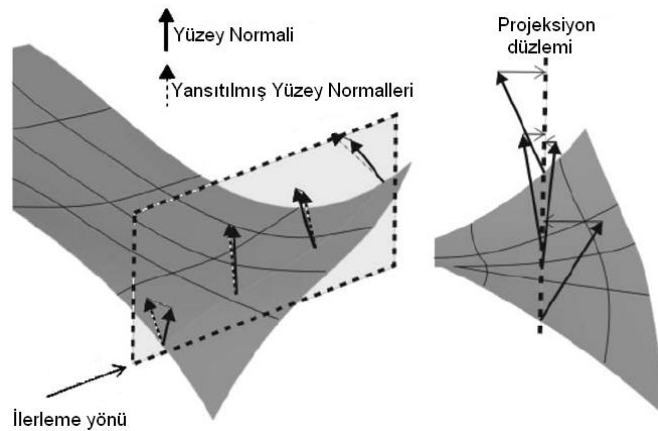
3.3.12. Yay kesiştirme metodu ile 3-11/22 eksen işleme

Bu çalışmada Paul ve Ark. (2007) daha önce yapmış oldukları yay kesiştirme metodu ile 5 eksen takım yolu oluşturma tekniğini bu teknik üzerinde geliştirmişler ve 3-11/22 eksen işleme adı altında yeni bir teknik olarak sunmuşlardır. Bu teknikte takım sadece 3 lineer eksenle hareket ederken talaş kaldırmaktadır. Takım her hangi

bir *TK* noktasında oryantasyon yaptıktan sonra bir sonraki *TK* noktasına yine aynı oryantasyon ile talaş kaldırılmaktadır. Eğim ve dönme eksenlerine ait eksenler kilitlenmektedir. Takım bu oryantasyon açısını değiştirmeden belli bölgeyi işlemekte daha sonra başka bir bölgeyi o bölgeye uygun bir oryantasyon açısı ile işlemeye devam etmektedir.

Bu şekilde talaş kaldırma işleminin eş zamanlı (simültane) 5 eksen hareketiyle işlemeye nazaran daha hızlı ve rijit bir kesme sağlayacağını ispatlamışlardır. Bu şekilde yüzey pürüzlülüğü ve titreşimin azaldığı ve ilerleme hızının ise 5 eksen harekete oranla daha da artırılabilindiğini vurgulamışlardır.

Bu teknikte öncelikle yüzeydeki *TT* noktaları hesap edilmekte ve her bir *TT* noktası için yüzey normalleri bulunmaktadır. Yüzey normalleri analiz edilerek bölgelere ayrılır ve her bir bölge için ortalama bir yüzey normal vektörü hesaplanır. Her hangi bir işleme yönünde takım yolu oluşturma yönü belli olduktan sonra o yol üzerinden bir düzlem geçirilir. Düzlem aynı zamanda hesaplanan ortalama yüzey normaline paraleldir. Ortalama yüzey normal vektörü tüm *TT* noktaları için ortak bir normal olduğu için her bir *TT* noktasında aynı oryantasyon bulunmuş olur. Böylelikle takım o yol üzerinde hareket ederken ortalama normal kullandığı için herhangi bir oryantasyon değişimi oluşmaz. Aşağıda şekil 3.52’de ortalama yüzey normal vektörü ve projeksiyon düzleminin oluşturulması gösterilmektedir.

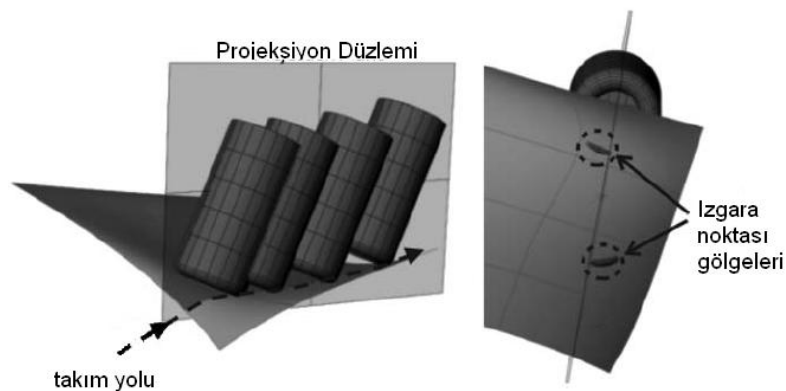


Şekil 3.52. Ortalama yüzey normal vektörü ve projeksiyon düzleminin oluşturulması.

Yüzey normalleri hesaplanıp ortalaması bulunduktan sonra takım, bu projeksiyon düzlemine yansıtılan yüzey normalleri üzerinde hareket ederken aynı zamanda takım ön kısmının (ön kısımda bulunan kesici ucun) TT noktasına temas etmesi gerekir. Bu şekilde oluşan takım yolu aşağıda şekil 3.53’de belirtilmiştir. Takım yolunun ilk nokta ve son nokta arasında yaptığı hareket de dalma olup olmadığı ızgara noktaları ve üçgen yüzey setleri ile yapılmaktadır. Ara noktalarda dalma var ise takım o noktadan kendi eksenini boyunca yukarı doğru kaldırılmalıdır. Bu şekilde parça belli aralıklarda düzlemlerle kesiştirilerek takım yolu oluşturma işlemi tamamlanmış olur.

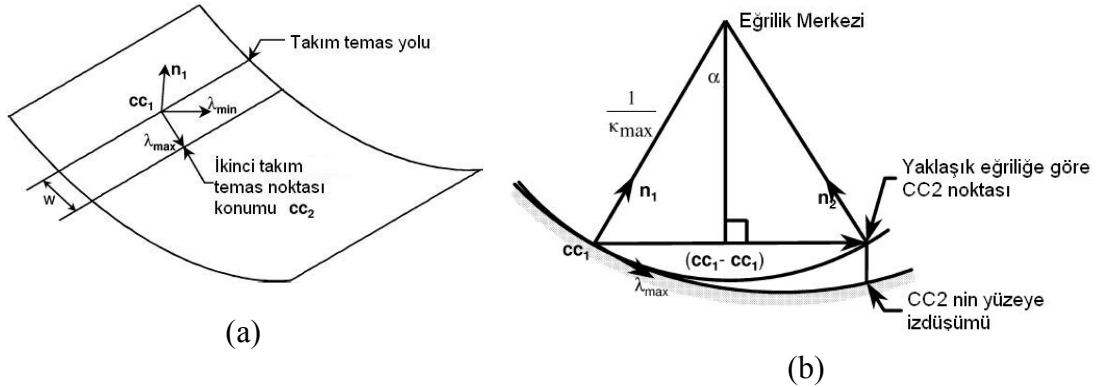
3.3.14. Çok noktalı takım temasıyla pozisyonlama tekniği

Çok noktalı takım teması tekniği (Warkentin ve ark. 2000) eğrisel yüzeylerin bitirme işlemlerinde kullanılan bir tekniktir. Takım parça yüzeyine birden fazla noktada temas etmektedir. Bu tekniğin en büyük dezavantajı nümerik hesap yapmanın çok zaman almasıdır. Bu yapılan çalışmada çok etkili bir algoritma geliştirilmiştir. Bu metodun temelinde takım altındaki yüzeyin eğrilik karakteristikleri göz önüne alınmıştır. Bu algoritma basit yüzeylerde rahatlıkla hesap yapabilmekte, endüstriyel uygulamalarda şu an için hata vermektedir. Bu metod aynı zamanda sadece açık içbükey yüzeylere uygulanabilmektedir.



Şekil 3.53. Projeksiyon düzleminde takım yolunun oluşumu ve ızgara noktası gölgeleri

Çok noktalı takım teması stratejisinde ise birden çok noktada takım parça ile temas halindedir. Bu metotta izlenen algoritma şu şekildedir. Öncelikle takımın temas ederek ilerleyeceği takım temas noktalarından oluşan bir takım temas yolu bulunur. Bu yol aşağıda şekil 3.54’de belirtilmiştir.



Şekil 3.54. a) Birinci ve ikinci takım temas noktalarının oluşumu b) eğrilik yaklaşırma ile TT_2 noktasının bulunması

Bu takım temas yolunun maksimum eğrilik (λ_{max}) yönünde w ayırma mesafesi kadar ötelenmesi ile ikin takım temas yolu oluşturulmuş olur. Bu iki yol üzerinde ikili takım temas çiftleri kullanarak takım pozisyonları hesaplanabilir. TT_2 noktası şekil 3.60(b)'de görüldüğü gibi eğrilik yaklaşırma ile bulunabilir. Bu şekilde TT_1 noktasının yüzeyle kesiştiği noktada maksimum eğrilik λ_{max} ve yüzey normali n_1 oluşturulur. Yüzeye eğriliğine yakın yaklaşık bir eğrilik daire gibi düşünülerek $1/\kappa_{max}$ şeklinde hesaplanır. TT_2 noktasının bu yaklaşık eğrilik üzerinde olduğu varsayılırsa, iki takım temas noktası arasında oluşan vektör $(TT_1 - TT_2)$ şeklinde oluşur ve aynı zamanda bu mesafe iki temas arasına oluşan ayırım mesafesidir (w). Bu vektör n ve λ terimleriyle vektörel olarak da şu şekilde ifade edilebilir.

$$TT_2 - TT_1 = ((TT_2 - TT_1) \cdot n_1)n_1 + ((TT_2 - TT_1) \cdot \lambda_{max}) \lambda_{max} \quad (3.53)$$

$(TT_2 - TT_1) \cdot n_1$ ve $(TT_2 - TT_1) \cdot \lambda_{max}$ terimleri $TT_2 - TT_1$ vektörünün n ve λ_{max} üzerindeki bileşenleridir. Bu terimler w ve α terimleri ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$TT_2 - TT_1 = w(\sin(\alpha)n_1 + \cos(\alpha)\lambda_{max}) \quad (3.54)$$

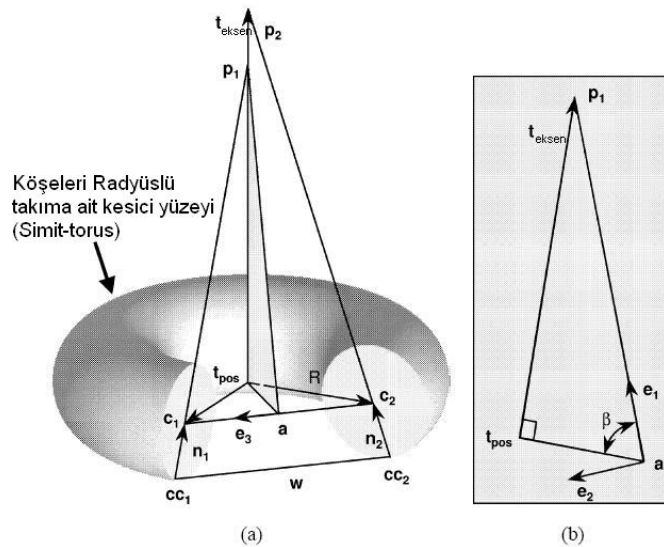
Denklem yeniden düzenlenirse TT_2 noktası aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$TT_2 = w(\sin(\alpha)n_1 + \cos(\alpha)\lambda_{max}) + TT_1 \quad (3.55)$$

Burada α açısı maksimum eğrilik yarı çapı κ_{max} ve takım yolu ayırım mesafesine (w) bağlı olup şu şekilde bulunur.

$$\alpha = \sin^{-1}(\kappa_{max} \cdot w) / 2 \quad (3.56)$$

Bu işlemlerde eğrilik yarıçapının değişmesi durumunda TT_2 noktasının hesabında hata oluşabilir. Böyle bir durumda TT_2 noktası yüzey üzerinde oluşmaz. Şekil 3.54(b) de olduğu gibi yüzeyin üzerinde oluşması durumunda yüzey üzerine iz düşümü alınmalıdır. Bu metotta takım pozisyonu ise yine nümerik olarak hesap edilebilir. Böyle bir durumda en az bir noktada teğetsel temas etmiş bir durum oluşturulmalıdır. Aşağıda şekil 3.55’de TT_1 ve TT_2 noktalarında teğetsel temas sağlanmış takım pozisyonu yer almaktadır.



Şekil 3.55 (a) iki noktadan teğetsel temas sağlanan takım pozisyonu (b) takım eksen düzlemi

Sağlanan bu iki teğet noktasından geçen yüzey normaleri n_1 ve n_2 kesici takıma takılan uç merkezlerinden (c_1, c_2) geçmektedir. Çizgiler bu $[c_1, c_2]$ ve $[TT_1, TT_2]$ noktalarından elde edilmiştir. Teğetsel temas noktalarında elde edilen yüzey normaleri takım eksenini p_1 ve p_2 noktalarında kesmektedir. Takım konumunu ve oryantasyonunu bulabilmek için takım pozisyonu t_{pos} ve p_1 noktalarının bulunması yeterlidir. t_{pos} koordinatı takım pozisyonunu bulmak için, p_1 ise takım $t_{eksen} = p_1 - t_{pos}$ vektörü yardımıyla oryantasyonun belirlenmesi için gereklidir.

P_1 koordinatı TT_1 ve c_1 noktalarının takım ekseninden geçen bir düzlemlerle kesişmesi ile bulunabilir. Bu nokta belli olduktan sonra c_1 ve c_2 noktalarının tam orta noktası (a) bulunarak, takım eksenini, p_1 ve a noktalarından geçen takım eksen düzlemi oluşturulur. Yukarıda şekil 3.55(b)'de bu düzlem gösterilmiştir. Takım temas noktalarının kesici uç (insert) merkezine uzaklıkları yarıçap r kadardır. Buna göre a noktasının bulunabilmesi için c_1 ve c_2 noktalarının vektörel ifadesi yüzey normal vektörleri yardımıyla şu şekilde yazılabilir.

$$c_1 = TT_1 + r \cdot n_1 \quad (3.57)$$

$$c_2 = TT_2 + r \cdot n_2 \quad (3.58)$$

$$a = c_1 + c_2 \quad (3.59)$$

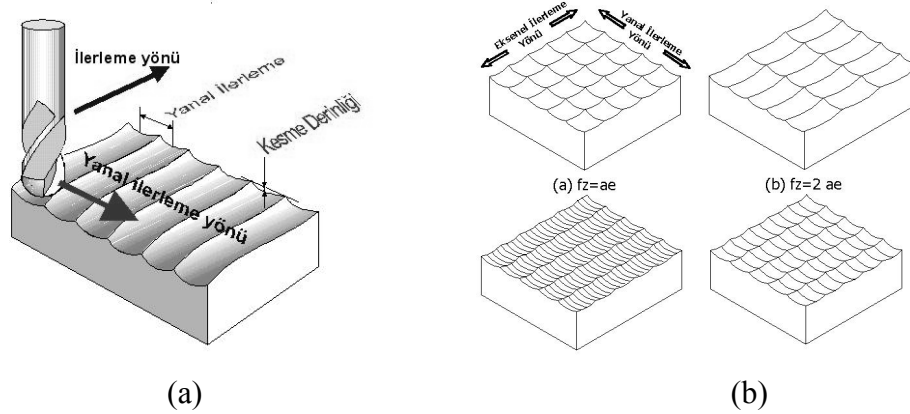
Bu işlemlerden sonra takım eksenini üzerinde bulunan bu iki nokta t_{pos} ve p_1 noktaları yardımıyla takım eksenini takım oryantasyonu ve takım pozisyonu bulunabilir.

$$t_{axis} = \frac{(p_1 - t_{pos})}{|p_1 - t_{pos}|} \quad (3.60)$$

Böylelikle 2 noktadan içbükey açık bir yüzeyde teğetsel temas sağlanan köşeleri radyüslü bir takımın koordinatları ve oryantasyonu bulunmuş olur.

3.3.14. Takım yolu aralıkları ve kalıntı talaş yüksekliği analizi

Her hangi bir yöndeki takım yolu tamamlandıktan sonra takıma verilen yanall kayma mesafesi takım yolu aralığı veya yanall kayma mesafesi olarak adlandırılır. Dolayısıyla bu yanall kayma miktarı takım yolu sayısına etki eder ve yanall kayma doğrultusundaki yüzey pürüzlülüğünü etkiler. Takımın ilerlediği yöndeki yüzey pürüzlülüğü ise takıma ait kesme hızı, ilerleme hızı, takıma ait kesici ağız sayısı ve takım geometrisi ile ilgilidir. Yanall ilerleme yönündeki pürüzlülük ise takım geometrisi, talaş derinliği ve kesici oryantasyonuna bağılı değışen efektif kesici profiline ve yanall ilerleme miktarına bağılıdır. Bu yüzden takımın ilerleme yaptığı yöndeki ve kesme düzleminin kaydırıldığı yöndeki yüzey pürüzlülüğü farklıdır. Aşağıda şekil 3.56’da yanall ilerleme ve aksenel ilerleme ve bu iki ilerlemenin birbirine oranıyla değışen yüzey pürüzlülükleri görülmektedir.



Şekil 3.56. Aksenel ve yanall ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a) Aksenel ve yanall ilerleme yönleri (b) İlerleme oranına bağılı pürüzlülük değışimi

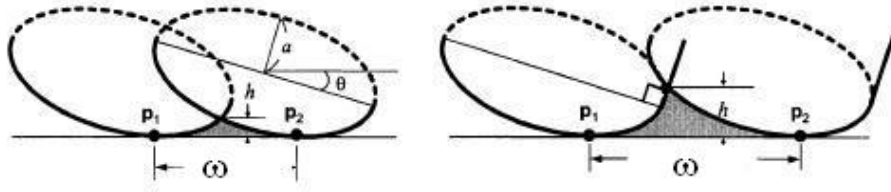
Çokgenleştirilmiş yüzeylerde kesme düzleminin, parametrik yüzeylerde izo-parametrik eksenin kaydırılma miktarı yanall ilerleme yönündeki yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. İstenilen takım yolu şablonuna göre (zig-zag/paralel/spiral Z-level vs) kesici düzlem parça boyunca kaydırılarak takım yolları oluşturulmalıdır. Yüzey eğriliğinin parça boyunca değıştiği durumlarda yüzey eğriliğine bağılı değışen miktarlarda takım yolu aralıkları belirlenebilmektedir.

Üç eksen işlemede kalıntı talaş yükseklikleri parça profiline ve takım yolu aralıklarına göre rahatlıkla kontrol edilebilmektedir. Parça yüzeyinin düzlemsel içbükey veya dışbükey olma durumlarına göre nümerik çözümlerle parça boyunca sabit olan yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilebilir. Kalıntı talaş yüksekliklerinin parça boyunca sabit kalabilmesi için takım yolu aralıklarının değişmesi gerekmektedir. ω : takım yolu aralığı, h : kesme kenar yükseltisi, R : parça yüzey eğrilik yarıçapı, r : kesici takım radyüsü olarak gösterilirse düzlemsel ve eğrisel bölgelerde verilmesi gereken takım yolu aralıkları şu şekilde hesap edilebilmektedir (Lin ve Koren 2000).

$$\begin{aligned}\omega_{düzlem} &= 2[r^2 - (r - h)^2]^{1/2} \\ \omega_{eğrisel} &= [(8 \cdot h \cdot r \cdot R) / (R + r)]^{1/2}\end{aligned}\tag{3.61}$$

Beş eksen işlemede efektif kesici geometrisi takım oryantasyonuna bağlı olarak sürekli değişmekte ve yüzey eğriliğine uydurulmaktadır. Takım oryantasyonu ve parça eğriliği sürekli değiştiğinden 3 eksendeki basit nümerik çözümler yerine daha karmaşık vektörel ve simülasyona bağlı çözümler geliştirilmiştir.

Şekil 3.57'de 5 eksenle frezelenmiş bir yüzey ve oluşan efektif kesici profillerinin, kesme yönüne dik olan bir düzlemden alınmış 2 boyutlu bir kesiti görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi efektif kesici şekli takım oryantasyonunun bir fonksiyonudur. İşleme hatası yükseklikleri (h), takım oryantasyonuna ve iki takım yolunun arasındaki mesafeye (w) bağlıdır ve hassas bir kesme simülasyonu ve yüzey hesabıyla hesaplanabilir. Bazı literatürlerde işleme hatalarının hesabında, her TT noktasındaki yüzey eğriliği ile kesici elipsin eğriliği bir yaya benzetilerek kıyaslama yapılmıştır (Marciniak 1987). Fakat bu metotlarda dönme açısı β 'nin sıfır derece kabul edilmesiyle işleme hatalarına etkisi göz ardı edilmektedir. Etkili ve doğru bir hesaplamada dönme açısının (β) da etkisi göz önüne alınmalıdır.



Şekil 3.57. Beş eksen frezelemede oluşan işleme hataları

Şekil 3.57'de düzlemsel yüzeyde oluşan efektif kesici elipsinin geometrisi eğim ve dönme açlarına bağlıdır ve $E(\alpha, \beta)$ olarak gösterilir. Oluşan bu elipsin büyük yarıçapı takım yarıçapı r 'ye eşittir. Elipsin büyük eksenini ile y eksenini arasında kalan açı θ , elipsin küçük yarıçapı a olursa;

$$\begin{aligned}
 a &= |r \sin \alpha \cos \beta| \\
 \theta &= |\tan^{-1} (-\tan \alpha \sin \beta)| \\
 h(\alpha, \beta | \omega) &= \sin(\alpha) - u \cdot \sin(\theta) + v \cos(\theta) \quad \{0 < \omega < \omega_c\} \\
 h(\alpha, \beta | \omega) &= \sin(\alpha) - \sin(\theta) + [n \cdot \alpha \cdot (2m - m^2)]^{1/2} \cos(\theta) \quad \{\omega_c < \omega < 2/\cos \theta\}
 \end{aligned} \tag{3.62}$$

şeklinde hesap edilebilir (Choi 1998).

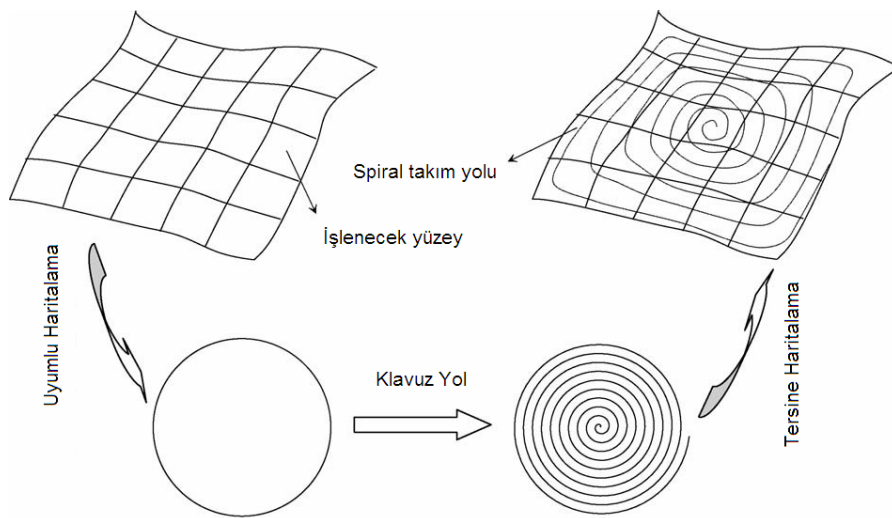
3.3.15. Beş Eksen takım yolu şablonları

Bir parçanın 2.5, 3, 5 eksende işlenmesi için gerekli takım yollarını oluştururken takımın parça üzerinde izleyeceği yönleri ve talaş kaldırma stratejisini takım yolu şablonları belirler. Bu şablonlardan en bilinenleri; tek-çift yön zig-zag işleme, içten-dışa veya dıştan içe spiral işleme, dıştan merkeze veya merkezden dışa radyal işleme, sabit Z seviyeli işleme, helisel işleme vb. olarak sıralanabilir. Parçaya en uygun takım yolu şablonu kullanıcı tarafından belirlenir. 3-5 eksen frezelemede takım yolları seçilirken parça geometrisi, takım ve frezeleme tekniği de göz önüne alınmalıdır. Amaç en kısa zamanda en kısa takım yoluyla en düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesidir. Burada en önemli optimizasyon değişkeni işleme

zamanı, homojen ve düşük bir yüzey pürüzlülüğüdür. Bu yüzden özellikle eğrisel yüzeylerde parça geometrisine göre esnek takım yolu şablonları belirlenmelidir. Yani parçanın eğriliğine göre adaptif bir yapıya sahip şablonlar oluşturulmalıdır.

Beş eksende takım yolu şablonları ve yönlerine karar verilirken parça yüzeyi eğrilik değişimleri de göz önüne alınmalıdır. Mümkün olduğunca takımın ilerleme yönünde fazla oryantasyon değişiklikleri gerektirmeyen, takımın dönel eksenlerdeki hareketini minimize eden hatta sıfırlayan şablonlar ve şablonlara bağlı yönler belirlenmelidir (Paul ve ark 2007, Yu-Wen ve ark. 2006, Taejung ve Sanjay 2002).

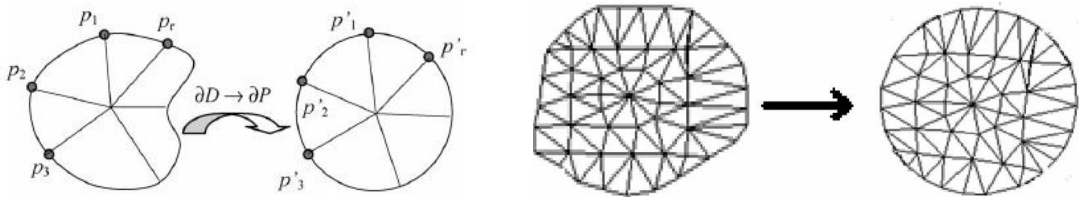
Şablonlarla 5 eksen takım yolu oluşturma stratejisinde, spiral takım yolları oluşturmada 'yüzey uyumlu haritalama modeli' adlı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin temelinde fiziksel yüzeyi bir düzlem üzerinde ve dairesel bir alanda ifade eden bir haritalama tekniği yer almaktadır. Bu düzlemsel bölge üzerinde oluşturulan spirale ait noktalar fiziksel yüzey üzerine aktarılarak *TT-TK* noktaları hesaplanabilir. Böylelikle daha sürekli takım yolları oluşmakta, yüksek hızda işleme için uygun takım yolları oluşturulabilmektedir. Bu metotta yapılan işlemler 3 basamakta gerçekleşmektedir. Bunlar sırasıyla; yüzey üçgenleştirme, yüzey uyumlu haritalama, takım yolu oluşturma olarak sıralanır. Aşağıda şekil 3.58'de bu işlem için gerekli adımlar şematize edilmiştir (Yu-Wen ve ark. 2006).



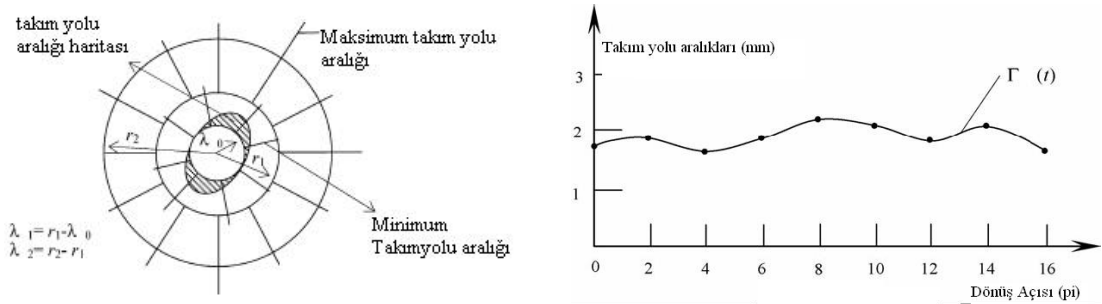
Şekil 3.58. Yüzey uyumlu harmonik haritalama adımları

Bu uyumluluk haritasının oluşturulmasında fiziksel yüzeyi düzlemsel bir birim disk üzerinde haritalanması tekniği kullanılır. Yüzey dış sınırı üzerindeki haritalama noktaları birim diskin çevresi üzerindeki haritalama noktalarına dönüşmektedir. Aşağıda şekil 3.59(a)'da bir yüzeyin birim diske transferi yer almaktadır. Bu transfer işlemi gerçekleştirildikten sonra lineer bir yaklaşımla iç noktaların haritalanması üçgenleştirme işlemi ile gerçekleşir. Aşağıda şekil 3.60(a,b)'de bu haritalama işlemi gösterilmektedir.

Haritalama işlemi bittikten sonra takım yolu aralıkları için bu birim disk üzerindeki parça dış sınırına ait maksimum ve minimum takım yolu aralıkları bulunur. Bu işlem için bir takım yolu aralığı haritası ve birim diskin merkezine göre dönüş açısına bağlı bir takım yolu aralığı grafiği elde edilir. Şekil 3.60'de bu takım yolu aralığı haritası ve grafiğine ait bir örnek gösterilmektedir (Yu-Wen 2006).

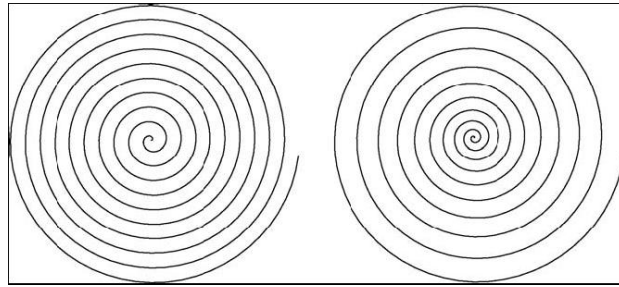


Şekil 3.59. a) Sınır noktalarının birim diske aktarılması. b)Uyumlu haritalama işlemi

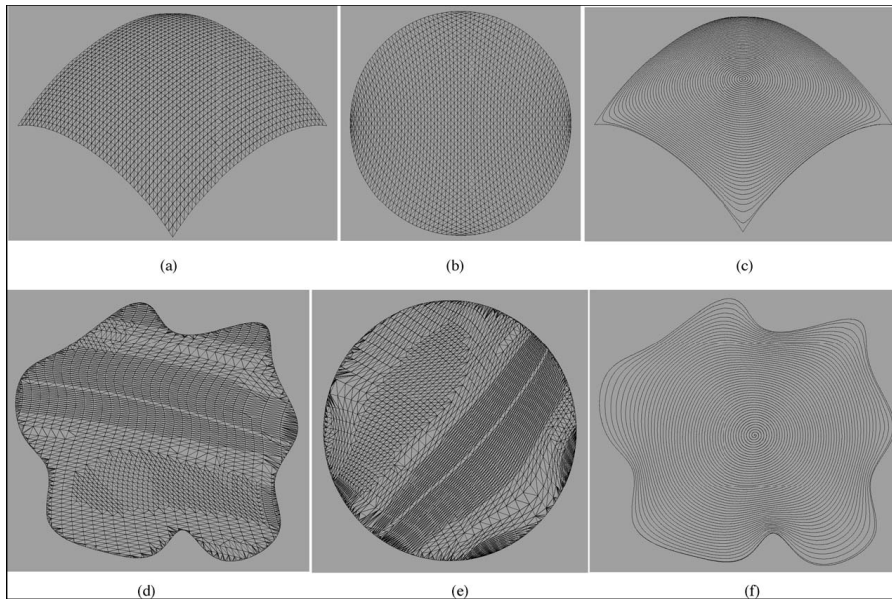


Şekil 3.60. a) Takım yolu aralığı haritası. b)Dönüş açısına bağlı takım yolu aralık değişimini gösteren takım yolu aralığı grafiği (Yu-Wen 2006).

Elde edilen bu takım yolu aralığı değerleriyle lineer olmayan bir spiral adım artışı hesap edilerek, dışa doğru genişleyen takım yolları için disk üzerinde haritalama işlemi yapılır. Bu haritalama işleminden sonra elde edilen lineer ve lineer olmayan spiraller aşağıda şekil 3.61’de verilmiştir. Bu 2 boyutlu disk üzerinde haritalama işleminden sonra bu noktaların fiziksel yüzey üzerine aktarılarak TT noktaları içten dışa doğru hesap edilir. TT noktalarının hesap edilmesinde yine üçgenleştirilmiş yüzey setleri kullanılır. Şekil 3.62’de bu teknikle elde edilen yüzeyler, üçgen yüzey setleri ve spiral takım yolu görülmektedir. Şekil 3.62(a,d) yüzeye ait rasgele elde edilmiş üçgen setleri (b,c) disk üzerine aktarılmış uyumlu üçgen yüzey setlerini (c,e) ise bu yüzeylere ait lineer olmayan spiraller kullanarak elde edilmiş takım yolları görülmektedir (Yu-Wen 2006).



Şekil 3.61. lineer ve lineer olmayan takım yolu spiralleri



Şekil 3.62. Üçgenleştirme ve takım yolu örnekleri

3.4. Takım Yolu Stratejilerinin Geliştirilmesi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, ana hatlarıyla Step dosya formatının açılarak B-Spline denkleminin elde edilmesi, yüzeye eğrilik analizine bağlı uygun takım seçimi ve izo-parametrik ve eş kalıntı talaş takım yolu stratejilerinin geliştirilmesi şeklinde sayılabilir.

3.4.1. Step formatından B-Spline denklem parametrelerinin elde edilmesi

Bilgisayar destekli geometrik modelleme alanında en çok tercih edilen eğrisel yüzeyler Nurbs ve B-Spline yüzeyleridir. Coons, Bezier ve Ferguson yüzeyleri bir takım eksiklik ve yetersizlikleri nedeniyle BDT alanında tercih edilmemektedir (Sarıöz 2005). Nurbs yüzeylerinin B-spline yüzeylerinden tek farkı her bir kontrol noktasında bir ağırlık fonksiyonunun tanımlanmasıdır. Bu ağırlık fonksiyonu eğriyi lokal olarak etkilediğinden B-spline yüzeylerine göre daha esnektir. Bu esneklik B-spline yüzeylerinde kontrol noktası sayısının artırılması ile elde edilebilmektedir (Choi 1991).

Bu tez çalışmasında eğrisel yüzey olarak B-spline yüzeyi kullanılmıştır. Solid Works 2009 programı kullanılarak yükseltme (extrude), süpürme “swept” ve “loft” gibi komutlarla elde edilen eğrisel yüzeyler STEP AP-214 formatında kaydedilmiştir. Kaydedilen bu Step dosyası Borland Delphi programlama dili kullanılarak oluşturulan algoritmalarla eğrisel yüzeye ait matematiksel denklem elde edilmiştir (Çelikkol 2003).

Extrude yapılmış yüzey tipinde 4x2 mertebeden, loft ve swept yapılmış eğrilerde ise 4x4 mertebeden yüzey oluştuğu belirlenmiştir. 4x2 ve 4x4 mertebeden yüzeylerin matematiksel denklemlerinin oluşturulması için iki farklı algoritma

geliştirilmiştir. Bir parametrik B-spline yüzeyinin matematiksel ifadesi aşağıdaki belirtilmiştir. (Cox 1972, De-Boor 1972)

$$S(u, v) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) \quad \begin{array}{l} u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad 2 \leq k \leq n+1, \\ v_{\min} \leq v \leq v_{\max}, \quad 2 \leq l \leq m+1, \end{array} \quad (3.63)$$

Bu ifade de kullanılan $N_{i,k}(u)$ ve $M_{j,l}(v)$, u ve v parametrik yönleri takip eden $(k-1)$ ve $(l-1)$ dereceden B-spline temel fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonların ifadesi de aşağıdaki gibi yazılır;

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & x_i \leq u \leq x_{i+1} \\ 0 & \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - x_i)}{x_{i+k-1} - x_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{(x_{i+k} - u)}{x_{i+k} - x_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \quad 1 \leq i \leq n+1$$

$$M_{j,1}(v) = \begin{cases} 1 & y_j \leq v \leq y_{j+1} \\ 0 & \end{cases}$$

$$M_{j,l}(v) = \frac{(v - y_j)}{y_{j+l-1} - y_j} M_{j,l-1}(v) + \frac{(y_{j+l} - v)}{y_{j+l} - y_{j+1}} M_{j+1,l-1}(v) \quad 1 \leq j \leq m+1$$

Bu ifadelerde X_i ve Y_j düğüm vektörlerinin elemanlarıdır.

$$[x] = [x_1 \dots x_{n+k}] \quad , \quad [y] = [y_1 \dots y_{m+1}] \quad (3.65)$$

Parametrik u ve v yönlerindeki kontrol noktası sayısı ($B_{i,j}$) sırasıyla $(n+1)$ ve $(m+1)$ 'dir. Derecesi $(k-1, l-1)$ olan bir B-spline yüzeyi dikdörtgensel bir kontrol neti ile tanımlanmaktadır. Her iki parametrik yöndeki düğüm vektörleri B-spline yüzeyinin şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır. Her iki yön için farklı tipte düğüm vektörlerinin kullanılması mümkün olmasına rağmen genelde aynı vektör tipi tercih edilmektedir (açık uniform, nonuniform, vs.)

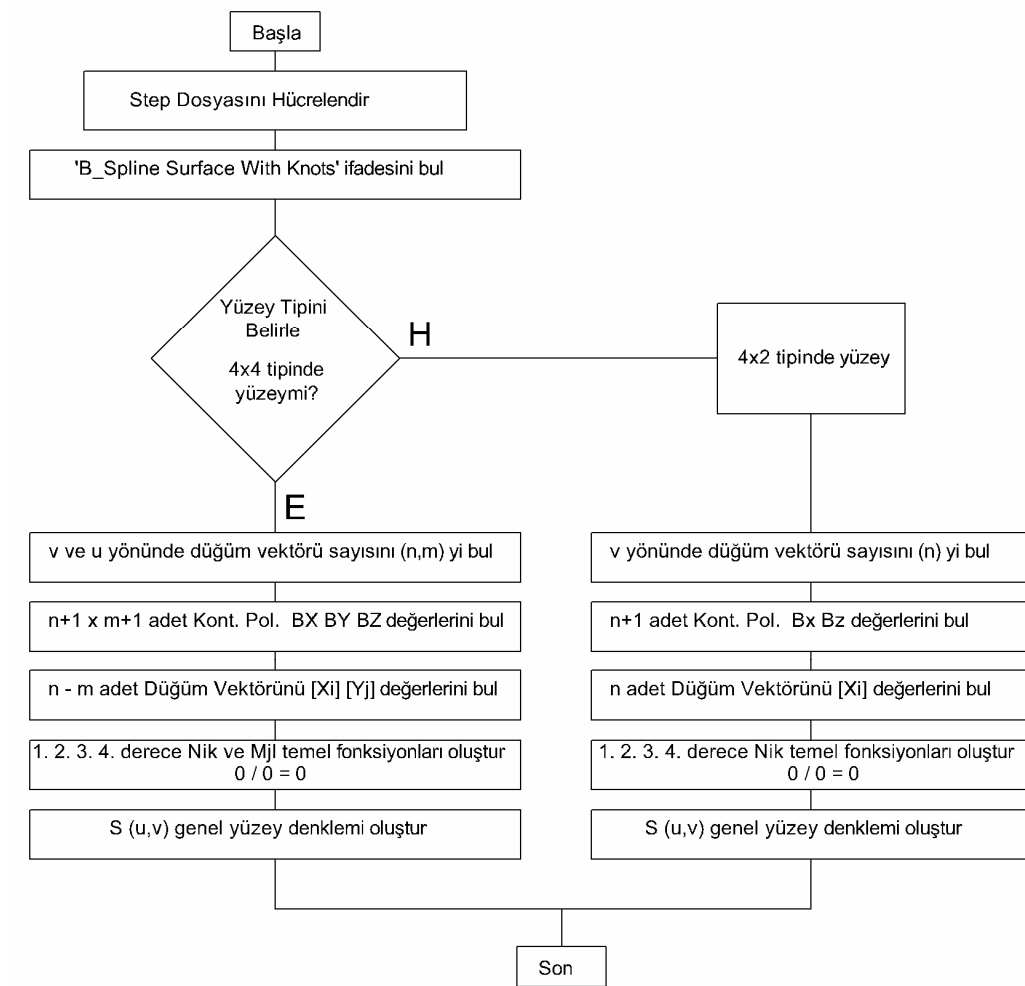
B-spline yüzeyinin matematiksel formülasyonunun oluşturulması amacıyla, Step dosya formatından gerekli değişkenlerin alınabilmesi için geliştirilen yazılım içinde, öncelikle step dosyası düzensiz text formatından, virgülle ayrılmış veriler (CSV, Comma Separated Values) dosyasına çevrilmiştir. Bu çevrimin amacı Step dosyasında kayıtlı değişkenleri belli satır ve sütunlardaki hücrelere otomatik olarak dağıtılmasıdır. Böylelikle kurulan algorithmda hücrelerdeki değerler okunabilecek hale gelmiştir. Aşağıdaki Tablo 3.2’de örnek bir B-Spline yüzeyinin Step dosyasında kayıt formatı yer almaktadır. Örnek Step dosyası EK-A’da verilmiştir.

Tablo 3.2. B-Spline yüzeyinin Step dosyasında kayıt formatı

Entity (Öğe)	Attribute (Tip)
B_SPLINE_SURFACE_WITH_KNOTS('NONE', 3, 3, (#1, #2, #7, #4, #6, #50, #158, #157), (#15, #155, #154, #153, #152, #151, #150, #149), (#14, #147, #146, #145, #144, #143, #142, #141), (#14, #139, #138, #137, #136, #135, #134, #133), (#13, #131, #130, #129, #128, #127, #126, #125), (#12, #123, #122, #121, #120, #119, #118, #117), (#11, #115, #114, #192, #191, #190, #189, #188), (#18, #186, #185, #184, #183, #182, #181, #180)), .UNSPECIFIED., .F., .F., .F., (4, 1, 1, 1, 1, 4), (4, 1, 1, 1, 1, 4), (0.0000, 0.2010, 0.3530, 0.7010, 0.7070, 1.0000), (0.0000, 0.3330, 0.4880, 0.6660, 0.6820, 1.0000), .UNSPECIFIED.);	Öge adı, u-v derece (Kelime,Tamsayı-Tamsayı) B _{i,j} Kontrol Noktası listesi (Dizi - Dizi 2x2 Kartezyen koordinat dizisi) b_spline_surface_formu (Tanımlama) u_kapalı, v_kapalı_kend. kesişen (Mantık T/F) u tekrarlama (Tamsayı dizisi) v tekrarlama (Tamsayı dizisi) u düğümü } (Parametre değeri Listesi-Reel) v düğümü } (Parametre değeri Listesi-Reel) düğüm tipi (Tanımlama)

Step dosyasından gerekli verilerin alınabilmesi için kurulan işlem akış diyagramı şekil 3.63’de verilmiştir. Bu algorithmda yüzeyin tipine göre iki farklı durum ortaya çıkmaktadır. İlk yüzey tipinde 4x4 mertebeden bir yüzeye ait değerlerin alınarak yüzey denkleminin elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu yüzey tipi “loft” ve “swept” komutları kullanarak yapılmış oldukça karmaşık şekilli yüzeyleri analiz edebilmektedir. İkinci durum ise bir B-spline eğrisinin yükseltilecek “extrude” elde edilmesiyle oluşan 4x2 mertebeden bir yüzeydir. 4x2 mertebeden bir eğride mertebesi 4 olan yöne ait tek bir parametrik yöne ait değerlerin alınması yeterlidir. Mertebesi iki olan yön düz bir çizgi şeklinde olduğundan takım yolu oluşturulurken sadece koordinatının verilmesi yeterlidir.

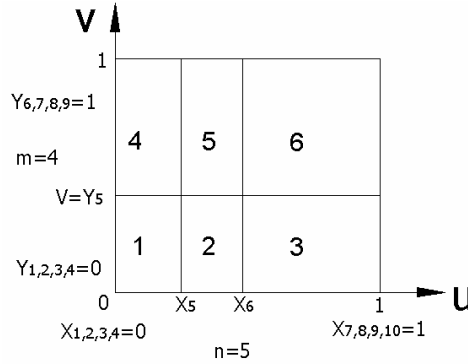
İşlem Akış Diyagramı I



Şekil 3.63. Genel yüzey denklemini işlem akış diyagramı

Bu algoritma ile kurulan genel yüzey denklemini u, v ye bağlı genel bir fonksiyondur. B-Spline yüzeylerinin önemli bir özelliği de çok karmaşık yüzeylerin yüzey yamalarına bölünerek ifade edilebilmesidir. Parametrik u, v değişkenleri sadece ait oldukları yüzey yaması sınırlarında tanımlıdır. Yüzey yama sayısı, n, m ile sınırları ise $[X_i]$ ve $[Y_j]$ düğüm vektörleri ile belirlenir. Düğüm vektörü sayısı n, m olan 4. mertebeden bir yüzeyde $(n-2) \times (m-2)$ adet yama bulunur. Kontrol poligonları ise yine ait oldukları yama içerisinde fonksiyona dâhil edilmektedir. Şekil 3.64'de 6

yamadan oluşan 4 mertebeden, örnek bir eğrisel yüzeyin parametrik alan ifadesi yer almaktadır.



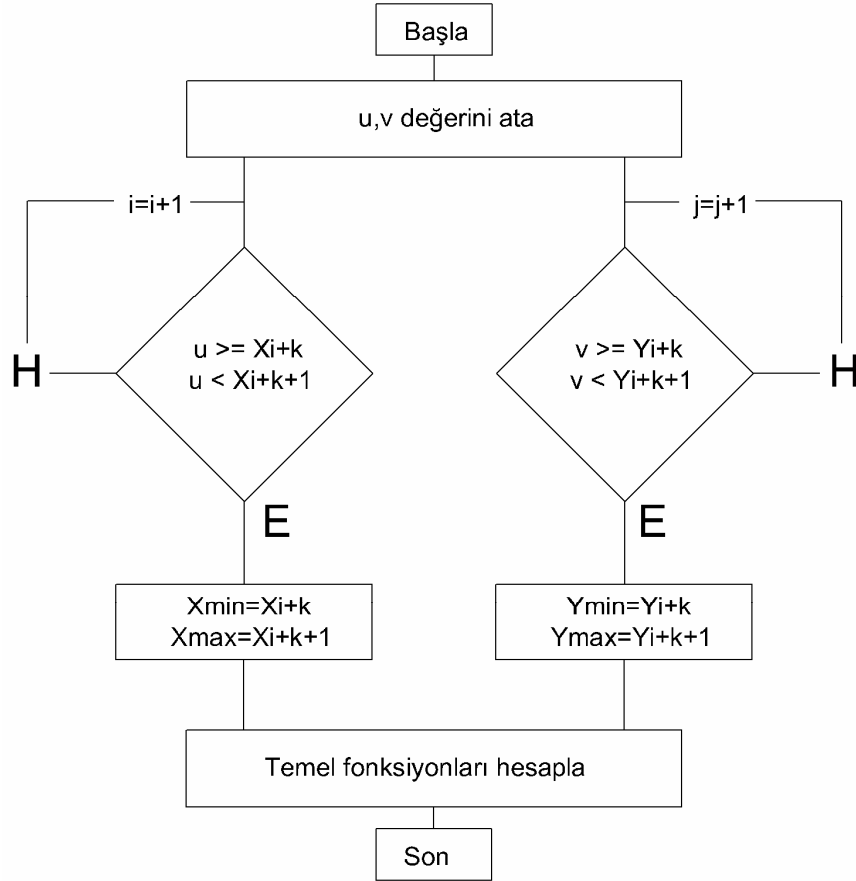
Şekil 3.64. Altı yamadan oluşan 4. mertebeye ait parametrik alan.

Bu parametrik yüzeyde u yönünde 6 adet, v yönünde 5 adet kontrol poligonu noktası mevcuttur. Yüzey u yönünde $n-2:=3$, v yönünde $m-2=2$ adet parçaya ayrılarak toplan 6 adet yama oluşturmuştur. Parametrik u yönünde ilk yama 0 ile $X5$ arasında, ikinci yama $X5$ ve $X6$ arasında tanımlıdır. Yama tanım aralıklarını belirleyen ise düğüm vektörleridir. Yüzey üzerinde her hangi bir parametrik noktaya karşılık gelen $S(u,v)=(x,y,z)$ koordinatları hesap edileceği zaman öncelikle parametrik u,v değerlerinin hangi yama aralığına girdiği bulunmalıdır. Her yama aralığında temel fonksiyon ve yamaya ait kontrol poligonu noktaları değişmektedir.

Bu durumda parametrik alandaki u,v noktasına ait TT koordinat değeri bulunurken, parametrelerin tanımlı oldukları yamaya ait düğüm vektörü sınırlarında hesaplanması için işlem akış diyagramı II yazılmıştır (Şekil 3.65). Her hangi bir noktada TT koordinatı hesap edilirken temel fonksiyon hesaplanmadan önce bu algoritma ile parametrenin hangi yama sınırları içinde kaldığı bulunmaktadır. Bu algoritma içinde, verilen bir u,v parametrik noktaya karşılık gelen N_{ik} ve M_{jl} temel fonksiyonlarını hesaplayan bir prosedür yazılmıştır. 4. mertebeden bir temel fonksiyonu hesaplamak için 1. 2. 3. mertebeden tüm temel fonksiyonların hesaplanması gereklidir. Bu prosedür içinde tüm temel fonksiyonlar denklem 3.77 deki şartlar sağlanacak şekilde hesaplanmış ve denklem 3.76'daki ana döngü içerisinde kullanılabilir şekilde dizi haline getirilmiştir. Bu algoritmada yama

sınırları belirlenirken düğüm vektörü başlangıcı k mertebeden itibaren yapılır. Düğüm vektörlerinin ilk ve son değeri $(0-1)$ k defa tekrar edilir. B-spline yüzeylerinin bu özelliği eğrinin başlangıç ve bitiş noktalarının kontrol poligonunun ilk ve son noktası ile çakışmasını sağlar.

İşlem Akış Diyagramı II

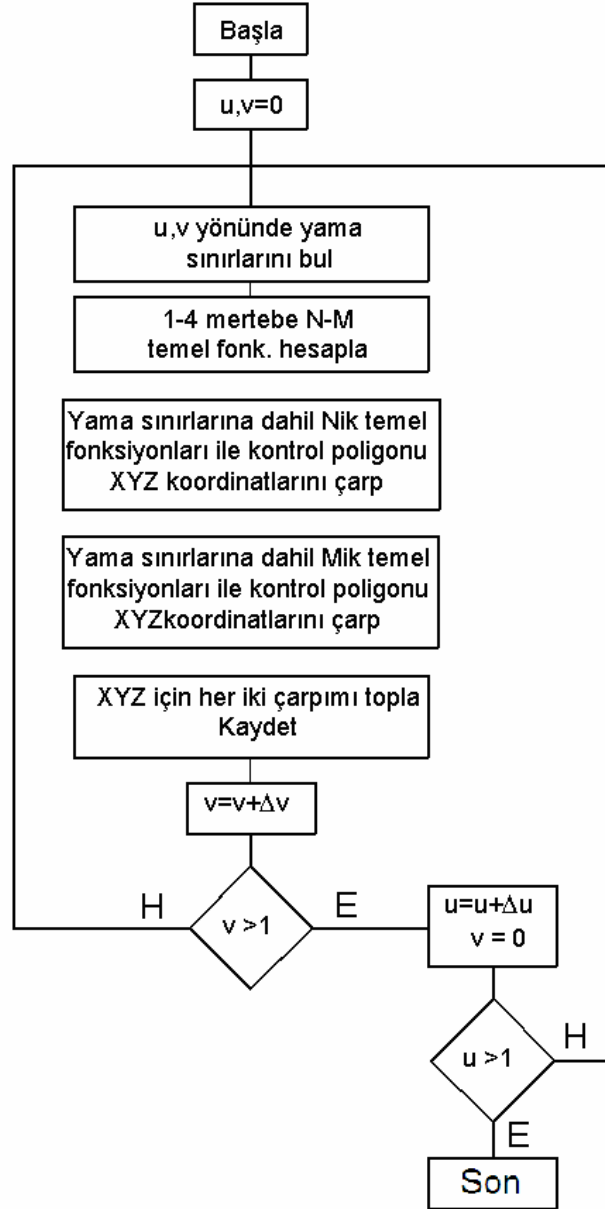


Şekil 3.65. Temel fonksiyon hesabı işlem akış diyagramı

Her iki yöne ait temel fonksiyonlar hesaplandıktan sonra, TT koordinatlarının hesaplanabilmesi için bir ana algoritma yazılmıştır. Bu algoritma daha önce yazılan algoritmaları ve prosedürleri kullanarak denklem 3.76 daki hesaplamayı gerçekleştirmektedir. Algoritmaya giren değerler parametrik (u,v) , çıkan değerler ise

o parametrik noktaya karşılık gelen yüzeye ait (x,y,z) koordinatlarıdır. Kurulan algoritmaya ait işlem akış diyagramı Şekil 3.66'da verilmiştir.

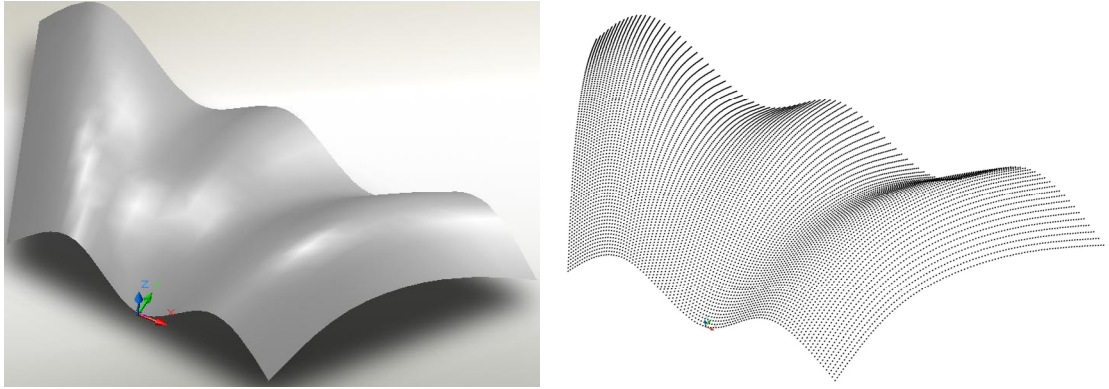
İşlem Akış Diyagramı III



Şekil 3.66. Yüzey denklemini hesaplama işlem akış diyagramı

3.4.2. Nokta bulutu ile yüzey denkleminin doğrulanması

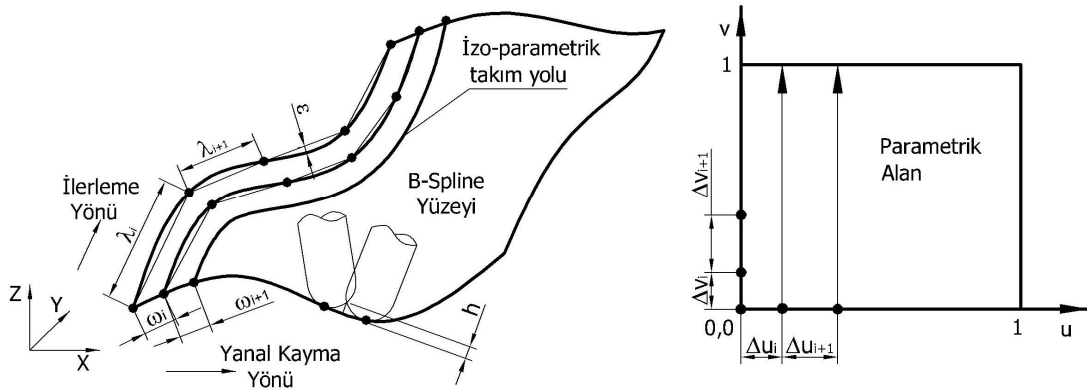
Bu ana algoritmanın ve izo-parametrik artışların doğruluğunu kontrol amacıyla, parametrelerin biri (u) sabit tutulup diğerine (v) değeri 1'e ulaşınca kadar çok küçük ($\Delta v=0.01$) artış verilmiştir. Artış verilen parametre 1'e ulaşınca sıfırlanarak, diğer parametreye belli miktarda artış ($\Delta u=0.01$) verilerek döngü her iki parametre de 1'e ulaşınca kadar tekrarlamıştır. Sabit bir u,v artışıyla elde edilen $TT(xyz)$ koordinatlarının doğruluğu, koordinatların bir nokta bulutu verisine dönüştürülmesi ile kontrol edilmiştir. Bu işlem için kaydedilen $TT(x,y,z)$ koordinatları kullanılarak, yazılım içerisinde nokta bulutu oluşturmak için AUTOLISP kodu hazırlayan bir prosedür yazılmıştır. Hazırlanan bu Autolisp kodu AutoCad programında çalıştırılarak nokta bulutu görsel olarak incelenebilmiştir. Şekil 3.67'de 4 farklı B-Spline eğrisinden loft komutu kullanılarak elde edilen ve 4×4 mertebeden $9 \times 5 = 45$ adet yamadan oluşan bir yüzey ve bu yüzeye ait nokta bulutu yer almaktadır.



Şekil. 3.67. 4×4 mertebeden bir B-spline yüzeyi ve yüzeye ait nokta bulutu.

3.4.3. TT noktalarının elde edilmesinde parametrik artışlarının hesaplanması

3 ve 5 eksen eğrisel yüzey frezelemede oluşturulan takım yolları çok küçük çizgisel takım hareketlerinden oluşmaktadır. Eğrisel yüzeyler ilerleme yönünde bu küçük takım yolu adımları ile işlenmektedir. Bu küçük takım yolu adımları ilerleme yönüne ait parametrede artırımlar verilerek elde edilebilmektedir. Bu parametre 1'e ulaşıncaya kadar tekrar sıfırlanır ve yanal kayma adı verilen diğer parametrik artırımı yapar. Yanal kayma yüzey pürüzlülüğü ve işleme zamanını direkt olarak etkileyen bir değişkendir. Fakat. Yanal kayma yönündeki yüzey pürüzlülüğü ve işleme zamanı, yüzeyin eğrilik yarıçapı, kesici takım yarıçapı ve verilen yanal kayma miktarından etkilenmektedir. Şekil 3.68'de her iki parametrik artırım miktarının yüzey ve parametrik alan üzerinde gösterimi yer almaktadır.

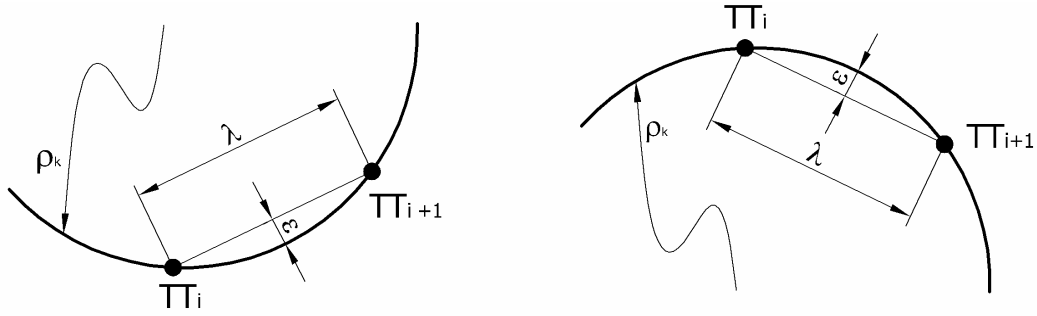


Şekil 3.68. Parametrik artışların yüzey ve parametrik alan üzerindeki gösterimi

3.4.3.1. İlerleme yönünde adım uzunluğunun hesaplanması

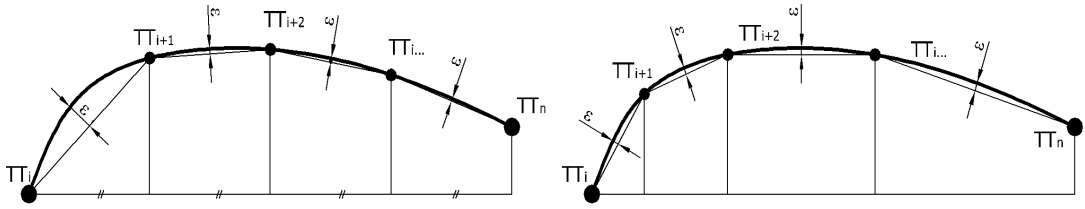
İlerleme yönünde verilen parametrik artış, eğrinin tepe noktası ile, iki TT noktası arasında oluşan kiriş arasında belli bir hata (ϵ) oluşturmaktadır. Bu hata oranı işlenecek parçanın toleransına göre, belli bir değere kadar kabul edilebilmektedir. Tüm ticari CAM programlarında bu hata oranı kullanıcı tarafından yüzeyin

hassasiyetine göre girilen bir değerdir. Şekil 3.69’da bu hatanın oluşumu içbükey ve dışbükey bir eğri üzerinde gösterilmektedir. Yüzey üzerinde izo-parametrik bir takım yolu oluşturulurken yani bir parametre sabit tutulup diğer parametre artırılırken hata oranının (ε) tüm eğri boyunca sabit ve belli bir değerde kalması istenir. Bu hata oranı çok küçük verilecek olursa takım yolu çok küçük çizgisel adımlardan oluşur.



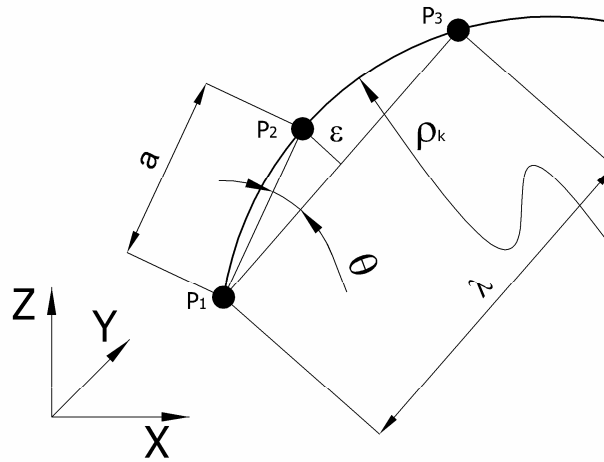
Şekil 3.69. İçbükey-dışbükey eğri üzerinde oluşan kirişsel hatanın oluşumu

Bu durum NC kodlarının oldukça uzamasına, yüksek hızda işleme olanaklarının azalmasına ve hafıza problemlerine yol açabilmektedir. Bu değerın çok büyük verilmesi de işlenen yüzeyin tasarım yüzeyine göre oldukça hatalı işlenmesine sebep olmaktadır. Hata oranının kabul edilebilir sınırdan sabit kalabilmesi ve takım yolu adımlarının kontrolü için TT noktası aralıklarının yüzey eğriliğine göre dinamik bir hale getirilmesi gerekir. TT noktası aralıklarının dinamik halde oluşabilmesi için parametrik alanda verilecek artırımlarında yüzey eğriliğine göre değişken olması gerekir. Değişken parametre artışı ilerleme yönünde eğrilik yarıçapının büyük olduğu yerlerde büyük, eğrilik yarıçapının küçük olduğu yerlerde küçük adımlar oluşmasını sağlar. Sabit parametre artışı ise yüzey eğriliği ρ_k ’nın büyük olduğu yerlerde hatayı azaltırken eğriliğin küçük olduğu yerlerde hata oranının artmasına sebep olmaktadır. Bu iki durum Şekil 3.70’de belirtilmiştir.



Şekil 3.70 a). Sabit parametre (Δv) artırımı değişken ϵ -hata b). Dinamik parametre (Δv) artırımı ϵ -sabit hata.

Yüzey eğriliğine ve hata miktarına bağlı takım yolu adımını bulabilmek için iteratif bir hesaplama algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma içinde takım yolu adımını hesaplamak için, öncelikle P_1 başlangıç noktasından takım ilerleme yönünde 2 adet başlangıç parametrik Δv artırımı ($\Delta v=0.01 - \Delta v=0.02$) yapılmıştır. Böylelikle başlangıç noktası dahil eğrilik yarıçapı üzerinde 3 adet nokta ($P_1, P_2, P_3; X_n, Y_n, Z_n$) bulunmuştur. Üç noktadan geçen eğrilik şekil 3.71’de gösterilmiştir.



Şekil 3.71. Üç noktadan geçen eğrilik ve hata miktarının hesaplanması

$$\lambda = |P_3 - P_1| = \sqrt{(X_3 - X_1)^2 + (Y_3 - Y_1)^2 + (Z_3 - Z_1)^2}, \quad (3.66)$$

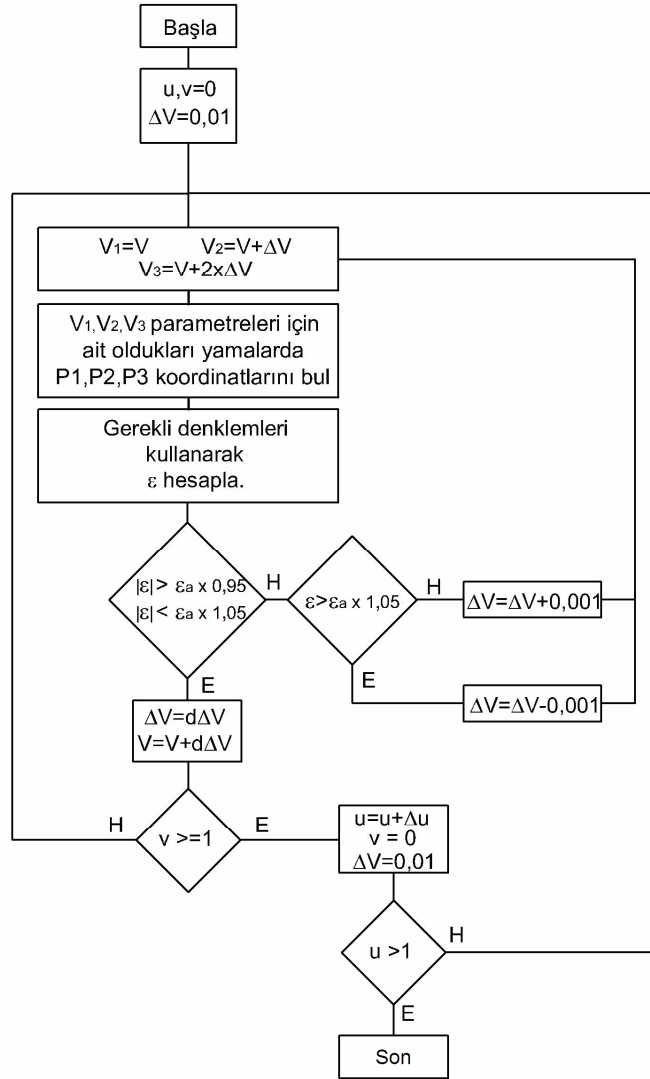
$$\lambda = 2 \cdot (2 \cdot \rho_k \cdot \varepsilon - \varepsilon^2)^{1/2}$$

$$\varepsilon = a \times \text{Sin}(\theta), \quad (3.67)$$

$$\rho_k = ((\lambda/2)^2 + \varepsilon^2)/(2 \times \varepsilon) \quad (3.68)$$

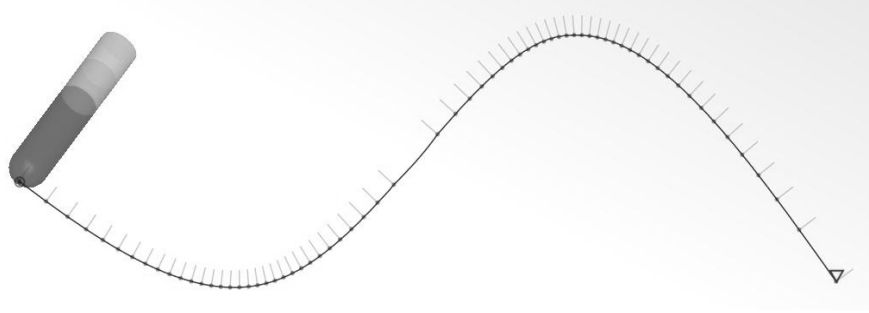
Birbirine çok yakın bu üç nokta kullanılarak adım uzunluğu (λ), kirişsel hata (ε) ve yüzey eğriliği (ρ_k) eşitlik 3.66-68 kullanılarak hesaplanabilmektedir. İterasyonlarda hesaplanan kirişsel hata, kullanıcı tarafından izin verilen hatadan (ε_a) büyük ise başlangıç parametre artış değerleri Δv bir öncekine göre azaltılarak, hesaplanan hata izin verilen hatadan küçük ise başlangıç parametre artış değerleri Δv artırılarak yeni bir hata hesaplanmaktadır. Hesaplanan hata izin verilen hataya $\pm \%5$ kadar yakın oluncaya kadar iterasyona devam edilmektedir. İzin verilen hata aralığına ulaşıncaya kadar bir sonraki adımın hesabına başlanır. Bu işlem parametre 1'e ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Daha sonra yanal kayma yönündeki parametre u artırılarak her bir izo-parametrik yön için aynı işlemler tekrar edilir. Böylelikle ilerleme yönünde her bir adımda eşit hata yapılmış ve takım yolu sayısı kontrol altına alınmış olur. Uygun bir adım uzunluğu hesaplanırken yapılan iterasyon sayısını ve hesaplama süresini azaltmak için özel bir prosedür geliştirilmiştir. Bu prosedürde hesaplanan hata farkına göre, bir sonraki iterasyon için gerekli değişim de hata oranına bağlı dinamik olarak değişmektedir. Eşitlik 3.66-68 kullanarak oluşturulan işlem akış diyagramı IV şekil 3.72'de verilmiştir.

İşlem Akış Diyagramı IV



Şekil 3.72. Kirişsel hata hesaplama işlem akış diyagramı

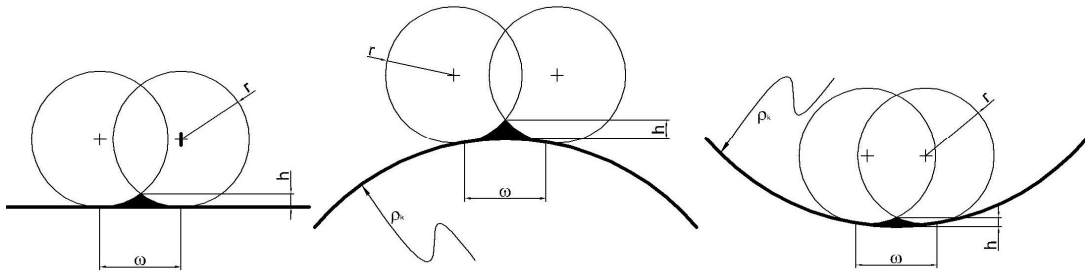
Kurulan algoritma neticesinde elde edilen TT koordinatları şekil 3.73'de bir örnek bir izo-parametrik yol üzerinde gösterilmiştir. Yüzey eğrilik yarıçapının düştüğü bölgelerde adım uzunluğu λ kısalarak TT noktaları sıklaşmıştır. Yüzey eğrilik yarıçapının artarak lineer bir çizgiye yaklaştığı bölgelerde ise adım uzunluğu λ artarak TT noktaları seyrekleşmiştir.



Şekil 3.73. Eğriliğe bağlı adım yolu uzunluğunun eğri üzerinde gösterimi

3.4.3.2. Yanal kayma yönünde adım uzunluğunun hesaplanması

İlerleme yönünde toleransa bağlı artırımlar yapılarak parametrik v değeri 1'e ulaşıncaya yapılacak olan parametrik u artırımıyla oluşan yanal kayma ω şekil 3.74'de gösterilmektedir. Yanal kayma miktarının kalıntı talaş yüksekliği h üzerine olan etkisi düzlemsel, içbükey ve dışbükey yüzeylerde farklılık göstermektedir. Bu yüzden her farklı yüzey tipinde farklı formüller kullanılmıştır.



Şekil 3.74. Yanal kayma miktarının kalıntı talaş yüksekliğine etkisi

Belirlenen kalıntı talaş yüksekliğine (h) bağlı yanal kayma (ω) veya verilen bir yanal kaymaya bağlı oluşan kalıntı talaş yüksekliği eşitlik 3.69-70 ile hesaplanabilmektedir (Lo 1999).

$$\omega = \sqrt{(8 \cdot |\rho_k| \cdot r \cdot h) / (|\rho_k| + r \cdot \text{Sign}(\rho_k))} \quad \text{Eğrisel yüzey} \quad (3.69)$$

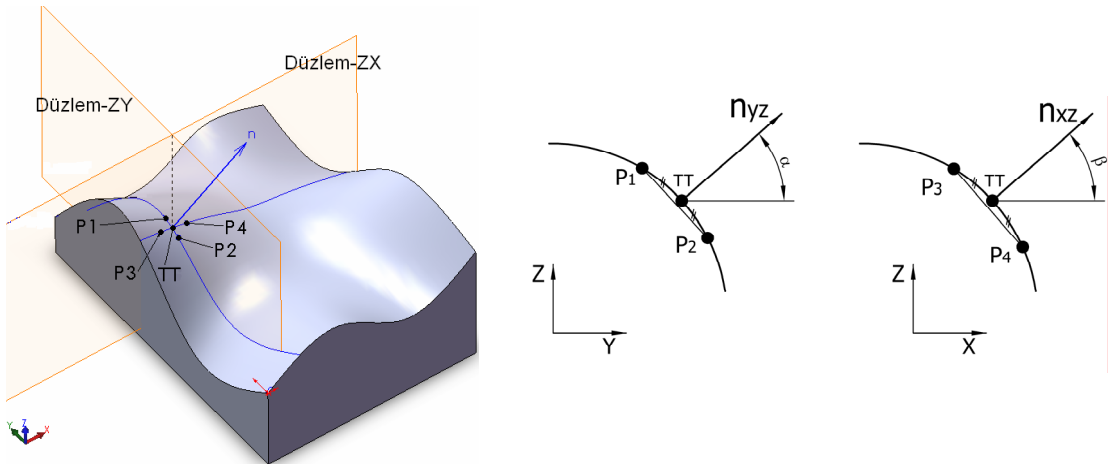
$$\omega = \sqrt{8 \cdot r \cdot h} \quad \text{Düzlemsel yüzey} \quad (3.70)$$

Yüzey eğriliğinin dışbükey olması durumunda $\text{Sign}(\rho_k)=+1$ yüzey eğriliğinin içbükey olması durumunda $\text{Sign}(\rho_k)=-1$ olmaktadır. Yüzey eğrilik yarıçapının büyüyerek sonsuza yaklaştığı düzlemsel yüzeylerde ise eşitlik 3.70 kullanılmaktadır. Yanal kayma miktarı fiziksel yüzey üzerinde kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Hesaplanan yanıl kayma miktarının verilebilmesi için gerekli parametrik artış değeri ise direk olarak hesaplanamamaktadır. Çünkü parametrik yön boyunca artışlar verildikçe yüzeye ait eğrilik yarıçapı ve bu yarıçapın eğimi ve konumu değişmektedir. Dolayısı ile verilen her parametrik artırımın fiziksel yüzeyde oluşturduğu yanıl kaymanın hesaplanması gerekir. Bu hesaplama için bir algoritma geliştirilmiş olup her takım yolu prosedüründe farklılık göstermektedir. Bu yüzden yüzeyde verilecek artırımın, parametrik karşılığının belirlenmesi takım yolu oluşturma prosedürleri içinde ayrı ayrı açıklanacaktır.

3.4.4. Yüzey Normali ve Yön Vektörlerinin Hesaplanması

Beş eksen işlemede takıma verilecek oryantasyon açılarının (A, C) bulunabilmesi için her bir TT noktasına ait yüzey normal vektörlerinin bulunması gerekmektedir. Bulunan bu normal vektörleri TT verilerinden TK verilerinin elde edilmesi ve tablaya verilecek eğim (*tilting-A*) ve dönme (*rotation-C*) açılarının tezgâh kinematiğine göre hesaplanmasında kullanılacaktır. Çokgenleştirilmiş yüzey setleri ve Z-harita gibi parametrik olmayan yüzey normallerinin hesaplanmasından hareket edilerek farklı bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Sheppard metodu adı verilen, yüzey normallerinin hesaplanmasında TT noktasının etrafındaki üçgenlerin yüzey normallerinin ağırlıklı ortalaması alınmaktadır (Jun ve ark 2003). Fakat parametrik bir yüzeyi bir Z-haritasına veya çokgenleştirilmiş yüzeylere çevirmek yüzey hassasiyetini düşürmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen yüzey normali hesaplama yönteminde ise ilerleme ve yanal kayma yönünde oluşturulan çok küçük iki kirişin yatayla yaptığı açılarının ters kinematik dönüşümünden faydalanılmıştır. Şekil 3.75'de yüzey üzerindeki bir TT noktasına ait $P1-P2$ ve $P3-P4$ kirişleri gösterilmektedir. Bu küçük boyuttaki ($\approx 2 \mu m$) iki kiriş kullanarak, yüzey normal vektörünün $ZX-ZY$ düzlemlerine ait iki izdüşümü bulunabilmektedir.



Şekil 3.75. Yüzey normallerinin hesaplanması için oluşturulan noktalar ve kirişler

$P1-P2$ ve $P3-P4$ noktalarının elde edilmesinde ise TT noktasına ait parametrik noktada çok küçük $\Delta v, \Delta u$ artırma ve eksiltme işlemi yapılarak elde edilmiştir. Yani herhangi bir u, v parametrik noktasında kirişlerin oluşturulması için gerekli P_1, P_2, P_3, P_4 noktaları aşağıdaki şartlar sağlanarak elde edilmiştir.

$$|P_1 - TT|, |P_2 - TT|, |P_3 - TT|, |P_4 - TT| < \approx 2 \mu m,$$

$$P_1 = S(u, v - \Delta v) = x_1, y_1, z_1$$

$$P_2 = S(u, v + \Delta v) = x_2, y_2, z_2$$

$$P_3 = S(u - \Delta u, v) = x_3, y_3, z_3$$

$$P_4 = S(u + \Delta u, v) = x_4, y_4, z_4$$

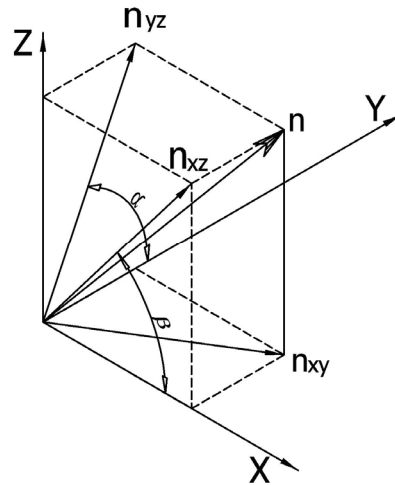
Bu noktaların hesaplanmasında, TT noktasına uzaklığı $2 \mu m$ 'yi aşmayacak şekilde verilen Δu ve Δv miktarının hesabı orantıyla hesaplanmıştır. Öncelikle u, v

noktasına bir ön artırım verilerek, oluşan geçici aralık hesaplanmış hesaplanan aralık ile ön artırım miktarı oranlanarak $2 \mu m$ 'ye tekabül edecek Δu ve Δv miktarları hesaplanabilmiştir. Elde edilen noktalar kullanılarak şekil 3.76'da belirtilen α, β açılarının hesaplanması Eşitlik 3.71'de verilmektedir.

$$\begin{aligned}\alpha &= \pi/2 - \tan^{-1} [(z_2 - z_1) / (y_2 - y_1)] \\ \beta &= \pi/2 - \tan^{-1} [(z_4 - z_3) / (x_4 - x_3)]\end{aligned}\quad (3.71)$$

Eşitlik 3.71 ile birim normal vektörünün 2 izdüşüm vektörü bulunmaktadır. Bu iki vektörün bulunması normal vektörünün hesaplanması için yeterlidir. Şekil 3.76'da normal vektörün izdüşümleri gösterilmektedir. İzdüşüm vektörlerinin yatayla yaptığı α, β açılara bağlı olarak yüzey normali birim vektörünün $n = (n_x, n_y, n_z)$ hesaplanması eşitlik 3.72 ile hesaplanabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\sin^{-1}(\cos \beta)) \times \cos(\tan^{-1}(\tan \beta / \tan \alpha)) \\ \cos(\sin^{-1}(\cos \beta)) \times \sin(\tan^{-1}(\tan \beta / \tan \alpha)) \\ \sin(\sin^{-1}(\cos \beta)) \end{bmatrix}\quad (3.72)$$



Şekil 3.76. Yüzey birim normal vektörü ve bileşenleri

Bu yöntemle hesaplanan yüzey normali, bir CAD programında oluşturularak test edilmiş ve yüzey normalinin maksimum $0,00025^\circ$ gibi oldukça hassas bir hata oranıyla hesaplanabildiği görülmüştür. Yüzey çokgenleştirilerek normal vektör hesabı yapılsaydı aynı hassasiyeti sağlamak için yüzeyin $0,002$ mm'lik üçgenlere bölünmesi gerekirdi. Böyle bir işlem milyarlarca verinin hesaplanması ve yorumlanmasını kapsamakta ve aynı zamanda hesaplama süresini uzatmaktadır. Geliştirilen metotta ise sadece TT noktalarının yanında 4 adet geçici bir nokta hesaplanarak oldukça hassas, hızlı ve kesin bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir.

Takımın talaş kaldırarak ilerlediği yönü belirten ilerleme yön vektörü (f) ise yine yüzey normali birim vektörünün hesaplanmasında kullanılan kirişler yardımıyla hesaplanabilir. Takım ilerleme yönü Y eksenini doğrultusunda iken $f=(f_x,f_y,f_z)$ vektörü;

$$f = (0, \text{Cos}(\alpha), \text{Sin}(\alpha)) \quad (3.73)$$

şeklinde hesaplanırken, takım ilerleme yönü X eksenini doğrultusunda iken;

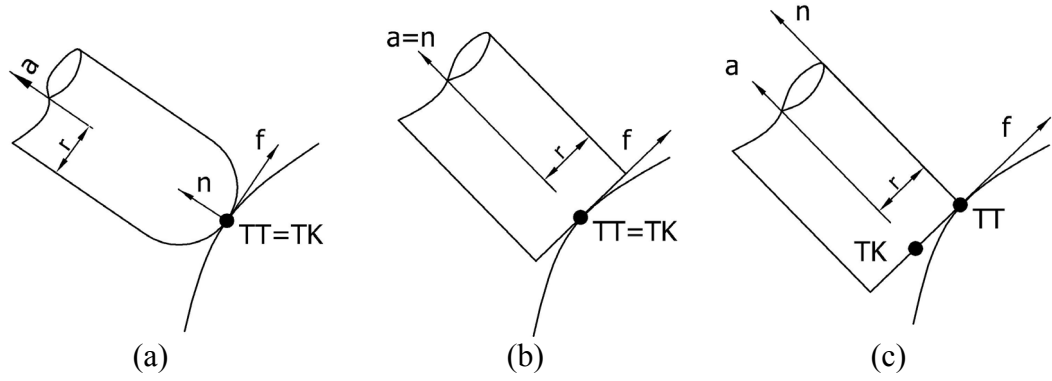
$$f = (\text{Cos}(\beta), 0, \text{Sin}(\beta)) \quad (3.74)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir.

3.4.5. Takım konum verilerinin hesaplanması

Beş eksen işlemede takımın parçaya temas ederek talaş kaldırdığı ve takım ile yüzeyin teğet konumunda bulunduğu nokta takım temas TT noktası olarak adlandırılır. Fakat takımın bu temas noktası parça eğriliğine ve takım profiline göre sürekli değişmektedir. Takımın parçaya istenen TT noktasında temas edebilmesi için takıma verilen konum ise takım konum noktası TK olarak adlandırılır. NC kodu oluşturulurken ise TK verileri kullanılmaktadır. Dolayısı ile elde edilen her bir TT verisinin TK verisine çevrilmesi gerekir. TK verisi hesaplanabilmesi için kullanılan

takım boyutu ve tipi ile yüzey normali bileşenleri kullanılır. Küresel ve düz uçlu parmak freze için Yüzey normalinin takım eksenine paralel olduğu bir noktanın gösterimi şekil 3.77’de verilmiştir.



Şekil 3.77. Yüzey normali takım eksenine paralel konumda iken TT ve TK noktalarının gösterimi

Şekil 3.77(a)’da küresel uçlu parmak freze TT noktasında yüzey normaline göre konumlama ve oryantasyon yapmıştır. Böyle bir durumda TT noktası aynı zamanda TK noktası olarak kullanılabilir. Bazı durumlarda takımın uç kısmı yerine küre merkezi TK olarak kullanılabilir. Bu durumda $TK=TT+(n.r)$ şeklinde bir dönüşüm gerekmektedir. Şekil 3.77(b)’de ise düz uçlu parmak freze TT noktasında konumlama yapmakta ve yüzey normali ile takım eksenine çakışık durumdadır. Böyle bir durumda yine $TT=TK$ durumu söz konusudur. Fakat böyle bir durumda parmak frezenin orta kısmında bulunan boşluk etkin talaş kaldırmayı engeller. Burada takımın şekil 3.77(c)’de olduğu gibi yarıçap kadar geri ötelenmesi gerekir. Bahsedilen bu öteleme $TK=TT-(f.r)$ şeklinde yapılabilir. Bu şekilde talaş kaldırma, 5 eksen için önerilen en etkin talaş kaldırma şeklidir. Fakat bu yöntem sadece dışbükey yüzeylere uygulanabilir.

Şekil 3.77 (a-b) de TT noktaları takım çapı ve kesme hızının sıfıra indiği noktaya tekabül ettiğinden yine etkin bir talaş kaldırmadan söz edilemez. Zorunlu bir durum olmadığı müddetçe takım çapının sıfır olduğu noktaya oryantasyon yapacak takım yolu oluşturma tavsiye edilen bir durum değildir. Bu durumu ortadan kaldırmak için takım eksenine ile yüzey normali arasında bir fark açısı verilir. Bu

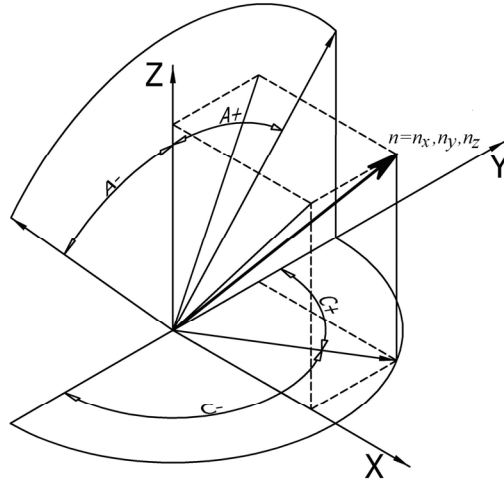
3.4.6.1. Eğim ve dönme açılarının (A-C) hesaplanması

Eğimli-döner (tilt-rotary) bir dik işleme tezgâhında takım eksenini sürekli Z eksenine paralel bir konumdadır. Yüzey normallerinin takım eksenini ile aynı eksene çakıştırılması için bir oryantasyon işleminin yapılması gerekmektedir. Oryantasyon işleminde yüzey normali ile takım eksenini paralel hale getirmek için tablaya belli miktarda eğim ve dönme hareketi verilmektedir. Eğim ve dönme açıları (A, C) yüzey normali bileşenlerine göre düz kinematik dönüşümlerle elde edilir (David 2004, Sergey ve ark 2004). A, C açıları eşitlik 3.75 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} C &= \tan^{-1} (n_x / n_y) \\ A &= \tan^{-1} (\sqrt{n_x^2 + n_y^2} / n_z) \end{aligned} \quad (3.75)$$

Yüzey normal vektörünün XY düzlemine göre izdüşüm vektörünün Y eksenini ile yaptığı açı, dönme açısı (C) olarak tanımlanır. Yüzey normali vektörünün, dönme açısı (C) kadar ZY düzlemi üzerine döndürülmesiyle elde edilen iz düşümünün Z eksenini ile yaptığı açı ise eğim açısı (A) olarak tanımlanır. Eğim ve dönme açısının pozitif ve negatif durumları şekil 3.79'da belirtilmiştir.

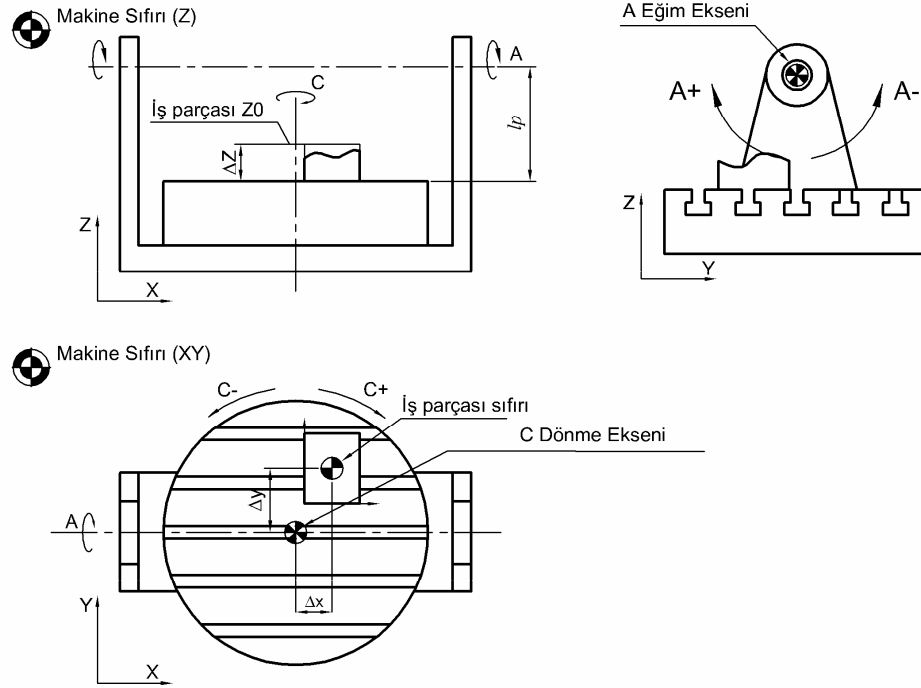
Şekilde 3.79'da görüldüğü gibi eğim ve dönme açıları pozitif ve negatif yönde oluşabilmektedir. Bunun sebebi aynı yüzey normaline her iki şekilde de erişilebilmesidir. Postprocessor aşamasında koordinatlar oluşturulup NC kodları yazdırılırken tezgâhın programlama formatına uygun şekilde pozitif ve negatif dönüşüm ($A = -A$, $C = -C$) yapılmaktadır. Her beş eksen tezgâhın açısal olarak hareket limitleri mevcuttur. Bu çalışmada Mazak Variaxis-500 tezgâhını referans alınmıştır. Bu tezgâhın açısal hareket limitleri A-Eğim ekseninde $+30^\circ$ ve -120° ve C-dönme ekseninde $\pm 360^\circ$ dir. Bu işlem için makine formatının tanıtıldığı bir makine yapılandırma ara yüzü geliştirilmiştir (EK-C).



Şekil 3.79. Dönme (C) ve eğim (A) açılarının oluşumu.

3.4.6.2. Takım Konum verilerinin dönüştürülmesi

Tablaya eğim ve dönme açısı verildikten sonra yüzey normali, takım eksenine paralel hale gelmektedir. Verilen bu eğim ve dönme açısı tezgâh kinematiğine göre tüm *TK* noktası *xyz* koordinatlarını değiştirecektir. Dolayısı ile tüm *TK* noktaları verilen bu eğim ve dönme açısına göre yeniden hesaplanmalıdır. Burada her tezgâhta farklılık gösteren tezgâh kinematiğine özel ters kinematik dönüşümler kullanılmaktadır. Şekil 3.80’de eğimli döner tablalı bir beş eksen tezgâha ait şematik gösterim yer almaktadır. Ters kinematik dönüşümler yapılırken; öncelikle iş parçası koordinat sistemine ait *TK* noktaları $p^{wp}(x,y,z)$, dönel tablanın dönme ve eğim eksenleriyle olan ΔX , ΔY , ΔZ uzaklık farkları kadar transformasyon yapılır. Bu transformasyon işleminden sonra dönmeye ve eğime bağlı dönüşümler elde edilir. Bu koordinatlar post aşamasında makine koordinat sistemine aktarılarak parça programı hazırlanır.



Şekil 3.80. Beş eksen eğimli-döner tablalı tezgâhta eksen takımlarının şematik gösterimi

İş parçası koordinat sistemine ait bir p^{wp} (xyz) noktasının döner tabla koordinat sistemine olan transferi aşağıda belirtilmiştir (David 2004)

$$\begin{aligned} x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \\ z' &= lp - \Delta z + z \end{aligned} \quad (3.76)$$

Elde edilen bu x',y',z' koordinatlarının dönmeye (C) ve eğime (A) bağlı koordinat dönüşümü ile $p^m(X,Y,Z)$ makine koordinat sistemine aktarılarak, NC kodu oluşturmak için gerekli nihai koordinatların elde edilmesi eşitlik 3.77 ile verilmektedir (David 2004).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(C) & -\sin(C) & 0 \\ \cos(A) \sin(C) & \cos(A) \cos(C) & -\sin(A) \\ \sin(A) \sin(C) & \sin(A) \cos(C) & \cos(A) \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Bahsedilen bu dönüşümlerin yapılabilmesi için daha önce hesaplanan ($TT=x,y,z$) ve oryantasyon (A,C) verileri kullanılarak bir prosedür geliştirilmiştir. Bu prosedürde TT koordinatları TK koordinatlarına çevrilerek kaydedilmiştir. Programa eklenen bir ara yüz ile tezgâhın kinematik özellikleri ve iş parçası bilgileri tanımlanabilmektedir. Bu arayüz EK-C’de verilmiştir.

Takım yollarının doğruluğunun kontrol edilmesi için tüm TK verilerinin düzenli şekilde tezgâh formatına uygun olarak *text* formatına aktarılması ve NC dosyası olarak kaydedilmesi gerekmektedir. Bu işlem için hareket komutunun (G0-G1), tezgah eksen komut karakterlerinin (X,Y,Z,A,C) tüm TK verilerinin (XYZ) ve tezgah tablasına verilecek takım oryantasyon açılarının (A,C) belli formatta yan yana dizildiği bir prosedür geliştirilmiştir. Bu işlem için daha önce STEP dosyasının analizinde kullanılan bir hücresel veri tablosu oluşturulmuştur. Tüm TK verileri ve eksen kodları bu tablodaki hücrelere dizilerek tablo *.nc uzantılı olarak text formatında kaydedilmiştir. Aşağıda hücre tablosunun formatı ve örnek çıktısı verilmiştir. Bu NC dosyası CİMCO® simülasyon programıyla açılarak noktasal takım yolu simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Aşağıda 5 eksen bir hareketin ISO formatına göre kodlanabilmesi için oluşturulan hücresel şablon ve örnek çıktısı yer almaktadır. Örnek çıktılar EK-D,E’de detaylı olarak verilmiştir.

G 1 X TK_x Y TK_y Z TK_z A O_A C O_C ;

G1 X110.456 Y21.567 Z-112.87 A-21.567 C345.556;

Şu ana kadar kurulan algoritmalar ve prosedürler kullanılarak her hangi bir B-Spline yüzeyinin tüm TT koordinatları ve oryantasyon açıları hesap edilebilmekte ve TK verilerine dönüştürülebilmektedir. Elde edilen TK verileri NC kodlarına çevrilebilmektedir. Bu algoritmalar kullanılarak oluşturulan takım yolu oluşturma stratejileri ayrıntılı şekilde belirtilmiştir.

3.4.7. İzo-parametrik takım yolu stratejileri

İzo-parametrik takım yolu oluşturma metodu takım yolu uygulamalarında çok sık kullanılan bir metottur. Bu metotta takıma verilen TT noktaları, parametrik alanda her hangi bir parametrik yöne (u,v) artışlar vererek hesaplanır. Takım ilerleme yönüne ait parametre belli bir sınıra ulaşınca diğer parametrik yönde yanal kayma verilerek işleme devam edilir. Bu parametre artışlarının seçimi işleme zamanı ve yüzey pürüzlülüğü açısından son derece önemlidir. Takım yolu oluşturulurken verilecek parametre artışlarının hesaplanabilmesi için yüzeyin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla yüzey eğriliğini analiz eden bir algoritma geliştirilmiştir. Bu analiz algoritmasında takım seçimi önerisi ve verilen yanal kaymaya göre oluşacak yüzey pürüzlülüğü bilgileri hesaplanabilmektedir. Kurulan programın ana menüsü ve takım yolu stratejisi seçim menüsü EK-F,G’de verilmiştir.

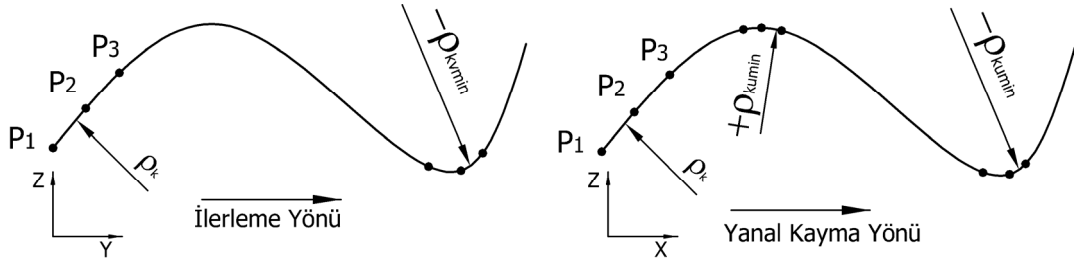
3.4.7.1. Lokal yüzey eğrilik analizi

İşlenen yüzey ile takım arasında dalma olmaması ve takımın yüzeyde talaş bırakmaması için takım seçiminin yüzey eğriliğine göre yapılması gerekmektedir. Yüzey üzerinde her iki parametrik yöne ait minimum içbükey eğrilik yarıçapı ρ_{kmin} biliniyorsa, bu eğrilik yarıçapından daha küçük yarıçapta bir takım seçimine karar verilebilir. Diğer taraftan, yanal kayma miktarına karar verilirken ise yanal kayma yapılan yöndeki minimum dış bükey eğrilik yarıçapının bilinmesi gerekir. Bu amaçla yüzeyi analiz ederek, her iki parametrik yön doğrultusunda minimum-maksimum iç ve dış bükey radyüsleri hesaplayıp kaydeden bir algoritma geliştirilmiştir. Bu analizin algoritmasının sonucunda verilen bir yanal kayma ω miktarının yüzeyde ne kadar yüzey pürüzlülüğü h_{max} oluşturacağı hesaplanabilmektedir. Veya izin verilen bir maksimum yüzey pürüzlülüğü elde etmek için verilmesi gereken yanal kayma miktarı hesap edebilmektedir. Bu analiz algoritmasının kaydettiği veriler şu şekildedir.

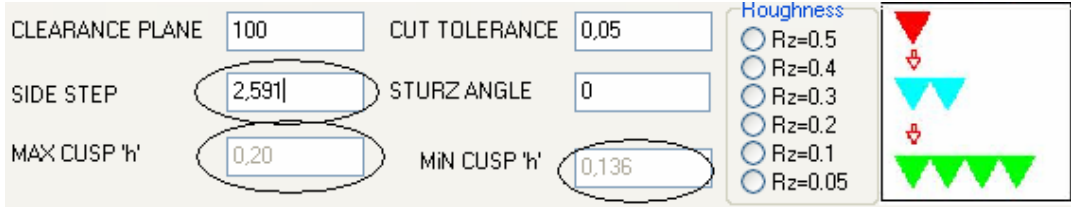
- 1-İlerleme yönünde ($Y, parametrik-v$) maksimum içbükey eğrilik yarıçapı
- 2-İlerleme yönünde minimum içbükey eğrilik yarıçapı
- 3-İlerleme yönünde maksimum dışbükey eğrilik yarıçapı
- 4-İlerleme yönünde minimum dışbükey eğrilik yarıçapı
- 5-Yanal kayma yönünde ($X, parametrik-u$) maksimum içbükey eğrilik yarıçapı
- 6-Yanal kayma yönünde minimum içbükey eğrilik yarıçapı
- 7-Yanal kayma yönünde maksimum dışbükey eğrilik yarıçapı
- 8-Yanal kayma yönünde minimum dışbükey eğrilik yarıçapı

Yanal kayma yönünde minimum iç bükey eğrilik yarıçapı ($-\rho_{kumin}$) kullanılarak, oluşacak en küçük kalıntı talaş yüksekliği h_{min} hesaplanabilmektedir. Çünkü verilen sabit yanal kayma en küçük kalıntı talaşı minimum iç bükey eğriliğin olduğu bölgede oluşturmaktadır. Aynı zamanda yanal kayma yönünde minimum dış bükey eğrilik yarıçapı ($+\rho_{kumin}$) kullanılarak, oluşacak en büyük kalıntı talaş yüksekliği h_{max} hesaplanabilmektedir. Böylelikle kullanıcı tarafından girilen bir yanal kayma miktarının yüzey üzerinde oluşturduğu maksimum ve minimum kalıntı talaş yüksekliği bir diğer anlamda yüzey pürüzlülüğü takım yolu oluşturulmadan önce değerlendirilebilmektedir. Tam ters olarak kullanıcının izin vermiş olduğu maksimum kalıntı talaş yüksekliğine h_{max} göre yanal kayma ω da takım yolu hesaplanmadan değerlendirilebilmektedir. Her iki ilerleme yönünde 3 nokta ile oluşturulan eğrilik yarıçaplarının ifadesi şekil 3.81’de verilmektedir.

Kullanıcının girdiği değere göre hesap yapan giriş menüsü şekil 3.82’de verilmiştir. 3 noktadan geçen eğrilik yarıçapını kullanarak analiz yapan işlem akış diyagramı V şekil 3.83’de verilmiştir. Burada izo-parametrik tarama kullanılmış ve eğri üzerinde oluşturulan 3 nokta ile eğrilik hesaplanmıştır. Tarama her iki yönde 0,001 lik parametrik artışlarla yapıldığı için oldukça hassas sonuçlar elde edilmiştir.

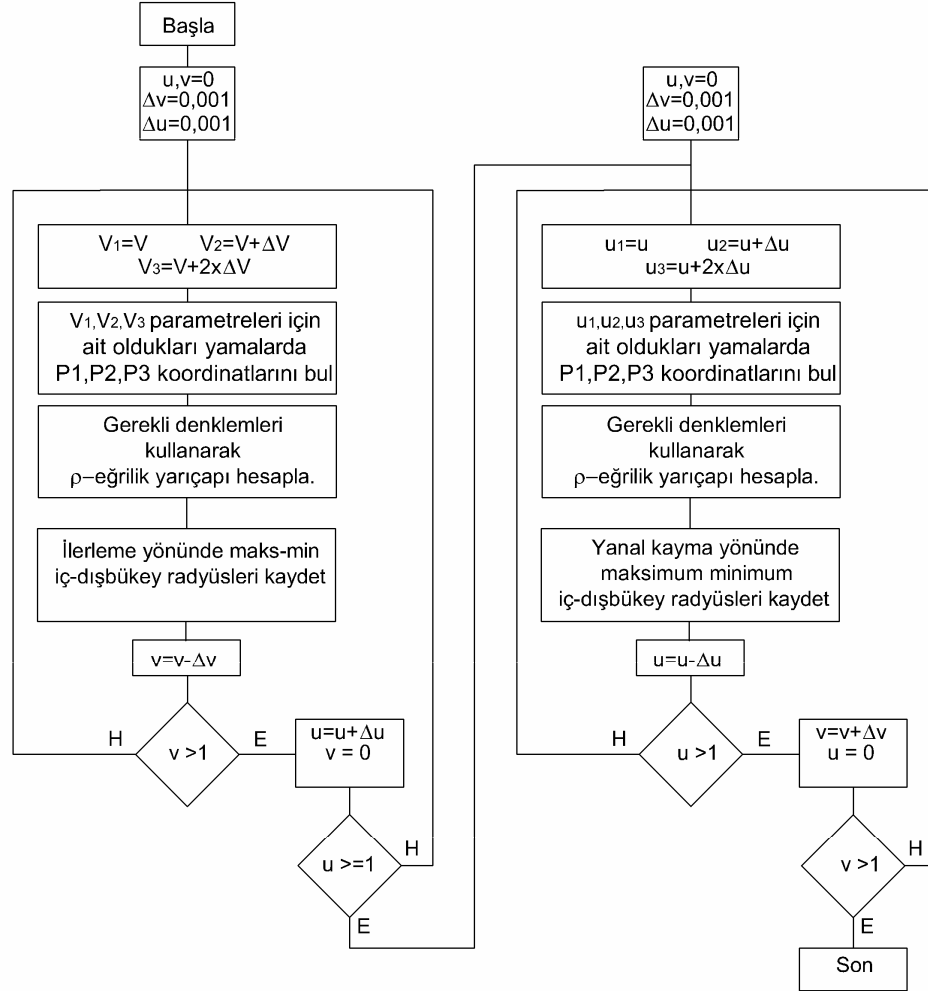


Şekil 3.81. İlerleme ve yanal kayma yönünde oluşan eğrilikler.



Şekil 3.82. Yanal kayma, maksimum ve minimum kalıntı talaş yüksekliği menüsü.

İşlem Akış Diyagramı V



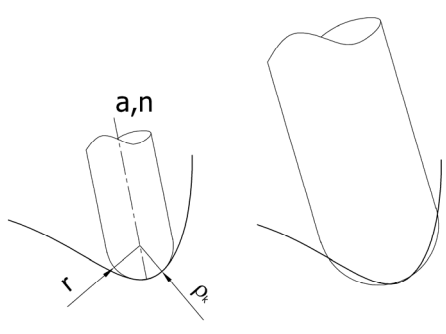
Şekil 3.83. Yüzey analizi işlem akış diyagramı

3.4.7.2. Kesici takım seçimi

3.4.7.2.1. Küresel uçlu takım seçimi

Analiz algoritması neticesinde ilerleme ve yanal kayma yönünde elde edilen minimum iç bükey radyüsler $(-\rho_{kmin}, -\rho_{kummin})$ kullanılarak takım seçimi önerisi gerçekleştirilmiştir. Kesici takım olarak küresel uçlu bir takım seçileceği durumlarda, takım temas noktasında yerel dalma oluşmaması için bu iki eğrilik radyüsünün

mutlak değerlerinden hangisi en küçükse seçilen takım radyüsü (r) o radyüse eşit veya daha küçük olmalıdır. Bu işlem için takım seçim sayfasında eğrilik yarıçaplarını gösteren ve dalma olmadan kullanılacak en büyük küresel uçlu kesici takım çapı öneren bir prosedür geliştirilmiştir. Şekil 3.84’de küresel uçlu takımın içbükey eğrilik yarıçapı üzerine konumlanması ve hatalı takım seçiminde oluşan yerel dalma gösterilmektedir.

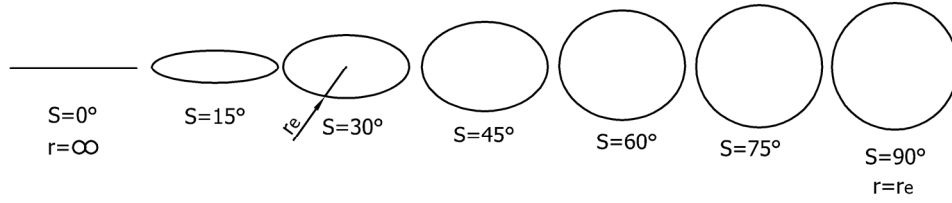


Şekil. 3.84. Minimum eğrilik üzerinde küresel takım ve yerel dalma

Küresel uçlu takım seçilirken yerel dalmanın oluşmaması için gereken şart;
 $r < |-\rho_{kvmin}|$ ve $r < |-\rho_{uvmin}|$ şeklinde ifade edilebilir.

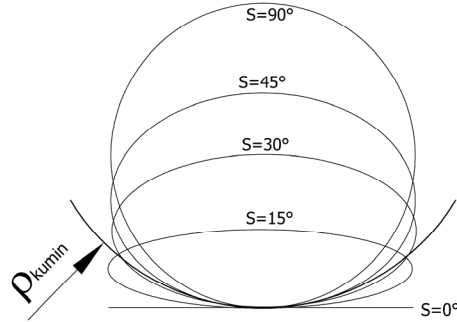
3.4.7.2.2. Düz uçlu kesici takım seçimi ve yerel-geri dalma analizi

Kesici takım olarak düz uçlu bir kesici takım kullanılması gerektiği durumlarda, takım seçimi küresel uçlu takımdaki gibi basit değildir. Çünkü iç bükey yüzeylerde düz uçlu takım kullanırken yerel dalmanın oluşmaması için, yüzey normali ile takım eksenine arasında bir fark açısının (S) verilmesi gerekmektedir. Verilen bu fark açısı ilerleme yön vektörü doğrultusunda kesici takımın profilini etkilemektedir. Öncelikle takım çapı ve o bölgede verilecek zorunlu fark açısının da tercih edilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda fark açısı genellikle 5-20° arasında önerilmektedir. Burada öncelikle düz uçlu kesici takıma verilen fark açısının takımda oluşturduğu efektif kesici radyüsünün bilinmesi gerekir. Efektif kesici takım radyüsünün (r_e) fark açısına (S) göre değişimi şekil 3.85’de belirtilmektedir.



Şekil 3.85. Fark açısının efektif kesici yarıçapına etkisi

Görüldüğü gibi fark açısı S arttıkça efektif kesici radyüsü r_e düşmektedir. Efektif kesici takım radyüsü $r_e=r/\sin(S)$ denklemi ile hesaplanabilir. Yanal kayma yönünde minimum içbükey eğrilik yarıçapı ρ_{kumin} ise, burada kullanılacak düz uçlu kesici takımın efektif kesici radyüsü ρ_{kumin} değerine eşit veya daha küçük olmalıdır. Yüzey eğrilik yarıçapı üzerinde fark açısına bağlı değişen efektif kesici radyüsü şekil 3.86’de belirtilmiştir. Şekil 3.86’da görüldüğü gibi fark açısının hatalı verildiği durumlarda yerel dalma oluşmaktadır.



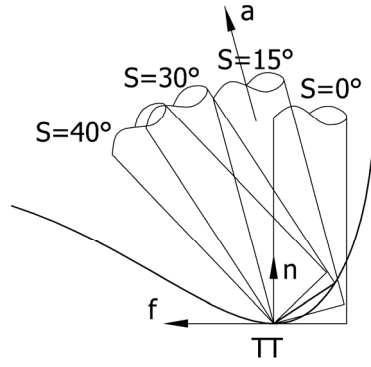
Şekil 3.86. Minimum eğrilik yarıçapı ve efektif kesici radyüsü

Şekil 3.86’ya göre 45° ’nin altındaki tüm fark açılarında dalma görülmektedir. Dalma durumunu engellemek için kesici takım çapı düşürülmeli veya fark açısı artırılmalıdır. Fark açısının belli olduğu bir durumda uygun kesici yarıçapı; $r \leq \rho_{kumin} \times \sin(S)$ şeklinde hesaplanabilir (Lo 1999). İşleme zamanını düşürmek için kesici takım radyüsünü mümkün olduğunca büyütmek gerekir. Bu durumda fark açısını da o nispette artırmamız gerekir. Fakat bu açının artırılması, makinenin açısal hareket limitleri dışına çıkmasına sebep olabilir. Minimum içbükey eğrilik yarıçapın oldukça büyük olduğu durumlarda kesici takım çapı da büyüyecektir. Bu durumda o çaplarda kesici takım bulunamayacağından kesici takım kullanıcı tarafından girilir ve

o çapa göre bir fark açısı hesaplanması gerekir. Bu aşamada iki farklı prosedür geliştirilmiştir. Bunlardan ilki minimum eğriliğe göre maksimum 20° lik bir açı farkı için önerilen kesici takım, ikincisi ise kullanıcının girdiği bir kesici takıma göre açı farkı önerisi şeklindedir. İlk prosedür eğrilik yarı çapının küçük olduğu ikincisi ise eğrilik yarıçapının oldukça büyük olduğu durumlarda kullanışlıdır. Örneğin minimum eğrilik yarı çapı; $\rho_{kumin}=100$ mm ise; burada algoritmanın 20° fark için önereceği kesici takım yarıçapı; $r=100 \times \sin(20)=34.2$ mm 'ye tekabül eder. Bu yarıçap da yaklaşık $D=68$ mm çaplı bir parmak frezeye tekabül eder ki böyle bir takımın temin edilmesi ve kullanılması uygun değildir. Böyle bir durumda kullanıcının seçtiği uygun bir kesici takım çapına göre ($D=10-20$ vb.) uygun bir fark açısı hesaplanır. Burada fark açısı $S=\sin^{-1}(r/\rho_{kumin})$ şeklinde hesaplanabilir.

Eğrilik yarıçapının küçük olduğu ikinci durumda ise, öncelikle 20° fark açısı için bir takım radyüsü hesaplanır. Bu takım radyüsü takım çapına çevrilerek en yakın standarttaki bir küçük takım seçilir. Bu seçilen yeni standart takım için yeniden fark açısı hesaplanır. Örneğin minimum içbükey eğrilik yarıçapı $\rho_{kumin} = 20$ mm ise; burada algoritmanın 20° fark için önereceği kesici takım yarıçapı; $r=20 \times \sin(20)=6,84$ mm'ye tekabül eder. Bu sayı takım çapına çevrilerek 13,68 mm elde edilir. Bu standartta bir takım bulunamayacağından bu çaptan daha düşük bir standart takım seçimi ($D=10-12$ vb.) gerçekleşir. Seçilen yeni takıma göre tekrar fark açısı $S=\sin^{-1}(r/\rho_{kumin})$ şeklinde yeniden hesaplanmalıdır. Seçilen takım $r=D/2=5$ olursa, burada verilmesi gereken minimum fark açısı 20° 'nin de altına düşerek $S=14,47^\circ$ şeklinde bulunur. Böylelikle yerel dalma durumu ortadan kaldırılmış olur. Bahsedilen şartlar takım seçim sayfasına eklenerek düz uçlu bir takım seçimi olduğu zaman uygulanmaktadır.

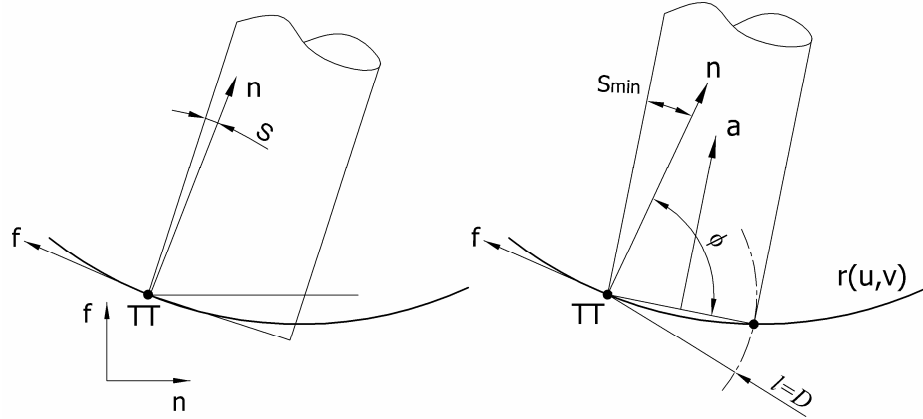
Düz uçlu takım kullanılırken, takımın ilerleme yönünde iç bükey yüzeylerde geri dalma olarak adlandırılan bir dalma oluşabilmektedir. Burada takımın ilerleme yönünün gerisinde kesme yapmayan boşluktaki ucu, işlenmiş yüzeye dalabilmektedir. Geri dalma olarak adlandırılan bu durumun oluşumu şekil 3.87 ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.87. Eğim açısı ve dalma eliminasyonu

Geride dalma riski takım çapı büyüdükçe ve ilerleme yönündeki minimum içbükey eğrilik yarıçapı düştükçe artmaktadır. Dolayısıyla ilerleme yönünde her içbükey noktada oluşan TT noktalarında geride dalmanın kontrol edilmesi gerekmektedir. Geride dalmanın tespit edildiği noktalarda ise fark açısı yüzey normaline göre dalma ortadan kalkıncaya kadar artırılmalıdır. Bu işlem için içbükey bölgelerde geride dalma kontrolü yapan bir prosedür geliştirilmiştir. Prosedürde içbükey noktadaki TT noktası hesaplandığı anda devreye giren bir algoritma geliştirilmiştir.

Algoritma TT noktasından geriye doğru tarama yaparak verilmesi gereken minimum fark açısını hesaplamaktadır. Tarama işlemi takım ucunun temas edebileceği son noktaya kadar yapılmaktadır. Bu mesafe TT noktasına en fazla takım çapı kadar uzak olabilir. Şekil 3.88(a)'da yerel dalma için verilen fark açısı düşük olduğu için takımın geri noktasında bir dalma oluşmaktadır. Bu dalma durumunun ortadan kaldırılabilmesi için verilmesi gereken minimum fark açısı S takımın diğer ucunun yüzeye temas ettiği durumda oluşmaktadır. Şekil 3.88(b)'de bu minimum fark açısının verildiği durumu göstermektedir. Kurulan prosedür, TT noktasından geriye doğru $l=D$ büyüklüğünde bir daire alanında tarama yaparak minimum fark açısını $S_{min}=\pi/2-\phi$ şeklinde hesaplamaktadır (Lo 1999).



Şekil 3.88. a) İçbükey noktada geri dalma oluşumu b) Dalmanın eliminasyonu

Dalma takımının taban kısmında her hangi bir noktada oluşabileceğinden sadece takım kenarında değil, takım tabanının yüzey üzerine düşen gölge alanında tarama yapan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu tarama işleminin fiziksel yüzey üzerinde ve parametrik alandaki ifadesi şekil 3.89(a-b)'de verilmiştir. Şekil 3.89(c) ise takım taban yüzeyinde yapılan tarama işlemi ve tarama açısı φ ile elde edilen takım sınırları P_e , P_s ve Δt tarama aralığını belirtilmektedir. Şekil 3.89.(d)'de ise her hangi bir tarama düzleminde minimum fark açısının hesaplanmasını ifade etmektedir.

Her hangi bir TT noktası hesaplandığı anda devreye giren bu dalma analizi prosedüründe tarama işlemi $\varphi = -\pi/2$ ile $+\pi/2$ arasında 1° lik artırımlarla yapılmıştır. Bu dalma analizi için kurulan algoritma adımları aşağıda açıklanmıştır.

Adım 1: Dalma analizine $\varphi = -\pi/2$ ile başla. Δt hesapla t yönünde P_o noktasını bul.

Adım 2: $-f$ yönünde parametrik artırımlarla P_s noktasını bul.

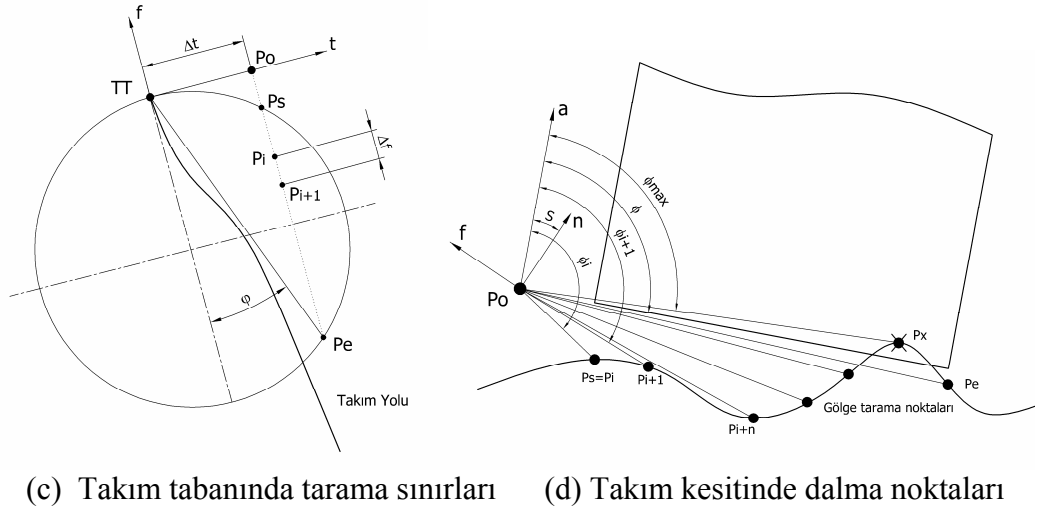
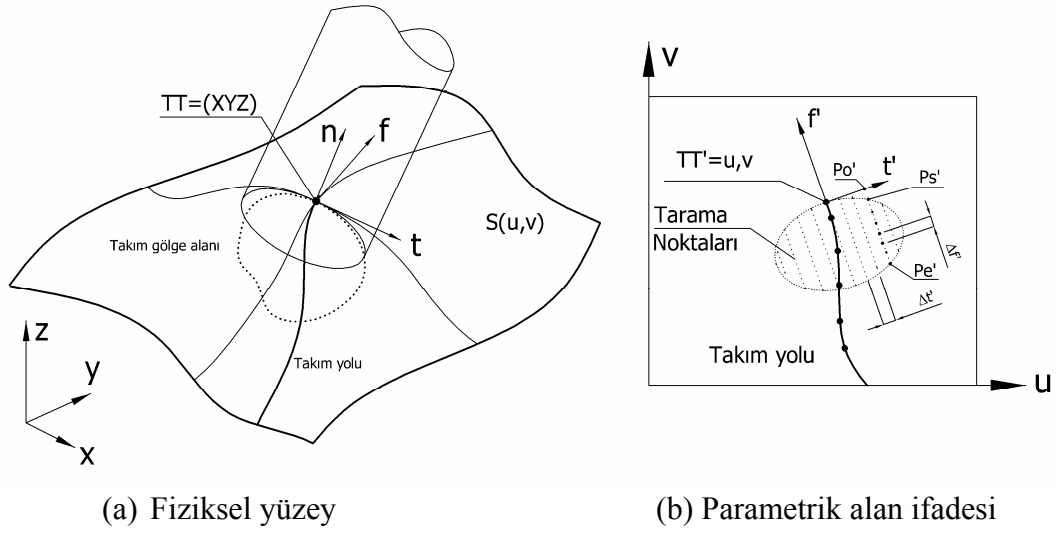
Adım 3: $-f$ yönünde parametrik artırımlarla P_e noktasına kadar P_i, P_{i+n} noktalarını bul

Adım 4: Her bir P_i tarama noktasında \square_i açısını hesapla, $S_i = \pi/2 - \square_i$ değerini kaydet.

Adım 5: Yerel dalmada verilen S açısı ile hesaplanan S_i değerini kıyasla.

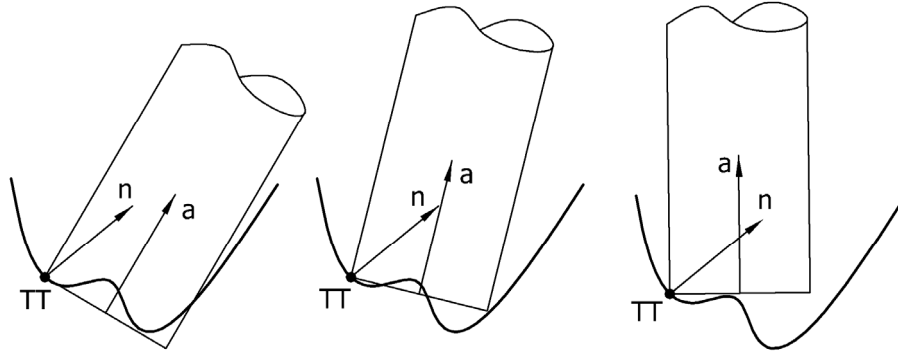
Adım 6: S_i değeri S 'den büyükse dalma eliminasyonu için S_i değerini kaydet.

Adım 7: φ açısını 1° artır. φ değeri $\pi/2$ den büyükse sonlandır değilse adım 1'e git.



Şekil 3.89 Takım gölge alanında geri dalma taraması.

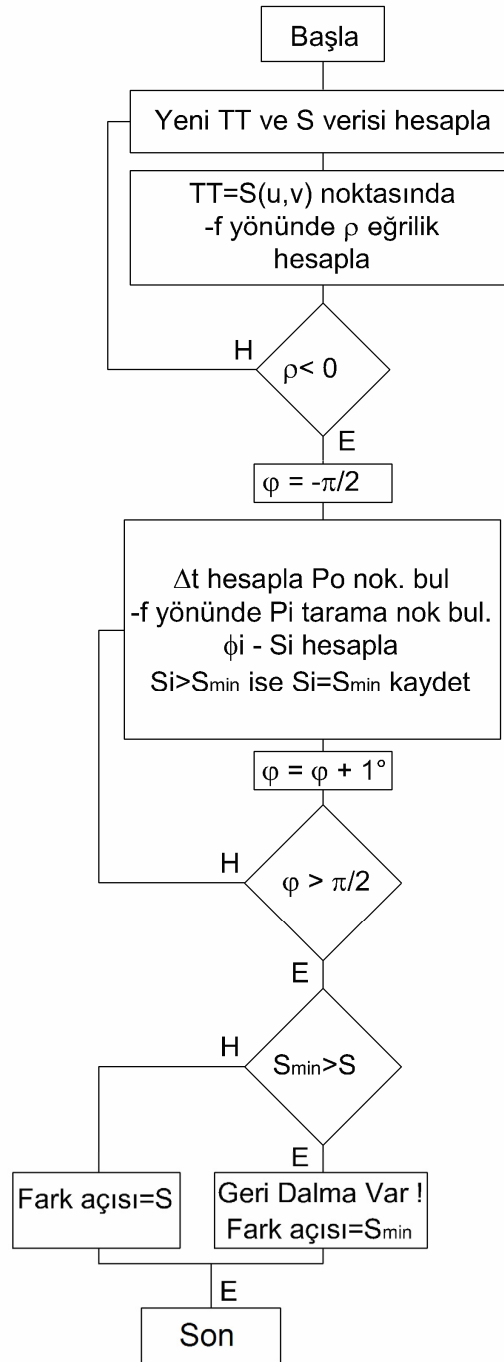
Her bir adımda hesaplanan fark açısı, daha önceki algoritmalar tarafından hesaplanan fark açılarından büyükse, o nokta için hesaplanan bu fark açısı kullanılır. Bu değer küçük çıkması durumunda ise fark açısında bir azaltma yapılmaz. Çünkü fark açısındaki azaltma yanal kayma yönündeki eğrilik üzerinde yerel dalma oluşturabilir. Tüm takım tabanında fark açısının hesaplanması orta noktalardaki muhtemel dalma noktalarını da ortaya çıkarmaktadır. Bu yüzden sadece uç noktada değil tüm taban yüzeyinde fark açısı hesaplanmıştır. Orta noktalarda oluşabilecek bu muhtemel dalma şekil 3.90'de belirtilmiştir.



Şekil 3.90. Orta noktada dalmanın oluşumu ve eliminasyonu

Şekil 3.90(a)'da verilen fark açısı yeterli olmayıp geri noktada bir dalma oluşturmaktadır. Şekil 3.90(b)'de ise takımın uç noktasına göre hesaplanan fark açısı da orta noktada bir dalma oluşturmaktadır. Bu durumda orta bölgede hesaplanan maksimum fark açısının kullanılması Şekil 3.90(c)'de gösterildiği gibi dalmayı ortadan kaldırmaktadır. İlerleme yönünde geri dalma analizi yapan işlem akış diyagramı şekil 3.91'de belirtilmiştir.

İşlem Akış Diyagramı VI



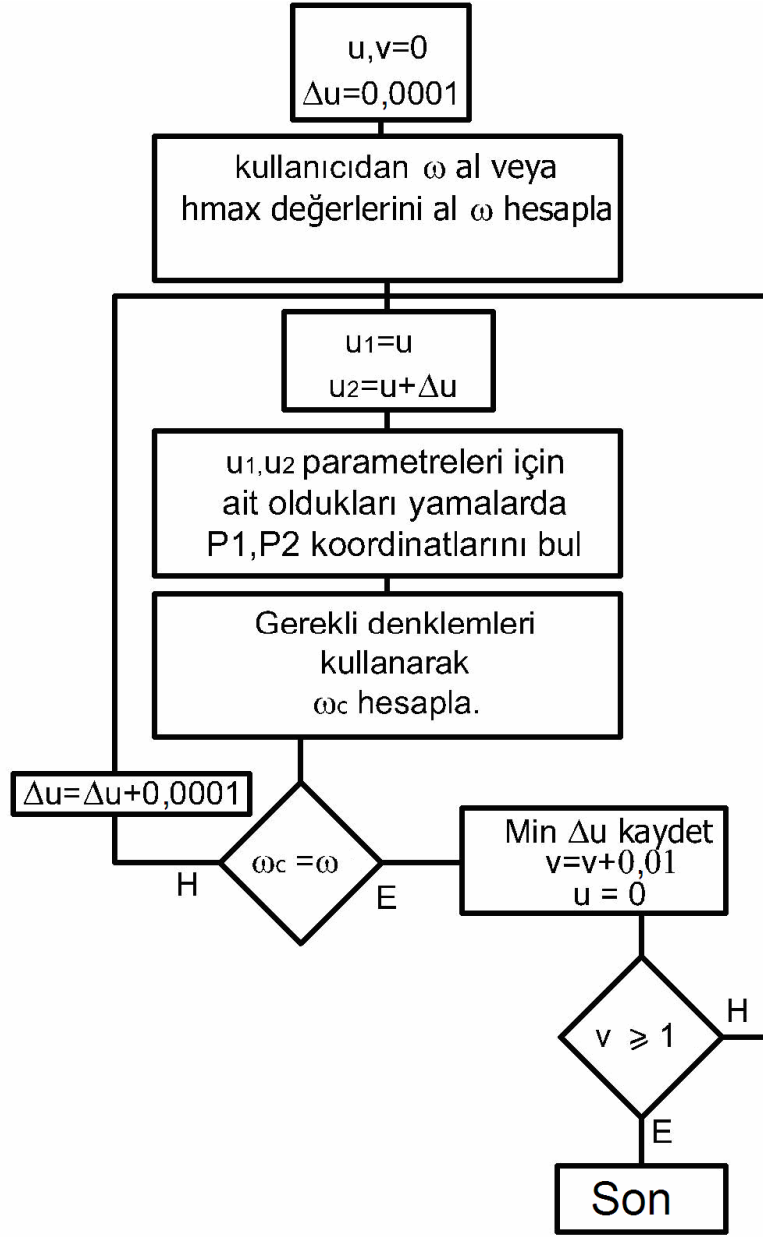
Şekil 3.91. Geri dalma analizi işlem akış diyagramı

3.4.8. Zig-Zag tek yön talaş kaldırma stratejisi.

Bu talaş kaldırma stratejisinde takım sürekli tek parametrik yönde ilerleyerek talaş kaldırmakta geri dönerken boşta gelmektedir. Bu yöntemin en büyük özelliği sürekli aynı tipde (aynı-zıt yönlü) frezeleme yapmasıdır. Bu yöntemin tek dezavantajı ise geriye doğru gelirken talaş kaldırmadan gelmesi ile işleme süresinin uzamasıdır. Bu işleme stratejisinde giriş parametreleri; kesme toleransı (ϵ) yanal kayma miktarı (ω) güvelik mesafesi, takım bilgileri ve kesme parametreleridir.

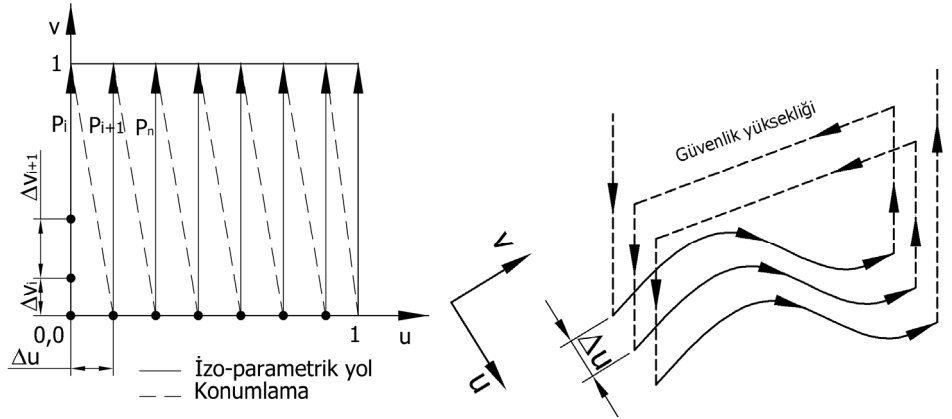
Bu takım yolu prosedüründe kullanıcı tarafından verilen yanal kayma miktarı ω milimetredir. Dolayısı ile bu yanal kayma artırım miktarının algoritma içerisinde verilecek parametrik artırım denkleğinin bulunması gereklidir. Çünkü verilen bir parametrik yanal kayma (Δu) yüzeyin her yerinde farklı bir yanal kayma (ω) miktarı oluşturur. Burada bulunması gereken parametrik yanal kayma miktarı, kullanıcının girdiği yanal kayma (ω) miktarına bağlı yanal kayma yönünde bulunan minimum dışbükey eğrilik yarıçapının bulunduğu parametrik bölgede hesaplanması gerekir. Minimum dışbükey eğrilik üzerinde hesaplanmasının sebebi en büyük kalıntı talaş miktarının bu bölgede oluşmasıdır. Bu noktaya göre Δu hesaplanması yapıldığı için diğer alanlarda oluşan kalıntı talaş bu bölgedekinden daha düşük olur. Kullanıcının girdiği ω yanal kayma miktarına karşılık gelen Δu parametrik artırımın hesaplanması için tüm yüzey analiz algoritmasının kaydettiği eğrilik yarıçapı bilgileri ve kirişsel hatanın hesaplanmasına benzer bir algoritma geliştirilmiştir. Parametrik u yönünde kullanıcının girdiği ω yanal kaymayı oluşturan minimum Δu miktarı $\pm 0,0001$ hassasiyetinde tarama yapılarak bulunmuştur. Takım yolu oluşturulurken verilecek parametrik yanal kayma olarak bulunan bu Δu miktarı kullanılmıştır. Aynı zamanda girilen yanal kayma miktarının oluşturacağı maksimum ve minimum kalıntı talaş miktarları da takım yolu oluşturulmadan da görülebilmektedir. Veya kullanıcının izin verdiği maksimum kalıntı talaş miktarının oluşabilmesi için verilmesi gereken yanal kayma miktarını hesaplanabilmektedir. Girilen yanal kayma miktarının parametrik karşılığını hesaplayan işlem akış diyagramı VII şekil 3.92'de verilmektedir.

İşlem Akış Diyagramı VII



Şekil 3.92. Yanal kayma hesaplayan işlem akış diyagramı

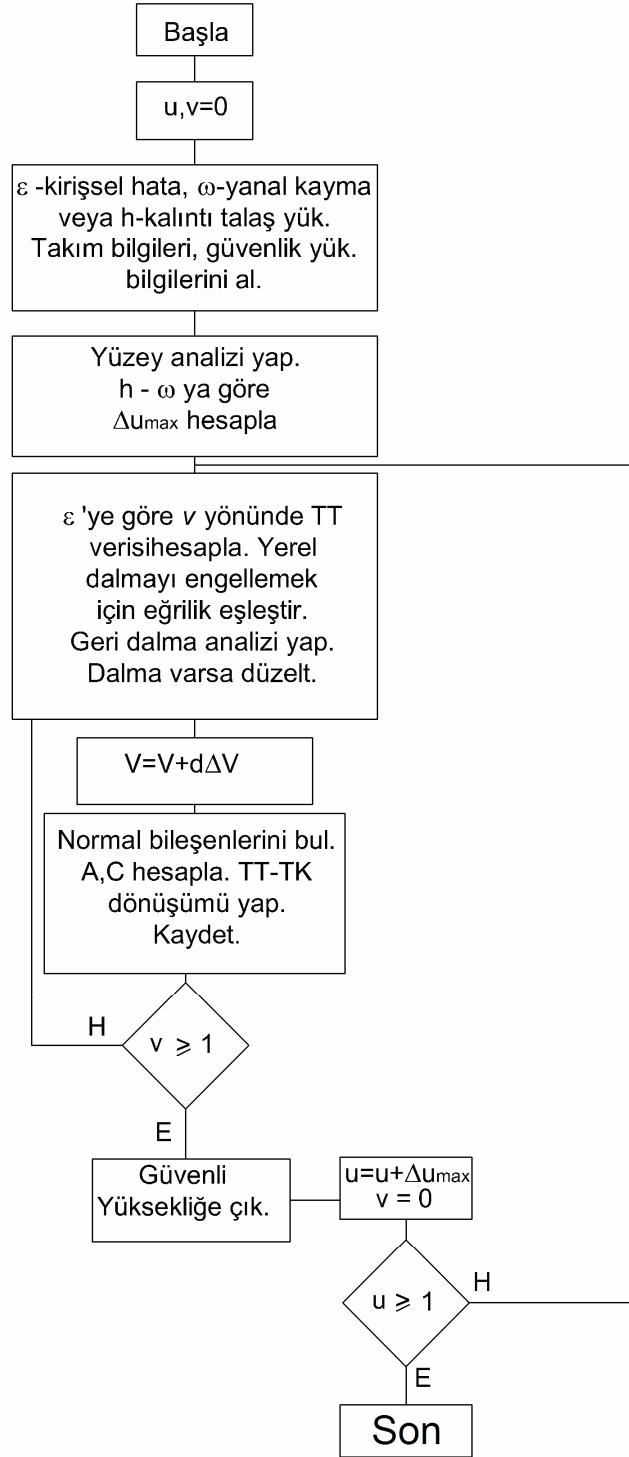
Şekil 3.93’da Zig-Zag tek yön takım yolu şablonunun genel gösterimi ve parametrik alan ifadesi gösterilmektedir. Takım ilerleme yönü parametrik alanda v olarak alınır, talaş kaldırma Y eksenini doğrultusunda gerçekleşir ve yanıl kaymanın X ekseninde, yani parametrik u yönünde hesaplanmalıdır.



Şekil 3.93. Zig-Zag tek yön takım yolu şablonu ve parametrik alan ifadesi

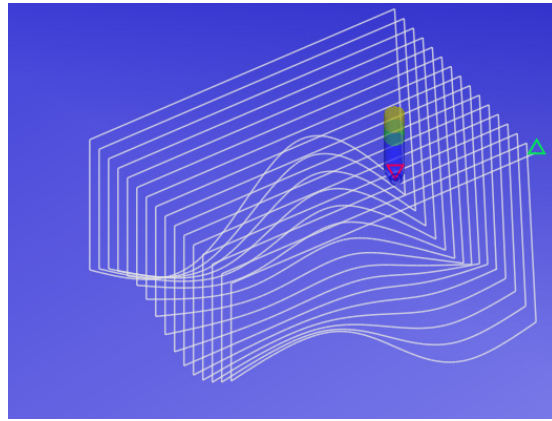
Bu takım yolu oluşturma stratejisinde oluşturulan işlem akış diyagramı VII şekil 3.94’de verilmiştir.

İşlem Akış Diyagramı VIII

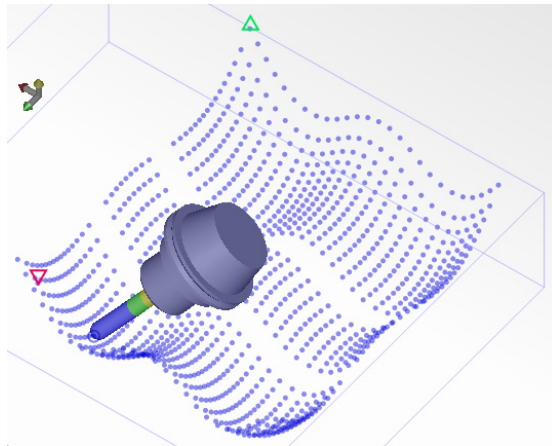


Şekil 3.94. Zig-zag tek yön takım yolu işlem akış diyagramı

Bu takım yolu stratejisinde her *TT* noktasının hesabından sonra yerel dalmayı engellemek için takım oryantasyonuna ile eğrilik eşleştirme yapılmıştır. Bu işlem için daha önce takım seçim algoritmasında belirtilen eğrilik eşleştirme tekniğinden faydalanılmıştır. Bu eşleştirme işleminden sonra takıma verilecek olan eğim açısının geri dalmaya sebep olmaması için geri dalma analizi yapılmıştır. Muhtemel geri dalma durumunda dalmayı engelleyecek minimum fark açısı hesaplanarak dalma düzeltilmiştir. Bu takım yolu stratejisi ile oluşturulan örnek simülasyon sonuçları şekil 3.95’de gösterilmiştir.



a)-Çizgisel simülasyon (Yanal kayma $\omega=10$ $\varepsilon=0.02\text{mm}$)

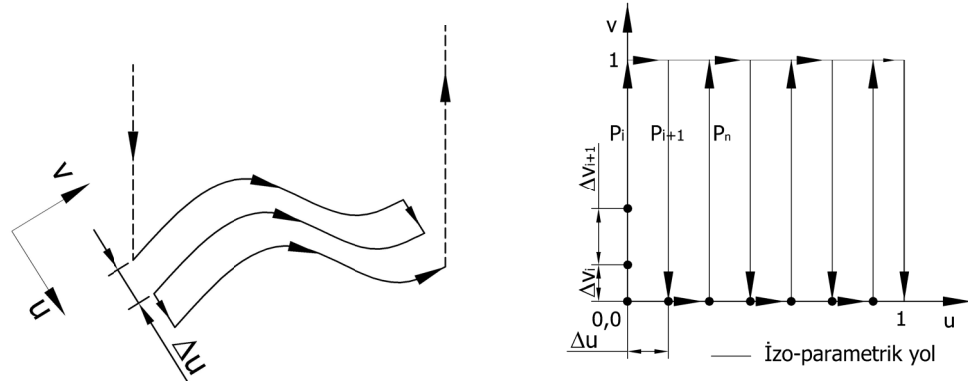


b)- Noktasal simülasyon ($\omega=10\text{mm}$ $\varepsilon=0.05\text{mm}$)

Şekil 3.95. Beş eksen simülasyon görüntü örnekleri

3.4.9. Zig-Zag çift yön talaş kaldırma stratejisi

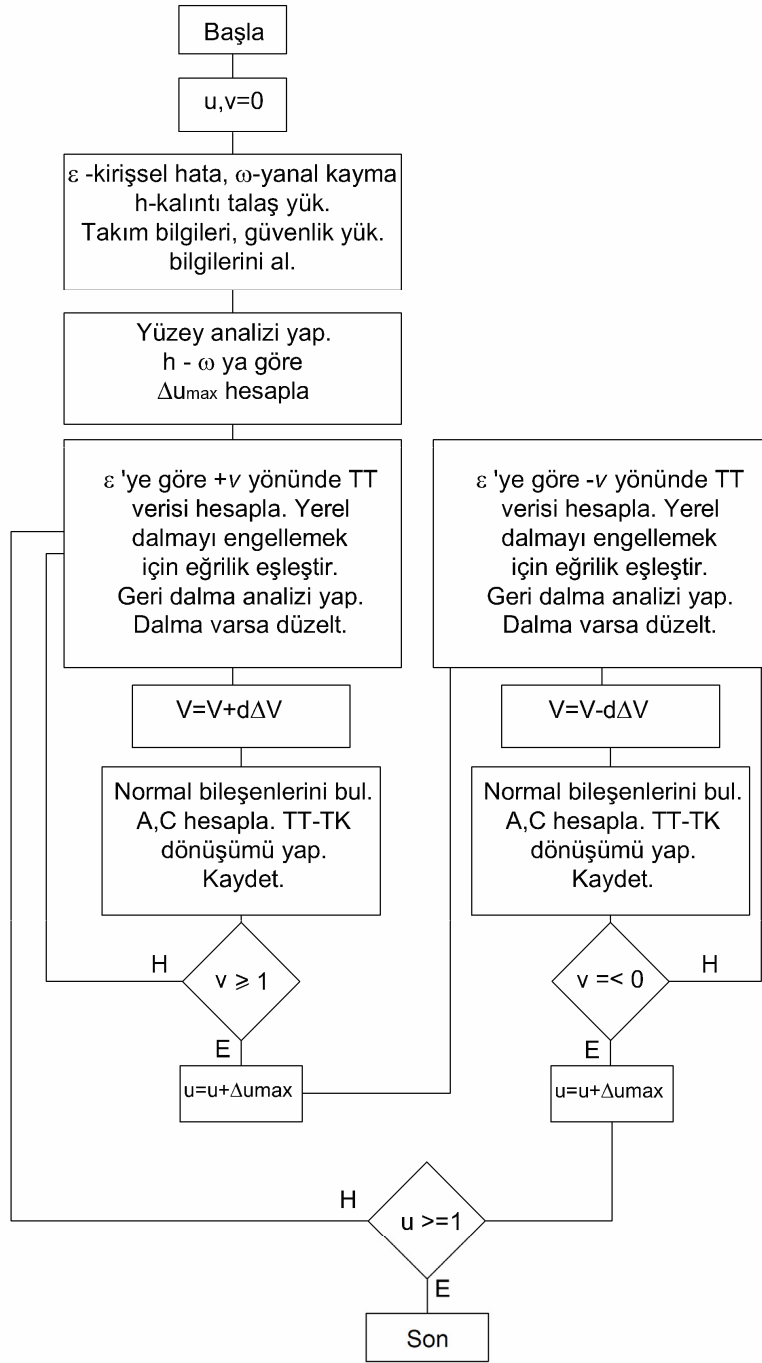
Bu talaş kaldırma stratejisinde takım $+v$ parametrik yönünde yani $+Y$ doğrultusunda talaş kaldırdıktan sonra Δu kadar yanal kayma yapmakta ve $-Y$ doğrultusunda geri gelirken de talaş kaldırmaktadır. Bir önceki yönleme göre daha hızlı ve etkili bir talaş kaldırma işlemi gerçekleştirmektedir. Bu işleme yönteminde takım Y yönünde ilerlerken ve geri gelirken farklı frezeleme tekniği (aynı-zıt) oluşturmaktadır. Bu takım yolu stratejisi için kurulan işlem akış diyagramı IIX şekil 3.97’de verilmiştir. Burada yine daha önceki stratejide olduğu gibi, yüzey analiz algoritmasının bulduğu eğrilikler kullanılarak kalıntı talaş yüksekliği ve yanal kayma miktarının parametrik karşılığı bulunmuştur. Şekil 3.96’de bu talaş kaldırma stratejisi genel takım yolu ve parametrik alan karşılığı gösterilmiştir.



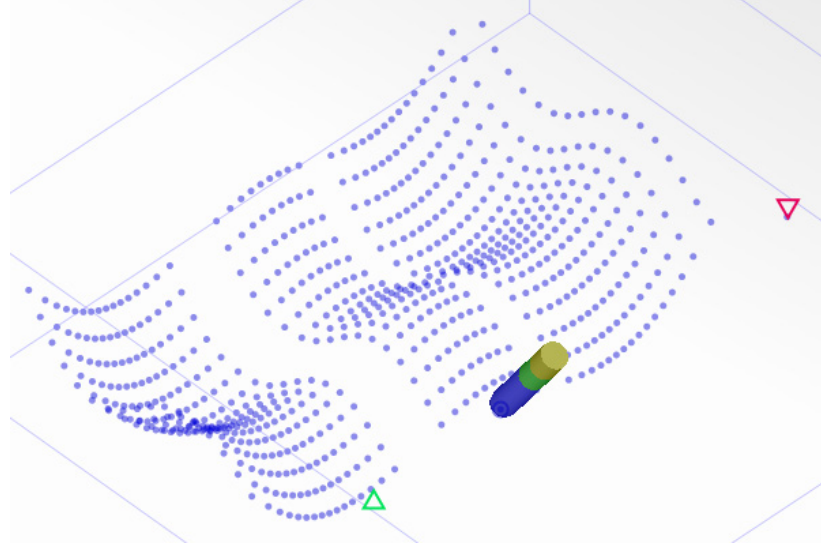
Şekil 3.96. Zig-Zag çift yön takım yolu

Bu takım yolu stratejisi ile oluşturulan örnek simülasyon sonuçları şekil 3.98’de gösterilmiştir.

İşlem Akış Diyagramı IIX



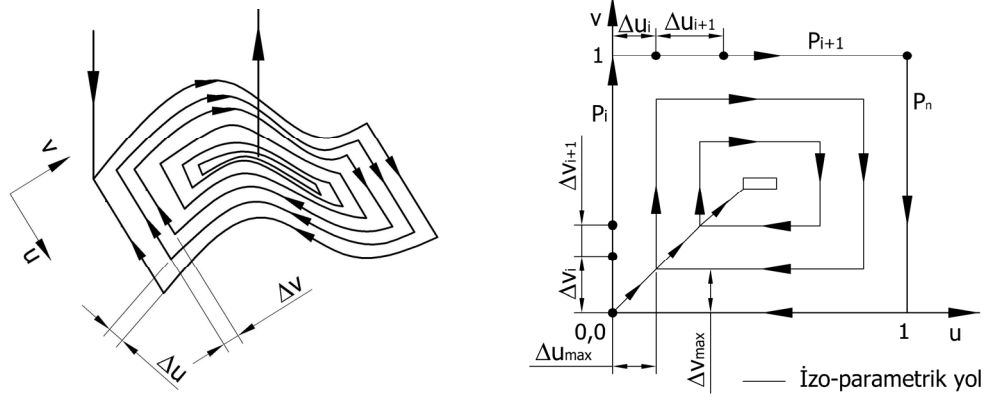
Şekil 3.97. Zig-zag çift yön takım yolu işlem akış diyagramı



Şekil 3.98. Zig-Zag çift yön noktasal simulasyon (Küresel Uç $\omega=2\text{mm}$ $\varepsilon=0.02\text{mm}$).

3.4.10. Paralel spiral takım yolu oluşturma stratejisi (içten dışa- dıştan içe)

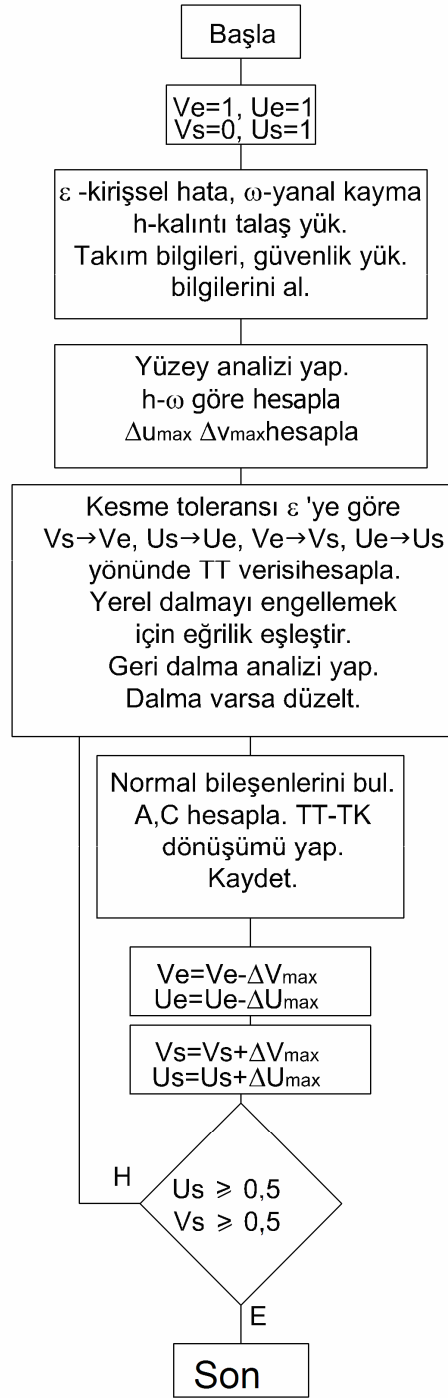
Spiral şeklinde içe doğru küçülerek takım yolu oluşturma stratejisi talaş kaldırmada oldukça sık kullanılan bir tekniktir. Spiraller gerçek spiral olabileceği gibi paralel spirallerde yüzeyin formuna göre tercih edilebilmektedir. Bu stratejide takım, dıştan içe veya içten dışa doğru ofsetlenerek küçülen dikdörtgenel izo-parametrik yolları takip etmektedir. Daha önceki Zig-Zag stratejilerinde takım tek yönde işleme hatası hesaplamakta iken bu stratejide her iki yönde de işleme hatasına bağlı adımlama yaptığı için daha homojen bir hata dağılımı gerçekleştirebilmektedir. Daha önce verilen ω yanal kayma miktarının Δu parametrik hale çevrilmesi için kullanılan algoritma v yönü için adapte edilerek parametrik v yönünde yapılabilecek Δv_{max} bulunmuştur. Bulunan Δu_{max} ve Δv_{max} miktarları kadar içeri ofsetleme yapılarak paralel spiraller oluşturulmuştur. Şekil 3.99’da bu talaş kaldırma stratejisi için genel takım yolu ve parametrik alan karşılığı gösterilmiştir.



Şekil 3.99. Paralel spiral takım yolu oluşturma stratejisi

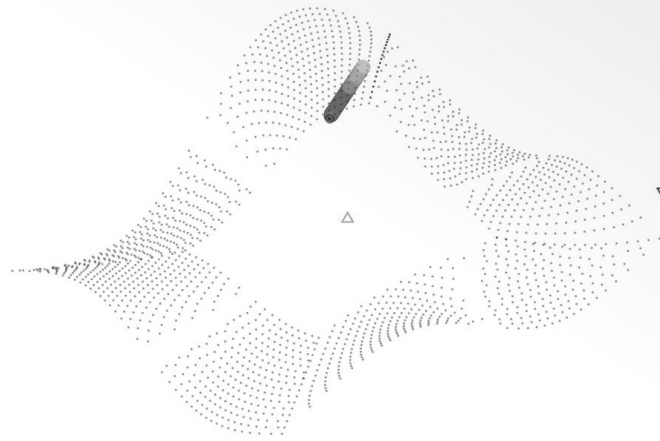
Bu takım yolu oluşturma stratejisinde takım, talaş kaldırdığı tüm ilerleme yönlerinde kirişsel hataya bağlı takım yolu adımları (λ) hesaplamak suretiyle ilerlemektedir. Daha önceki Zig-Zag stratejilerinde sadece $+v$ ve $-v$ yönlerinde kirişsel hataya (ϵ) bağlı adım hesaplanırken bu stratejide kirişsel hata $+u$ ve $-u$ yönlerinde de hesaplanmıştır. Bu işlem için daha önceki stratejilerde kullanılan algoritmalar $\pm u$ yönü için adapte edilmiştir. Bu takım yolu için oluşturulan işlem akış diyagramı IX şekil 3.100'de verilmiştir.

İşlem Akış Diyagramı IX



Şekil 3.100. Paralel spiral takım yolu işlem akış diyagramı

Şekil 3.101' de bu takım yolu oluşturma stratejisi ile elde edilen takım yolu simülasyonu görülmektedir.



Şekil 3.101. Paralel spiral takım yolu ile oluşturulan takım yolu simülasyonu

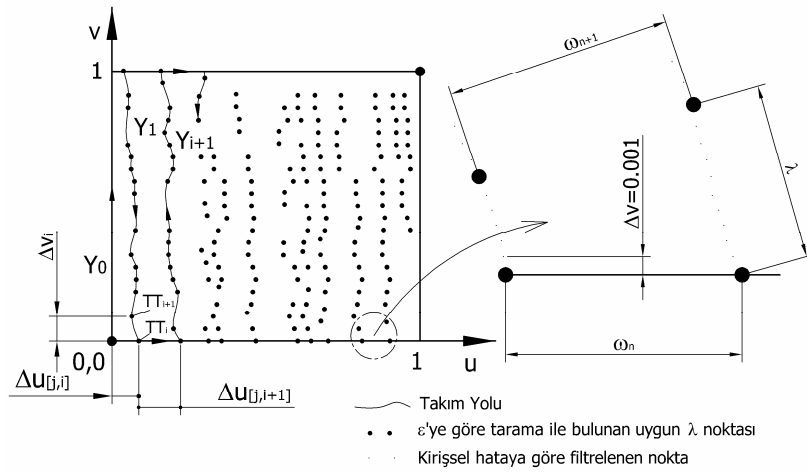
3.4.11. Eşit kalıntı talaş (izo-scallop) takım yolu oluşturma-I

Zig-Zag ve paralel spiral takım yolları izo-parametrik yönlerde artışlar verilerek elde edilmektedir. Bir parametre sabit tutulup diğer yönde ilerleme yapılmaktadır. Yüzey üzerinde her bir takım yolu aralığında eşit parametrik yanal kayma yapılmaktadır. Bunun neticesinde yüzeyin her yerinde kalıntı talaş yüksekliği farklılık göstererek homojen bir yüzey pürüzlülüğü sağlanamamaktadır. Yanal kayma yapılırken eğrilik yarıçaplarının içbükey olduğu bölgelerde yanal kayma miktarı artırılabilir. Dış bükey eğrilik yarıçaplarının olduğu bölgeler ise yanal kaymanın minimum olduğu alanlardır. İzo-parametrik takım yolu oluşturulurken yanal kayma miktarı bu dış bükey noktalara göre hesap edildiği için içbükey noktalarda da ancak bu kadar ilerleme yapılabilir. Bu yüzden iç bükey eğrilik yarıçapının bulunduğu bölgelerde çok küçük yanal kaymalar olduğundan takım yolu sayısı artarak işleme zamanı uzamaktadır. Bu bölgelerde ise gereksiz bir yüzey pürüzlülüğü düşüşü gerçekleştirilerek yüzey pürüzlülüğü homojenlikten uzaklaşmaktadır.

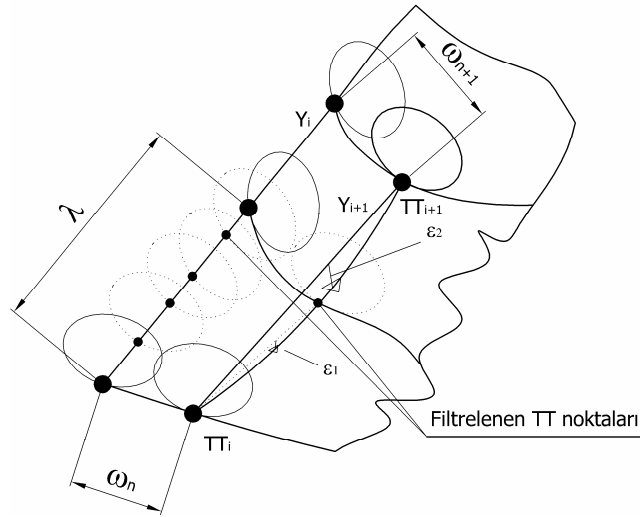
İzo-parametrik takım yollarının bu dezavantajlarından dolayı yüzey üzerinde eğrilik yarıçapının durumuna göre adaptif yanal kayma yaparak eşit kalıntı talaş bırakan farklı bir takım yolu algoritması geliştirilmiştir. Bu takım yolu stratejisinde, eğriliğe göre yanal kayma ve ilerleme yönünde kirişsel hataya (ε) bağlı TT noktalarının aynı anda hesaplanması matematiksel olarak oldukça karmaşıktır.

Eşit kalıntı talaş stratejisinde takım yolu oluşturma, yüzey eğriliğine göre her noktada farklı parametrik yanal kayma miktarlarının bulunarak kaydedilmesi esasına dayanır. İlerleme yönünde kirişsel hataya bağlı takım yolu adımlarının hesaplanması ise, çok sık aralıkta kaydedilen bu noktalar arasından filtreleme ile hesaplanmıştır. Böylelikle eğriliğe bağlı eşit kalıntı talaş bırakan yanal kayma (ω) hem de kirişsel hataya (ε) bağlı ilerleme adımları hesaplanabilmiştir. Şekil 3.102'de bu stratejinin parametrik alan ifadesi ve fiziksel yüzey üzerindeki ifadesi yer almaktadır.

Bu takım yolu oluşturma stratejisinde ilk adım yanal kayma yönünde eğrilik yarıçapının hesaplanmasıdır. Burada daha önceki algoritmalarda olduğu gibi 3 noktadan geçen eğrilik hesaplanmıştır. Burada eğrilik yarıçapı içbükey ise takıma eğim açısı verilerek efektif kesici yarıçapı (r_e) yerel eğrilik yarıçapına (ρ_k) eşitlenir. Burada amaç yanal kayma miktarını artırmak ve yerel dalmayı engellemektir. Burada verilmesi gereken minimum eğim açısı $S = \sin^{-1}(r/|\rho_c|)$ şeklinde hesaplanmaktadır (Lo 1999). Bu eğrilik eşleştirme işlemi sadece iç bükey eğriliklerde söz konusudur. Hesaplanan efektif kesici radyüsüne ve kullanıcın tanımladığı kalıntı talaş yüksekliğine göre bir yanal kayma (ω) hesaplanır. Bu işlemden sonra geri dalma prosedürü uygulanarak dalma analizi yapılır. Dalma varsa dalmayı engelleyen yeni eğim açısına göre tekrar yanal kayma hesaplanır.



(a) Parametrik alan



(b) Fiziksel yüzey

Şekil 3.102. Eşit kalıntı talaş metodunun parametrik alan ve fiziksel yüzeyde ifadesi

Bu takım yolu oluşturma stratejisinde kurulan iki aşamalı algoritma, *Algoritma Xa* ve *X-b*'de verilmektedir. İlk algoritma, tüm yüzeyi ilerleme yönünde çok hassas aralıklarda bölerek ($\Delta v=0,001$) yanal kayma yönünde (u) taramakta ve her bir v aralığı için kullanıcının girdiği yüzey pürüzlülüğü veya kalıntı talaşa göre Δu miktarlarını ve fark açısını hesaplayarak bir hücresel veri tablosuna kaydetmektedir. Bu işlemler u parametresi 1'e ulaşıncaya kadar devam etmiş ve u parametresi sıfırlanarak v yönünde 0,001 lik bir artış verilerek u yönünde tarama işlemine devam

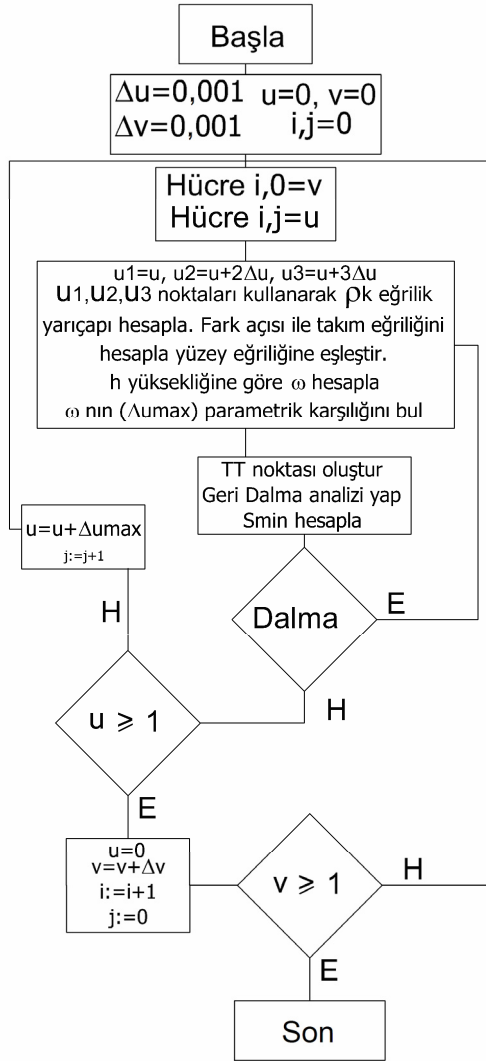
edilmiştir. Parametrik u yönünde $0-1$ arasında yapılan bu tarama, v parametresi 1'e ulaşınca muhtemel TT noktalarına karşılık gelen parametrik noktalar tabloya kaydedilmiştir.

İkinci algoritma ise filtreleme işlemini gerçekleştirmektedir. Her bir TT adımı için bu tablodaki değerleri ilerleme yönünde (+/- v) tarayarak, kirişsel hataya bağlı kabul edilebilir değere ulaşınca o noktada TT noktası oluşturmakta, arada kalan değerleri filtrelemektedir. Şekil 3.102 b'de görüldüğü gibi ε_1 değeri kabul edilebilir değerden çok düşük olduğu için bu nokta filtrelenerek bir sonraki TT noktası bulunmuştur. Tablo 3.3'de oluşturulan bu hüresel veri tablosu gösterilmektedir. Tablonun ilk sütunu v diğer sütunlar ise u parametresine aittir.

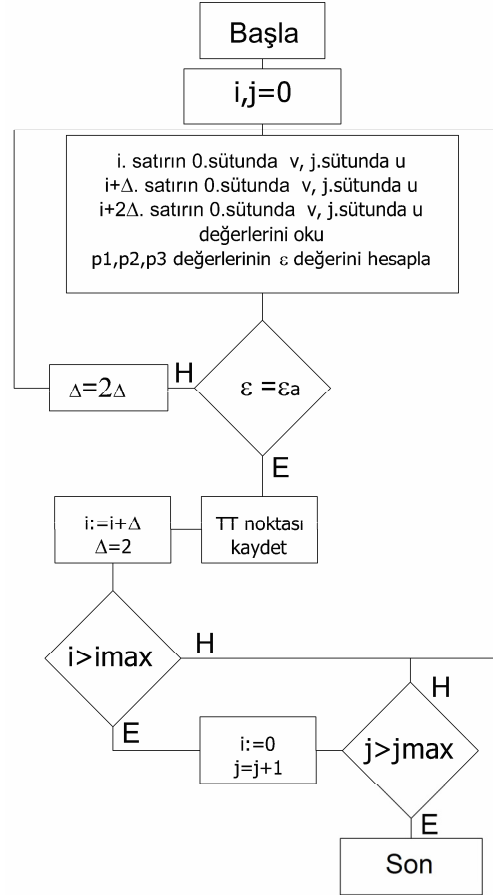
Tablo 3.3. Hesaplanan yanıl artış parametrik değerlerine ait örnek veri tablosu

		j											
		$\downarrow v$	$\rightarrow u_1$	u_2	u_3	u_n	\dots						
i	v_1	0	0	0,0157	0,0314	0,0472	0,063	0,0789	0,0949	0,1111	0,1274	0,1438	0,1604
\downarrow	v_2	0,001	0	0,0157	0,0314	0,0471	0,0629	0,0789	0,0949	0,111	0,1273	0,1437	0,1604
v_3	0,002	0	0,0157	0,0314	0,0471	0,0629	0,0788	0,0949	0,111	0,1273	0,1437	0,1603	
\vdots	0,003	0	0,0157	0,0314	0,0471	0,0629	0,0788	0,0948	0,1109	0,1272	0,1436	0,1603	
v_n	0,004	0	0,0157	0,0313	0,0471	0,0629	0,0788	0,0948	0,1109	0,1272	0,1436	0,1602	
\vdots	0,005	0	0,0156	0,0313	0,0471	0,0629	0,0788	0,0948	0,1109	0,1271	0,1435	0,1601	
\vdots	0,006	0	0,0156	0,0313	0,0471	0,0629	0,0787	0,0947	0,1108	0,1271	0,1435	0,1601	
\vdots	0,007	0	0,0156	0,0313	0,047	0,0628	0,0787	0,0947	0,1108	0,127	0,1435	0,16	
\vdots	0,008	0	0,0156	0,0313	0,047	0,0628	0,0787	0,0947	0,1108	0,127	0,1434	0,16	
\vdots	0,009	0	0,0156	0,0313	0,047	0,0628	0,0787	0,0946	0,1107	0,127	0,1434	0,1599	
\vdots	0,01	0	0,0156	0,0313	0,047	0,0628	0,0786	0,0946	0,1107	0,1269	0,1433	0,1598	
\vdots	0,011	0	0,0156	0,0313	0,047	0,0628	0,0786	0,0946	0,1107	0,1269	0,1433	0,1598	
\vdots	0,012	0	0,0156	0,0313	0,047	0,0627	0,0786	0,0945	0,1106	0,1268	0,1432	0,1597	
\vdots	0,013	0	0,0156	0,0313	0,047	0,0627	0,0786	0,0945	0,1106	0,1268	0,1431	0,1597	
\vdots	0,014	0	0,0156	0,0312	0,0469	0,0627	0,0785	0,0945	0,1105	0,1267	0,1431	0,1596	
\vdots	0,015	0	0,0156	0,0312	0,0469	0,0627	0,0785	0,0945	0,1105	0,1267	0,143	0,1596	

İşlem Akış Diyagramı X-a



İşlem Akış Diyagramı X-b

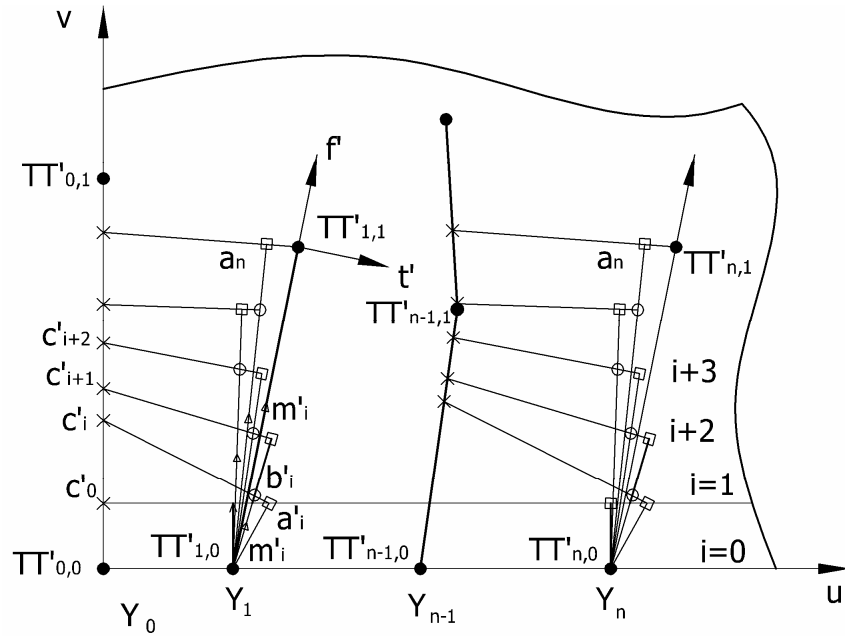


Şekil 3.103. Eşit kalıntı talaş stratejisi işlem akış diyagramı

3.4.11. Eşit kalıntı talaş (izo-scallop) takım yolu oluşturma-II

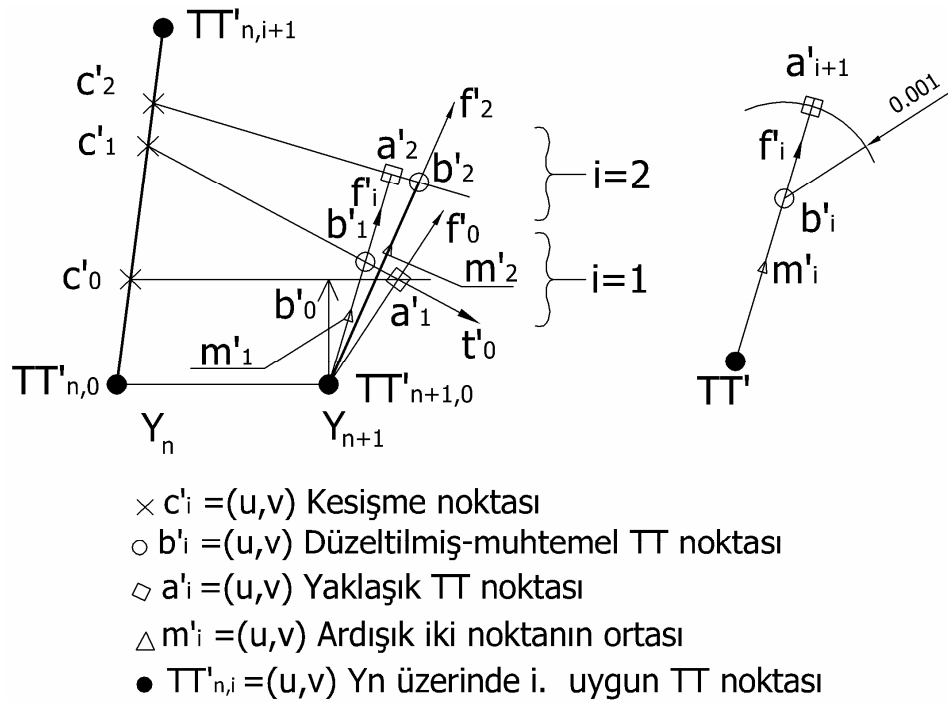
Bir önceki eşit kalıntı talaş takım yolu stratejisi-I de TT noktalarının tayini 2 aşamalı bir algorithmada gerçekleşmiştir. Yanal adıma ait tarama parametrik u yönünde gerçekleşmiş ve bulunan değerler bir veri tablosunda kaydedilmiştir. Kirişsel hataya bağlı adım uzunlukları kaydedilen bu çok sayıdaki parametrik nokta verilerinin filtrelenmesi ile elde edilmiştir. İlk stratejide filtrelenen nokta sayısı fazla olduğu için hesaplama süresi de oldukça fazladır.

Eşit kalıntı talaş-II takım yolu stratejisinde ilk stratejideki tarama yöntemi değiştirilerek yanall kayma ve ilerleme uzunluğunu aynı algoritma içinde hesaplayan daha etkili bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algorithmada tarama yönü v -parametrik yön doğrultusundadır. Eş kalıntı talaş takım yolu-II oluşturma işlemi adım adım izah edilmiş ve adımlar hem parametrik alanda hem de fiziksel yüzey üzerinde gösterilmiştir. Şekil 3.104'de bu stratejinin parametrik alanda genel ifadesi yer almaktadır.



Şekil 3.104. Eş kalıntı talaş takım yolu stratejisinin parametrik alan ifadesi.

Bu stratejide ilk takım yolu $+v$ yönünde $u=0$ üzerindeki parametrik yön doğrultusunda gerçekleşmektedir. Bu ilk takım yolu (Y_0) izo-parametrik olarak gerçekleşmektedir ve bu ilk yolun oluşturulması için daha önce geliştirilen izo-parametrik takım yolu stratejisinden faydalanılmıştır. Şekil 3.104'de görülen $TT'_{0,0}$ noktası bu yolun ilk TT noktasını parametrik alanda ifade etmektedir. Bu ilk takım yolundan sonra bu yola komşu olan takım yolları eş kalıntı talaş stratejisine göre düzenlenmektedir. Şekil 3.105'de bu takım yolunun oluşturulmasında kullanılan tarama noktaları simgesel olarak belirtilmiştir. Algoritmanın ana basamakları ise yine bu şekilde belirtilen Y_n yoluna komşu Y_{n+1} yolunun oluşturulmasında açıklanmıştır. Şekil 3.106-108 ise algoritma adımlarını fiziksel yüzey üzerinde ifade etmektedir. Fiziksel yüzey üzerindeki bir nokta aynı sembol ile parametrik alanda üslü (') olarak belirtilmiştir. Bu takım yolu oluşturma stratejisinin adımları şu şekildedir;



Şekil 3.105. Eş kalıntı talaş takım yolu stratejisinin parametrik alan ifadesi ve taramada kullanılan semboller.

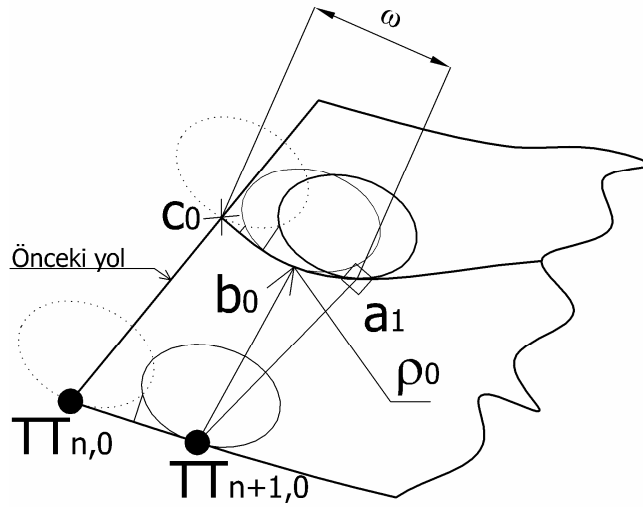
Adım 1: Y_n yoluna komşu Y_{n+1} yolunun ilk TT noktası olan $TT'_{n+1,0}$ noktasının bulunması $TT'_{n,0}$ noktasından $+u$ yönünde $v=0$ üzerinde yapılmıştır. Bu noktanın $TT'_{n,0}$ noktasına olan uzaklığının bulunabilmesi için öncelikle bu noktadaki eğrilik yarıçapının (ρ) bilinmesi gerekmektedir. Bu işlem için daha önceki algoritmalarda kullanılan üç noktadan geçen eğrilik yarıçapının bulunması tekniği kullanılmıştır. Burada $v=0$ üzerinde 3 geçici nokta $P_1=TT_{n,0}=r(u,v)$, $P_2=r(u+0,001,v)$, $P_3=r(u+0,002,v)$ hesaplanarak eğrilik yarıçapı bulunmuş ve bu eğrilik yarıçapının iç bükey olduğu durumda takıma eğim verilerek efektif kesici radyüsü eşleştirilmiştir. Kullanıcının tanımladığı kalıntı talaş yüksekliği, hesaplanan eğrilik yarıçapı ve efektif kesici radyüsü kullanarak fiziksel yüzey üzerinde yanal kayma (ω) hesaplanmıştır. Hesaplanan yanal kaymanın parametrik alana taşınması ise $TT'_{n,0}$ noktasından $+u$ yönünde 0,0001 lik parametrik artışlarla $TT'_{n+1,0}$ noktası elde edilmiştir. Her iterasyonda bu iki nokta arasındaki mesafe ($|TT'_{n+1,0} - TT'_{n,0}|$) yanal kaymaya eşit olduğunda bulunan nokta bu noktanın parametrik karşılığıdır. Böylelikle Y_{n+1} yolunun ilk TT noktası olan $TT'_{n+1,0}$ noktası hesaplanmış olur.

Adım 2: İlk nokta bulunduktan sonra $CC'_{n+1,0}=(u,v)$ noktasına $+v$ yönünde 0,001 lik bir artış verilerek b'_0 noktası bulunur. Bu noktadan geçen $-u$ yön vektörüyle bir önceki takım yolunun ($CC'_{n,i} - CC'_{n,i+1}$) kesiştiği c'_0 noktası bulunur. Bu noktalar şekil 3.105'de parametrik alanda, şekil 3.106'da fiziksel yüzey üzerinde belirtilmiştir. Bu kesişim noktasında ilk adımda olduğu gibi $+u$ yönünde bir eğrilik hesaplanarak yeni bir yanal kayma (ω) hesaplanır. Yine bu yanal kaymanın parametrik alandaki karşılığının bulunması için $+u$ yönünde 0,0001'lik artışlar yapılır ve a'_1 noktası bulunur. Bu nokta düzeltilmiş yanal kayma noktası olarak adlandırılmıştır.

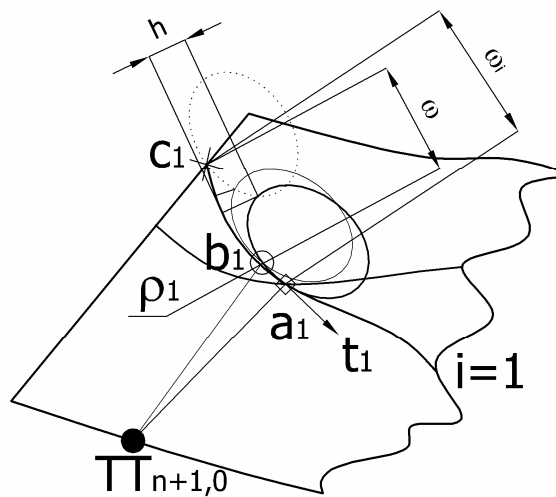
Adım 3: Bir önceki adımda bulunan a'_1 düzeltilmiş yanal kayma noktası hesaplanırken, b'_0 noktasından geçen eğrilik hesaplanmıştı. Eş kalıntı talaş stratejisinde eğrilik, ilerleme yönüne dik olan düzlemde hesaplanması gerekir. Bu işlem için ikinci bir adımda birim ilerleme $f'_0 = (a'_i - CC'_{n+1,i}) \wedge a'_i - CC'_{n+1,i}$ ve teğet vektörleri t'_0 hesaplanır. Bu adımdan sonra $-t'_0$ birim vektörü ile bir önceki takım yolunun kesişimi olan c'_1 kesişme noktası analitik yolla bulunur. Yine bir

önceki adımda olduğu gibi ilerleme yön vektörüne dik doğrultudaki yeni eğrilik yarıçapı (ρ_l) hesaplanır.

Adım 4: Bu adımda bir önceki adımda hesaplanan eğrilik yarıçapı ile efektif kesici yarıçapı eşleştirme ($r_e \leq \rho_l$) yapılır. Burada eğrilik yarıçapı içbükey ise takıma eğim açısı verilerek efektif kesici yarıçapı (r_e) yerel eğrilik yarıçapına (ρ_l) eşitlenir. Burada amaç yanal kayma miktarını artırmak ve yerel dalmayı engellemektir. Burada verilmesi gereken minimum eğim açısı $S = \sin^{-1}(r_e / \rho_c)$ şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 3.106. Tarama işleminin fiziksel alanda ifadesi (i=1)



Şekil 3.107. Düzeltilmiş eğriliğe göre yanal adımın hesaplanması (i=1)

Adım5: Bu adımda yeni eşleştirme değerlerine göre yeni bir yanal kayma (ω) miktarı hesaplanır. Önceki adımlarda olduğu gibi kesişim noktasından başlanarak $+t'_0$ yönünde çok küçük artırımlar yapılarak yanal kaymanın parametrik alandaki karşılığı olan düzeltilmiş b'_1 noktası bulunur. Bulunan bu düzeltilmiş b'_1 noktası eş kalıntı talaş stratejisine göre muhtemel bir TT noktası olarak kullanılabilir. Fakat bu noktanın öncelikle ilerleme yönünde izin verilen kirişsel hataya bağlı şartları sağlaması ve ardından takım tabanında oluşabilecek geri dalma durumunun oluşmaması gerekmektedir.

Adım 6: İlerleme yönünde kirişsel hatanın tespiti için bir önce adımda hesaplanan düzeltilmiş b'_1 noktası ile $TT'_{n+1,0}$ noktası arasında bir kirişsel hata hesaplaması gereklidir. Bu işlem için b'_1 ve $TT'_{n+1,0}$ noktalarının orta noktası b'_1 lineer interpolasyon ile bulunur. Bu üç nokta kullanılarak oluşan kirişsel hata miktarı (ε) hesaplanmıştır. Hesaplanan bu kirişsel hata miktarı kullanıcının izin verdiği hata miktarına eşit ise b'_1 noktası muhtemel bir TT noktası olarak kullanılabilir. Hesaplanan hata miktarı izin verilen hata miktarından küçük ise TT noktası daha uzak bir noktada aranmalıdır. Bu işlemler izin verilen hata miktarına erişinceye kadar devam eder.

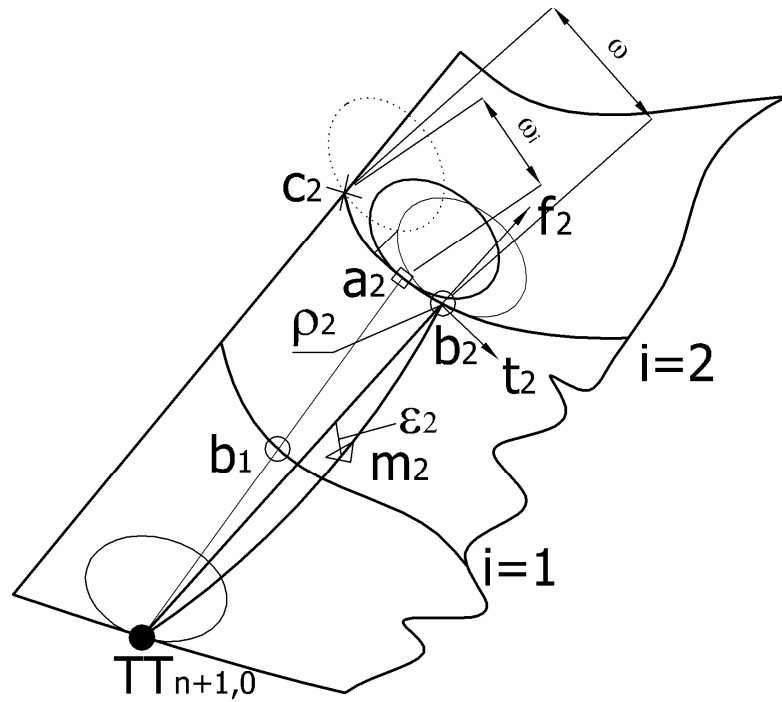
Adım 7: Kirişsel hata miktarı düşük ise taramada 2. iterasyon başlar. Bu adımda ilk olarak a'_2 noktası bulunur. Bu noktanın belirlenebilmesi için şekil 3.105 de belirtilen f'_i ilerleme yön vektörünün $f'_i = (b'_1 - TT'_{n+1,0}) / |b'_1 - TT'_{n+1,0}|$ şeklinde belirlenmesi gerekir. Bu vektör ile a'_{i+1} noktası b'_1 noktasının $a'_{i+1} = b'_1 + f'_i (0,001)$ şeklinde ötelenmesi ile bulunabilir.

Adım 8: Bu yeni nokta a'_2 için eğrilik yarı çapı ($\rho_{i=2}$) ve yanal kayma (ω) hesaplanır. Şekil 3.105'de parametrik alanda gösterilen bu noktalar Şekil 3.108'de fiziksel yüzey üzerinde belirtilmiştir.

Adım 9: Yeni bulunan a'_2 noktası b'_1 noktasının ötelenmesi ile bulunduğu için eğriliğe göre düzeltilmesi gerekir. Bu iterasyondaki b'_2 düzeltme noktasının bulunması için kesişme noktası c'_2 daha önce olduğu gibi analitik yolla bulunur. b'_2 düzeltme noktası ise daha önce adım 4'de olduğu gibi bulunur.

Adım 10: Daha önceki iterasyonda olduğu gibi düzeltilmiş $b'_2=(u,v)$ noktası izin verilen kirişsel hata miktarını sağlıyorsa muhtemel bir TT noktasıdır. Bu iterasyonda yine daha önce olduğu gibi bir orta nokta vasıtası ile kirişsel hata analizi yapılır. Bunun için $TT'_{n+1,0}$, and b'_2 noktaları arasında bir m'_2 noktası bulunur. Bu üç nokta arasında bir kirişsel hata hesaplanarak izin verilen hata ile kıyaslama yapılır. Hesaplanan hata izin verilen hataya eşitse b'_2 noktası geri dalma analizi yapıldıktan sonra kesin bir TT noktasıdır. Kirişsel hata küçük ise daha uzakta bir nokta aramak için izin verilen hataya erişinceye kadar iterasyona devam edilir.

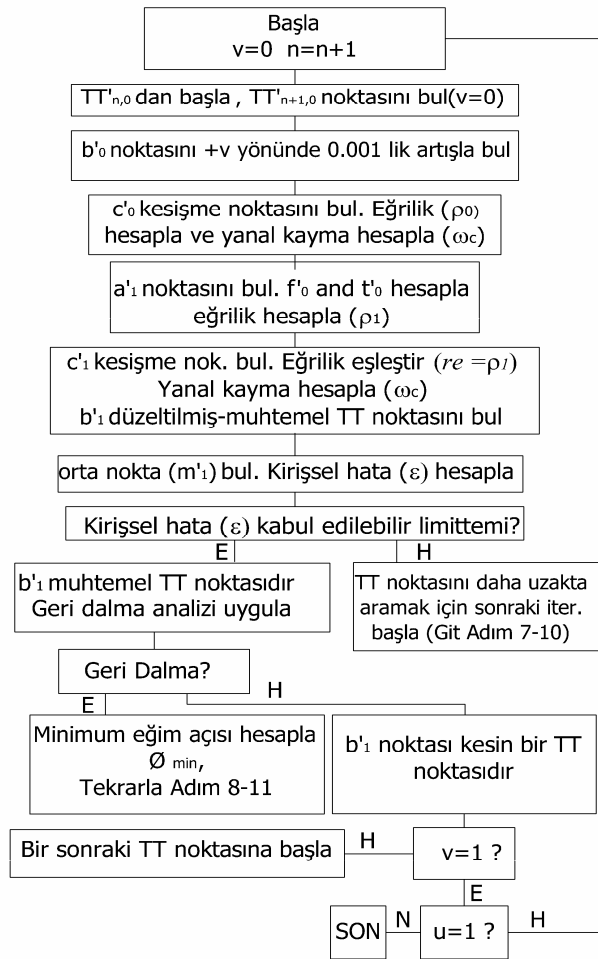
Adım 11. Daha önceki takım yolu stratejilerinde olduğu gibi bir noktanın kesin bir TT noktası olarak kabul edilebilmesi için bir geri dalma analizi yapılmalıdır. Bir önceki iterasyonda bulunan b'_2 noktası da eş kalıntı talaş açısından uygun bir noktadır. Fakat bu noktanın uygun TT noktası olabilmesi ancak geri dalma analizi ile sağlanır. Daha önceki bölümlerde açıklanan geri dalma analizi yapan prosedür bu adımda tekrar kullanılmıştır. Bu dalma analizi neticesinde elde edilen minimum eğim değeri (S_{min}) verilen eğim değerinden küçükse bulunan bu nokta kesin ve güvenilir bir TT noktasıdır ve bir sonraki $CC_{n+1,2}$ noktasının hesaplanmasına geçilebilir.



Şekil 3.108. Tarama işleminin fiziksel alanda ifadesi (i=2)

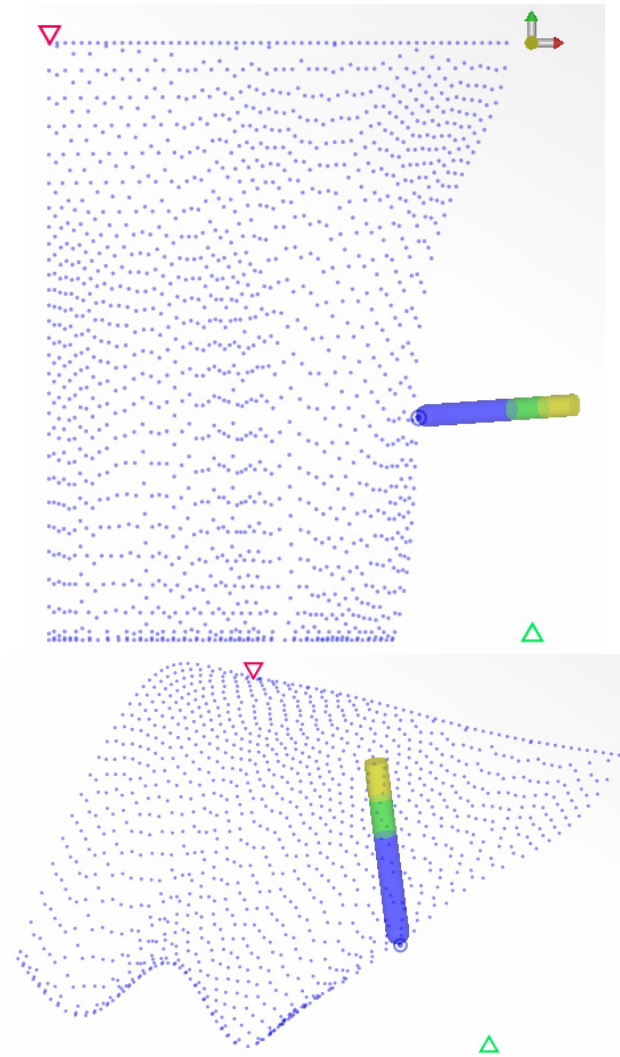
Dalma analizi neticesinde elde edilen minimum eğim değeri (S_{min}) verilen eğim değerinden büyükse, bu noktada takıma verilecek eğim değeri artırılır. Fakat bu artırım takımın efektif kesici yarıçapını küçülteceğinden bu noktada tekrar yanıl kayma düzeltilmelidir. Bunun için yeni efektif kesici yarıçapına göre adım 8-11 tekrar edilir. Bu adımlar geri dalma engelleninceye kadar tekrar edilir. Oluşturulun bu adımlar v parametresi 1 oluncaya kadar devam eder. Parametrik v değeri 1 olunca bir sonraki komşu takım yolu Y_{n+2} oluşturulmaya başlanabilir. Parametrik v yönündeki taramalar u yönünde kaydırılarak devam edilir ve u parametresi 1 olunca tüm parametrik alan taranmış olur. Bu tarama algoritmasının ana basamakları akış şeması şeklinde şekil 3.109'da verilmiştir.

İşlem akış diyagramı XI



Şekil 3.109. Eşit kalıntı talaş stratejisi II işlem akış diyagramı

Şekil 3.110'da bu takım yolu stratejisi ile elde edilmiş simülasyon görüntüleri yer almaktadır.

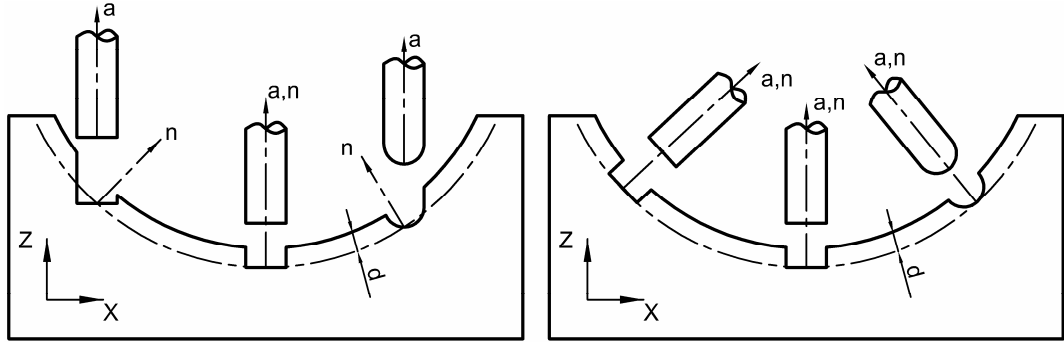


Şekil 3.110. Eşit kalınlı talaş prosedürüne ait takım yolu simülasyonu XY düzlemi ve izometrik görüntüsü

Simülasyon görüntüsü incelendiğinde parçanın üst kısımlarında parça düz alt kısımlarında ise dalgalar mevcuttur. Dolayısıyla alt kısımlarda daha çok yanal kayma üst kısımlarda ise daha az yanal kayma mevcuttur. Takım yolu ise ilerleme doğrultusunda izo-parametrik olduğu gibi düz değil eğriseldir. Bu takım yolu oluşturma stratejisinin tek dezavantajı ise takım yolu hesaplama süresinin izo-parametrik yöntemlere nazaran 4-5 kat daha uzun sürmesidir. Fakat bu hesaplama süresi parça işleme süresini kısaltması açısından göz ardı edilebilir.

3.4.13. Eğrisel yüzeye yansıtılan 2 boyutlu eğrilerin işlenmesi

2 boyutlu düzlemdeki bir eğrinin eğrisel yüzeye yansıtılması ile elde edilen 3 boyutlu eğrilerin işlenmesi özellikle enjeksiyon kalıplarına sıkça uygulanan bir yöntemdir. 3 eksen tezgâhlarda bu yöntem uygulandığı zaman yüzeyin her noktasında eşit derinlik ve aynı takım geometrisi oluşamadığından yöntemin beş eksene adapte edilmesi büyük avantajlar sağlar. Takım, yüzeyin normaline göre konumlandırıldığı için her noktada eşit derinlik ve aynı takım geometrisi oluşur. Bu durum şekil 3.111’de ifade edilmektedir.



Şekil 3.111. Üç ve beş eksen eğri işleme

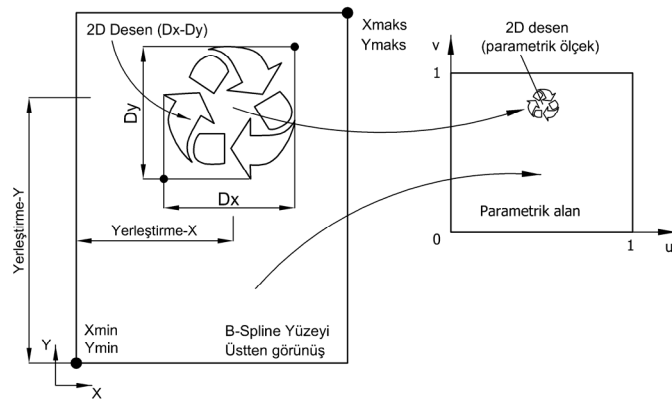
Eğrisel yüzeye yansıtılan, çizgisel öğeler içeren desen 2boyutlu tasarımlarda en çok tercih edilen format olduğu için DXF formatında kaydedilmiştir. DXF formatındaki dosya analiz edilmiş ve dosya içinde belli formatta kaydedilmiş çizgilerin başlangıç bitiş koordinatları okunarak kaydedilmiştir. DXF Formatında bir lineer öğenin kayıt formatı Tablo 3.4’de belirtilmiştir.

Tablo 3.4. DXF dosyasında lineer bir ögenin kodlanması

Kod	Açıklama
LINE	Öge tipi çizgi
10	Çizginin başlangıç x koordinatı bir alt satırda belirtilir
523.90368444684	Çizginin başlangıç x koordinatı (reel sayı)
20	Çizginin başlangıç y koordinatı bir alt satırda belirtilir
178.48413510031	Çizginin başlangıç y koordinatı (reel sayı)
30	Çizginin başlangıç z koordinatı bir alt satırda belirtilir
0	Çizginin başlangıç z koordinatı (reel sayı)
11	Çizginin bitiş x koordinatı bir alt satırda belirtilir
132.10238791662	Çizginin bitiş x koordinatı (reel sayı)
21	Çizginin bitiş y koordinatı bir alt satırda belirtilir
152.51767876138	Çizginin bitiş y koordinatı (reel sayı)
31	Çizginin bitiş z koordinatı bir alt satırda belirtilir
0	Çizginin bitiş z koordinatı (reel sayı)
0	Öge bitiş kodu

Desen üzerindeki bir noktanın (x,y) yüzey üzerine düşürülen gölgesinin koordinatlarının (x,y,z) ve bu noktanın parametrik (u,v) karşılığının bulunabilmesi için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlardan biri kartezyen takım yolu oluşturma metodun da kullanılan 2 boyutlu Jacobien dönüşüm algoritmasıdır (Choi 1998). Bu algoritma Newton açılımı ve bazı kısmi türev uygulamaları ile o noktaya karşılık gelen parametrik noktayı nümerik olarak yaklaşık bir sonuca kadar bulabilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen metot da ise daha kesin ve hızlı sonuç veren bir yöntem geliştirilmiştir.

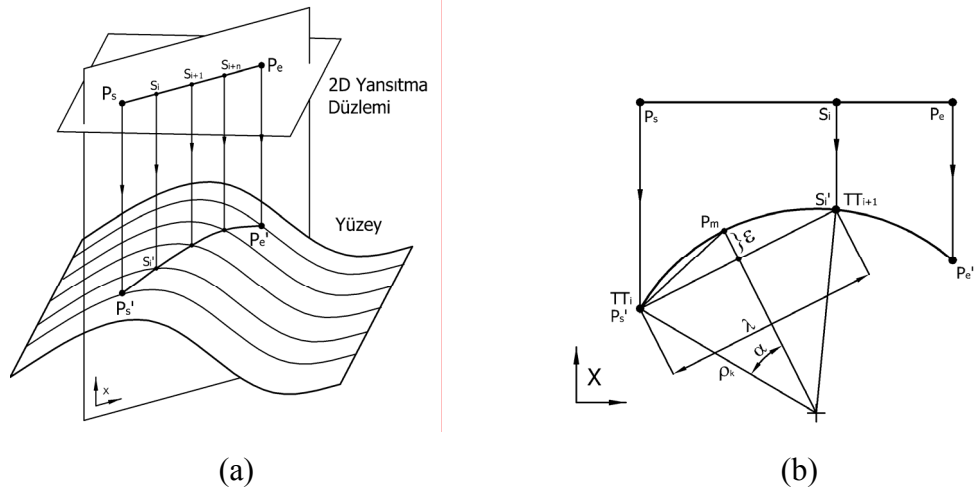
Bu yöntemde 2 boyutlu desen öğelerine ait x,y koordinatları ölçeklenerek parametrik alana taşınmış ve her ögenin koordinatı bir parametrik boyuta dönüştürülmüştür. Böylelikle her hangi bir ögenin parametrik karşılığı kesin olarak belli olduğundan bu noktaya karşılık gelen x,y,z yüzey koordinatı yüzey denklemiyle kolaylıkla bulunabilmiştir. Şekil 3.112'de 2 boyutlu desenin kullanıcının tanımladığı boyutlara (Dx,Dy) daha sonra parametrik boyuta ölçeklenmesi yer almaktadır.



Şekil 3.112. İki boyutlu tasarımın yerleştirilmesi ve parametrik alana taşınması

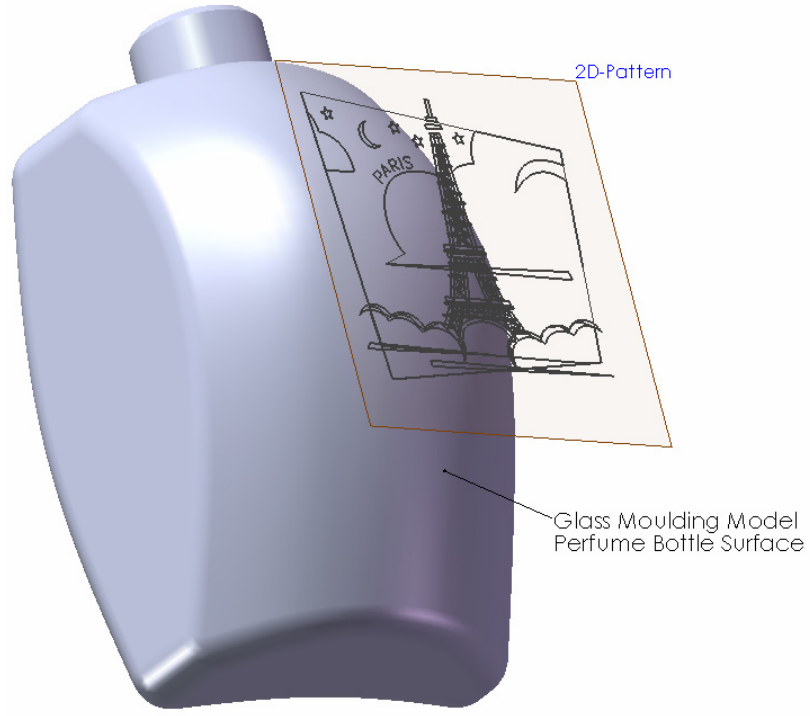
Öncelikle desen yüzey üzerinde bir noktaya yerleştirilmiş ve hesaplanan ölçek faktörleriyle çarpılarak parametrik alana transfer edilmiştir. Ölçeklendirme işleminde öncelikle yüzeyin maksimum ve minimum koordinatları $(X, Y_{maks}-X, Y_{min})$ ile yansıtılacak 2 boyutlu orijinal tasarımın maksimum ve minimum koordinatları $(dX, dY_{maks}-dX, dY_{min})$ bulunmuştur. Yüzeyin minimum koordinatları $u, v=0$ ve maksimumları $u, v=1$ parametrelerine karşılık gelen yüzey koordinatlarından elde edilmiştir. 2 boyutlu tasarımın minimum ve maksimum koordinatları ise DXF dosyasından tarama yapılarak bulunmuştur. Bu değerler ölçek hesaplamasında kullanılmak üzere yazılım içinde kaydedilmiştir. 2 boyutlu tasarımın yüzey üzerine yerleştirme noktası (X, Y) ve büyüklüğü (Dx, Dy) ise tasarımcı tarafından girilen bir değerdir. Girilen bu değerlere göre ölçeklendirme yapılmış, DXF dosyası parametrik alana taşınarak her bir çizginin parametrik u, v başlangıç bitiş koordinatları hesaplanmıştır. X ekseninde öğelerin başlangıç ve bitiş x koordinatları ile çarpılan ölçekleme faktörü $(Dx/(dX_{maks}-dX_{min}))/((X_{maks}-X_{min}))$ şeklinde, Y ekseninde öğelerin başlangıç ve bitiş y koordinatları ile çarpılan ölçekleme faktörü ise $(Dy/(dY_{maks}-dY_{min}))/((Y_{maks}-Y_{min}))$ şeklinde hesaplanmıştır.

Şekil 3.102(a) da başlangıç ve bitiş noktaları P_s-P_e olan bir öğenin eğrisel yüzeye yansıtılması ile $P_s'-P_e'$ noktalarının elde edilmesi ifade edilmektedir. Yansıtılan bu eğri işlenirken, başlangıç noktası olan P_s' den bitiş noktası P_e' ye tek adımda konumlama yapılamaz. Yansıtılan eğrinin belli kirişsel hataya bağlı olarak küçük segmentlere bölünmesi gerekmektedir. Bu işlem şekil 3.113(a-b)'de ifade edilmektedir.

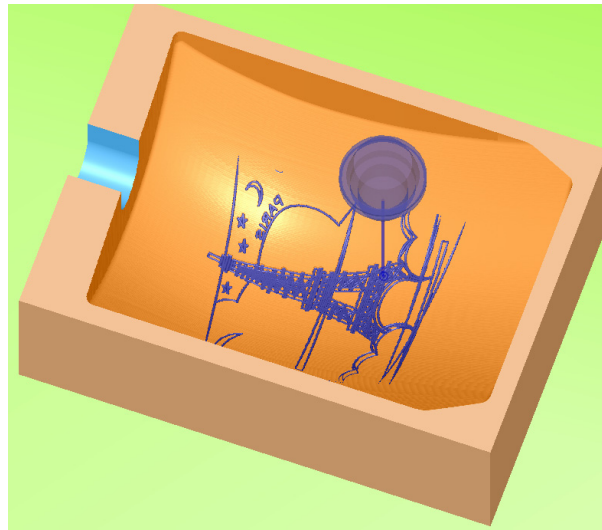


Şekil 3.113 a) İki boyutlu ögenin eğrisel yüzeye yansıtılması. b) Eğrinin segmentlere bölünmesi

Yansıtılan eğrinin segmentlere bölünebilmesi için yine daha önce kırışsel hataya (ε) bağlı adım uzunluğu hesaplayan algoritmaya bezer bir algoritma kurulmuştur. Bu algortmada öncelikle parametrik çizginin başlangıç noktasından başlanarak bir ön adımlama (S_i) yapılmıştır. Yapılan bu adımlama işlemine göre yüzey eğriliğine bağlı oluşan ε hesaplanmıştır. Hesaplanan bu hata kullanıcının izin verdiği tolerans aralığında ise bu noktada yüzey normali hesaplama algoritması çalıştırılarak bir TT noktası oluşturulup, bir sonraki segmentin (S_{i+1}) hesabına başlanmaktadır. Hesaplanan kırışsel hatanın izin verilen hatadan küçük çıkması durumunda segment büyütülmüş, büyük çıkması durumunda ise segment küçültülmüştür. Böylelikle takım yolu adım sayısı ve kırışsel hata kontrol edilmiştir. Algoritma içerisinde, daha önce izo-parametrik yöntemde kullanılan kırışsel hata hesaplama denklemleri bu algortmaya uyarlanarak kullanılmıştır. Her hangi bir TT noktası belirlendikten sonra o noktaya ait yüzey normali daha önceki prosedürlerde olduğu gibi bulunmuştur. Şekil 3.114-116'da bu strateji ile elde edilmiş olan örnekler ve simülasyon görüntüleri yer almaktadır.

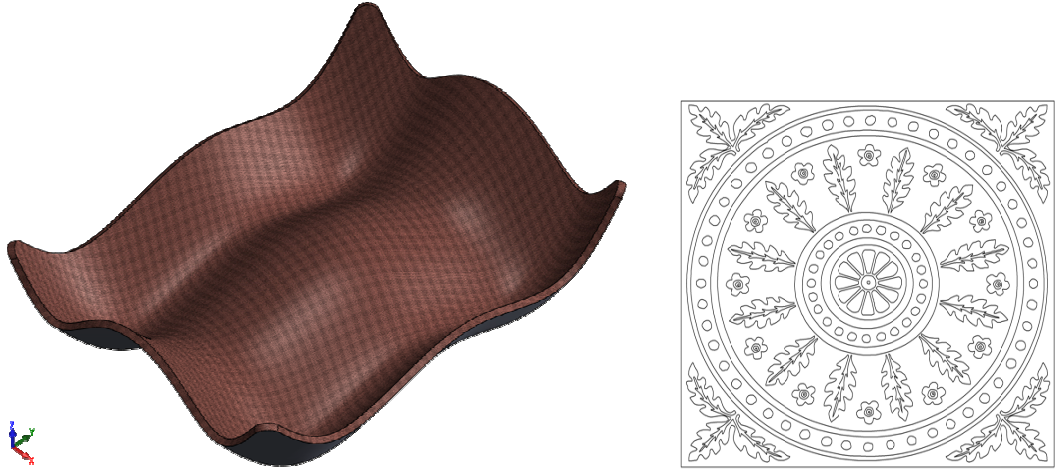


a) Bir parfüm şişesi modeli ve 2D model

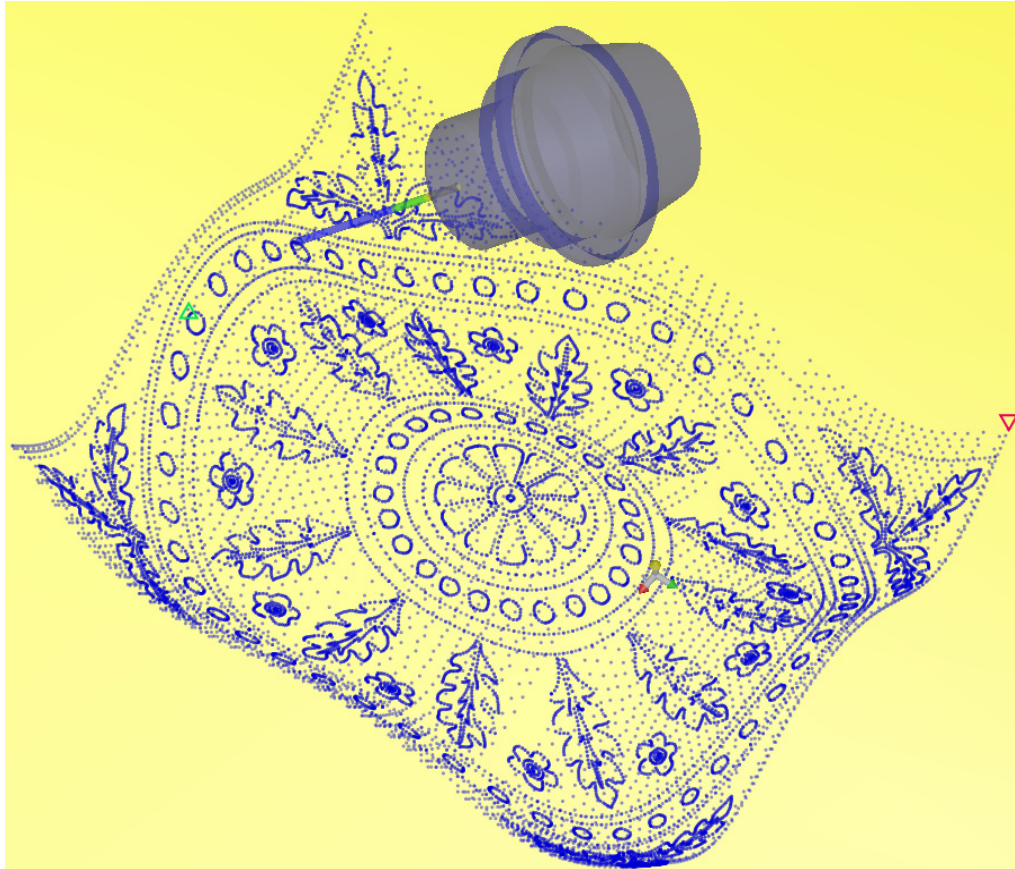


b) Katı model simulasyon görüntüsü

Şekil 3.114. Yansıtılmış eğri için oluşturulan takım yolu örneği

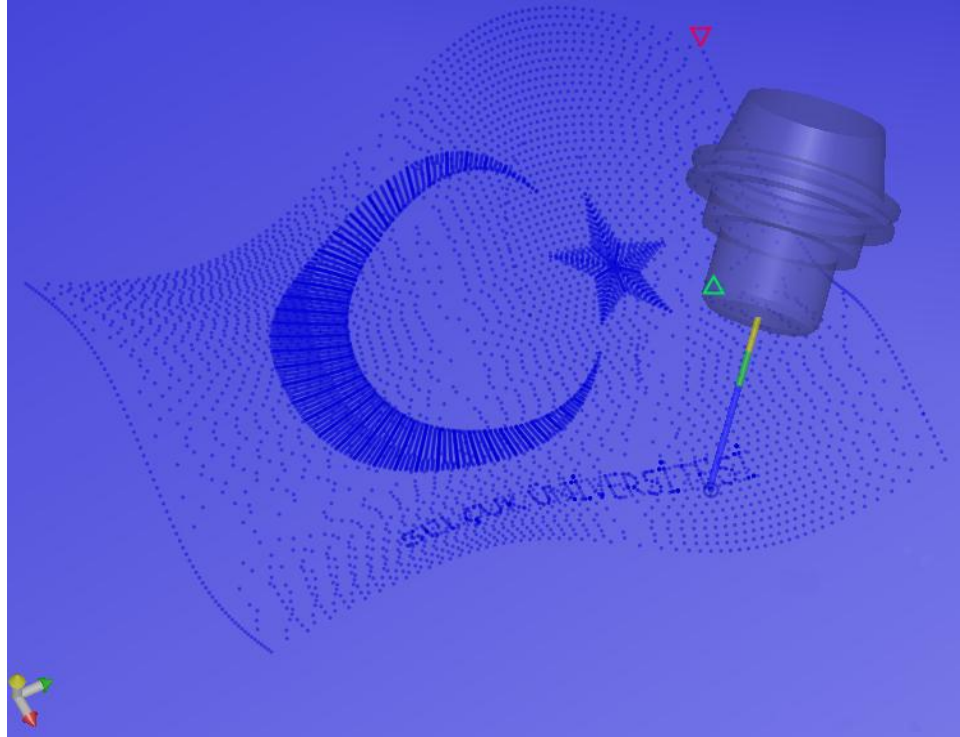


(a) B-Spline Yüzeyi ile elde edilmiş bir tabak modeli. (b) 2B desen dosyası

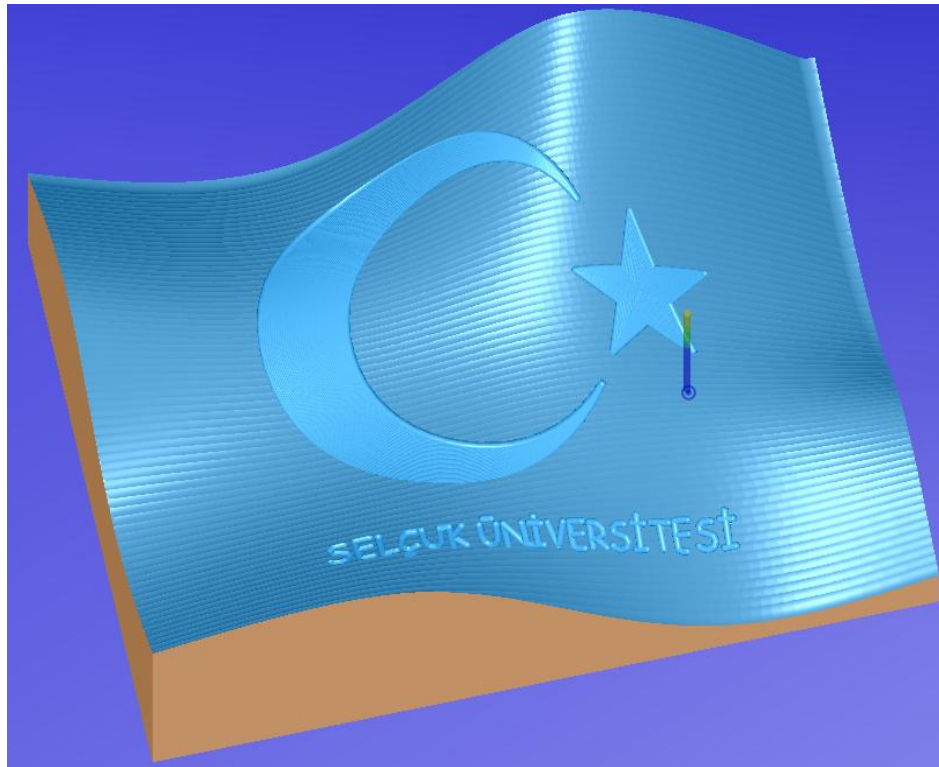


(c) Noktasal simülasyon görüntüsü

Şekil 3.115. Yansıtılmış eğriler için oluşturulan takım yolu noktasal simülasyonu



a) Noktasal simulasyon görüntüsü



b) Katı model simulasyon görüntüsü

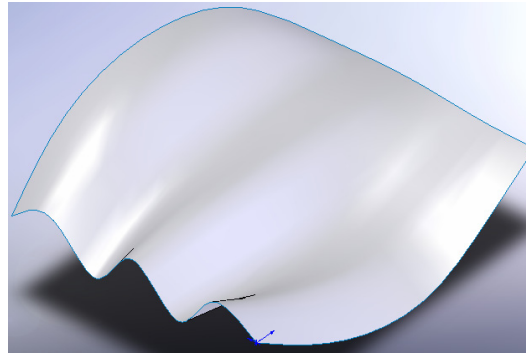
Şekil 3.116. Yansıtılmış eğriler için takım yolu noktasal-katı model simülasyonu

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

4.1. Takım Yolu Uzunluklarının Karşılaştırılması

Oluşturulan takım yolu stratejilerinin karşılaştırılması amacıyla toplam yol uzunluğu ve işleme zamanını hesaplayan bir prosedür geliştirilmiştir. Bu prosedür her bir adımdaki mutlak adım uzunluğunu hesaplayarak toplamaktadır. Takım yolu stratejilerinin etkinliğini kıyaslamak amacıyla 3 farklı tipte B-Spline yüzeyi tasarlanmıştır. Tasarlanan yüzeylerde, geliştirilen takım yolu stratejileriyle takım yolu oluşturularak toplam takım yolu uzunluğu ve işleme zamanı hesaplanmıştır.

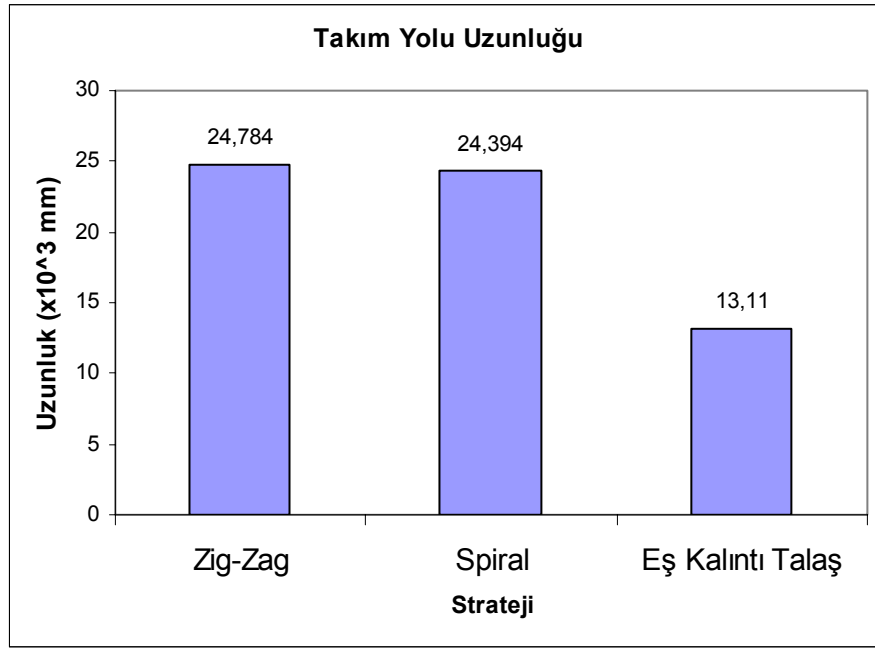
Karşılaştırma I



Şekil 4.1 B-Spline yüzey örneği

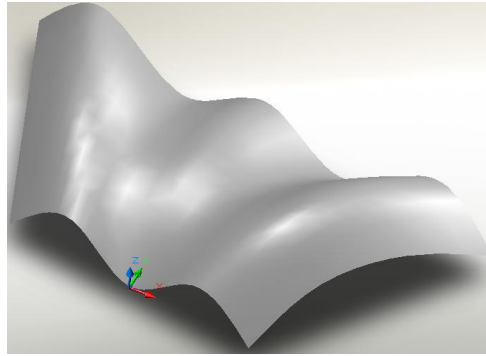
Tablo 4.1. Karşılaştırma I için takım yolu uzunlukları

Takım çapı: $D=6\text{mm}$ Kalıntı talaş: $h_{\text{maks}}=0,2$ Yanal kayma: $\omega=1,62$ İlerleme hızı: $f=100\text{ mm/dk}$ Kirişsel Hata: $\varepsilon=0,05\text{ mm}$	Zig-zag Çift yön	Spiral	Eş kalıntı talaş
	Yol uzunluğu: 24.784 mm İşleme Zamanı: 4s 8 dk	24.394 mm 3s 4 dk	13.110 mm 2s 11 dk



Şekil 4.2. Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması

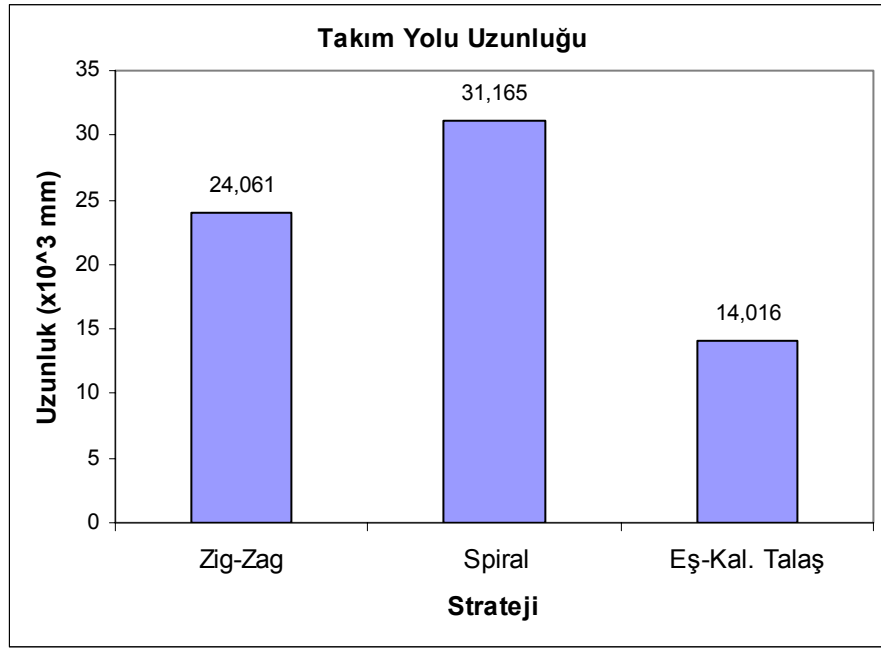
Karşılaştırma II



Şekil 4.3. B-Spline yüzey örneği

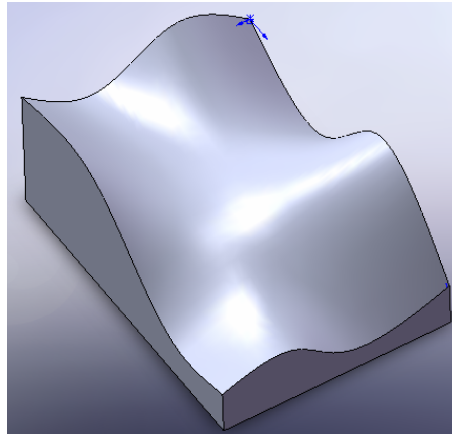
Tablo 4.2. Karşılaştırma II için takım yolu uzunlukları

Takım çapı: $D=10\text{mm}$ Kalıntı talaş: $h_{\text{maks}}=0,2$ Yanal kayma: $\omega=2,364$ İlerleme hızı: $f= 100 \text{ mm/dk}$ Kirişsel Hata: $\epsilon=0,05 \text{ mm}$	Zig-zag Çift yön	Spiral	Eş kalıntı talaş
	Yol uzunluğu: 24.061 mm İşleme Zamanı: 4s 01 dk	31.165 mm 5s 11 dk	14.016 mm 2s 20 dk



Şekil 4.4. Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması

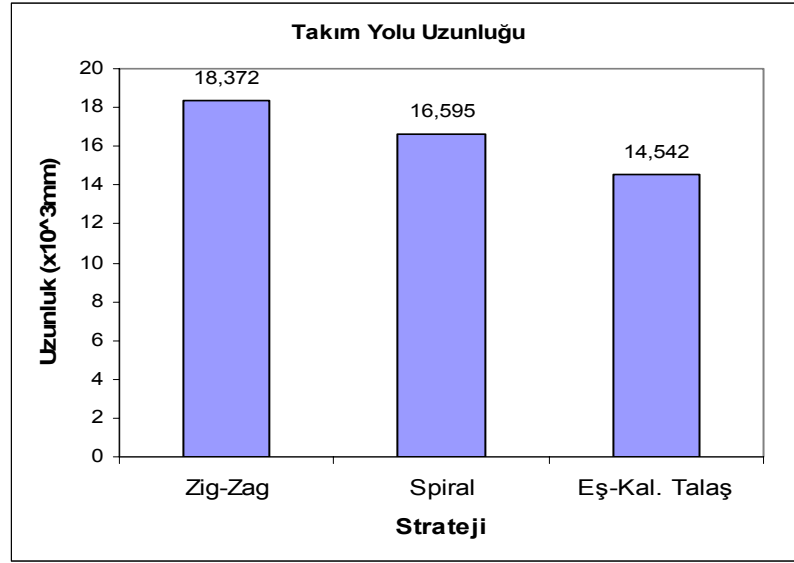
Karşılaştırma III



Şekil 4.5. B-Spline yüzey örneği

Tablo 4.3. Karşılaştırma III için takım yolu uzunlukları

Takım çapı: D=10mm Kalıntı talaş: $h_{maks}=0.2$ Yanal kayma: $\omega=2,591$ İlerleme hızı: $f= 100$ mm/dk Kirişsel Hata: $\epsilon=0,05$ mm	Zig-zag Çift yön	Spiral	Eş kalıntı talaş
	Yol uzunluğu: 18.372 mm İşleme Zamanı: 3s 04 dk	16.595 mm 2s 46 dk	14.542 mm 2s 25 dk



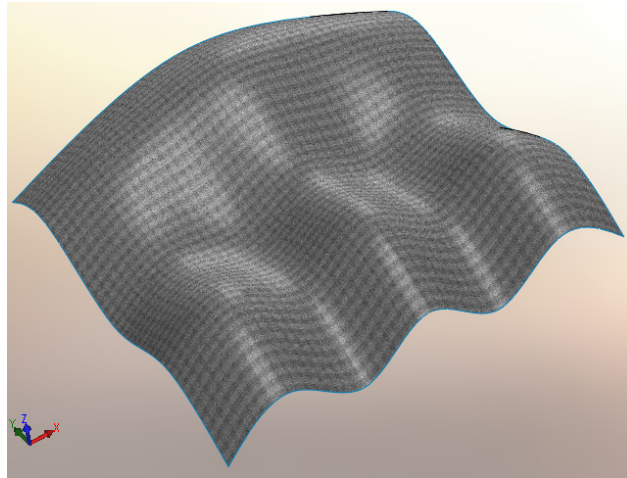
Şekil 4.6. Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması.

Her 3 örnekte de eşit kalıntı talaş metodunda en kısa işleme zamanı gerçekleşmiştir. Bunun sebebi iç bükey bölgelerde daha uzun yanal kayma yapılabilmesinden kaynaklanmaktadır. Zig-zag ve spiral de ise bir birine çok yakın işleme zamanları oluşmuştur. Bunun sebebi her iki yönteminde izo-parametrik takım yolu kullanmasıdır. Parametrik u yönünde verilebilecek maksimum yanal kayma v yönünde verilebilecek yanal kaymadan küçük olduğu yüzeylerde Zig-Zag takım yolu daha uzun işleme zamanı oluşturmaktadır. Bunun sebebi u yönündeki minimum dış bükey radyüsün v yönündekinden daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Zig-zag işlemeye göre spiral işlememin avantajı v yönündeki en küçük dış bükey radyüsün u yönündekine göre daha büyük olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Çünkü spiral işlemede içeriye doğru yapılan parametrik ofsetleme her iki yön içinde ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Fakat her iki ofsetlemede de dış bükey radyüsler dikkate alındığından iç bükey radyüsün olduğu bölgelerde takım yolu sıklığı oluşmakta dolayısıyla bu bölgelerde gereksiz bir yüzey pürüzlülüğü iyileşmesi görülmektedir. Eş kalıntı talaş metoduna göre izo-parametrik yöntemlerde işleme zamanının artmasının sebebi bu gereksiz takım yolu sıklığıdır.

4.2. Küresel ve Düz Uçlu Takımların Karşılaştırılması

Beş eksen eğrisel yüzey frezelemede düz uçlu takımların kullanılması işleme zamanı üzerinde oldukça etki etmektedir. Takıma eğim verildikçe efektif kesici radyüsü değiştirilebilmektedir. Değişen kesici radyüsü yüzey eğriliğine adapte edilince yanal kaymalar daha uzun aralıkta yapılabilmektedir. Küresel uçlu takımlar ise daha çok 3 eksen frezelemede daha etkin bir talaş kaldırmaya sahiptir. Beş eksen frezelemede takıma verilen eğim küresel takımların efektif kesici radyüsünü değiştirmedeği için bu değer sürekli sabittir. Aşağıda iki farklı parça için bu karşılaştırma verilmektedir. Kullanılan kesici takım çapı, takım seçim algoritmasının maksimum 20° fark açısı için tavsiye ettiği en küçük takım çapı olarak seçilmiş, düz ve küresel takım için aynı çaplı takım kullanılmıştır.

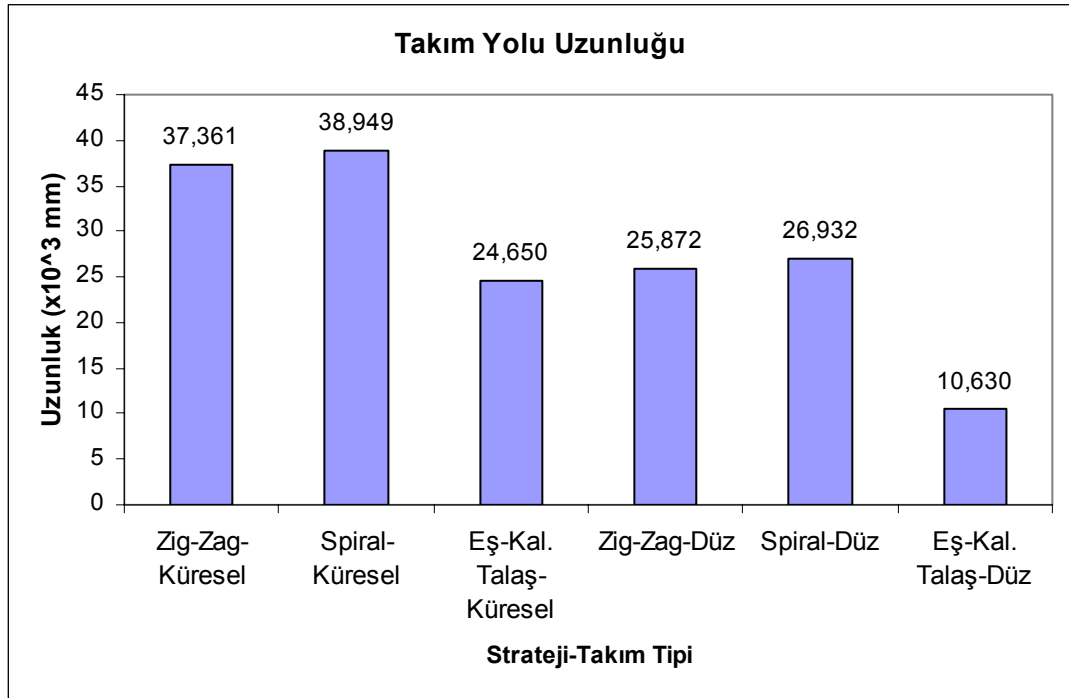
Karşılaştırma IV



Şekil 4.7. B-Spline yüzey örneği.

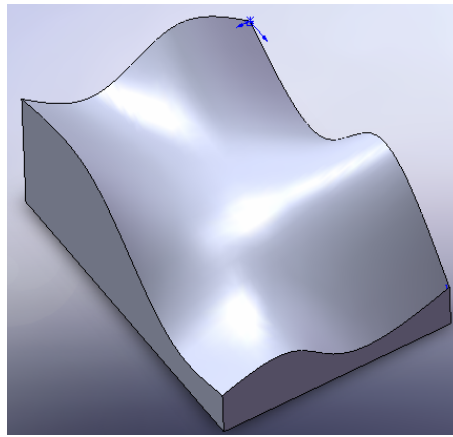
Tablo 4.4. Küresel ve düz takımların karşılaştırması takım yolu uzunlukları

	Zig-zag çift yön	Spiral	Eş kalıntı talaş
Takım çapı D=6mm küresel Kalıntı talaş $h_{maks}=0,2$ mm Yanal kayma $\omega=1,904$ mm f= 100 mm/dk $\epsilon=0,05$ mm	Yol uzunluğu: 37.361 mm İşleme Zamanı: 6s 13 dk	38.949 mm 6s 30 dk	24.650 mm 4s 7 dk
Takım çapı D=6mm düz Kalıntı talaş $h=0,2$ mm f= 100 mm/dk $\epsilon=0,05$ mm	Yol uzunluğu: 25.872 mm İşleme Zamanı: 4s 18 dk	26.932 mm 4s 30 dk	10.630 mm 1s 46 dk



Şekil 4.8. Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması.

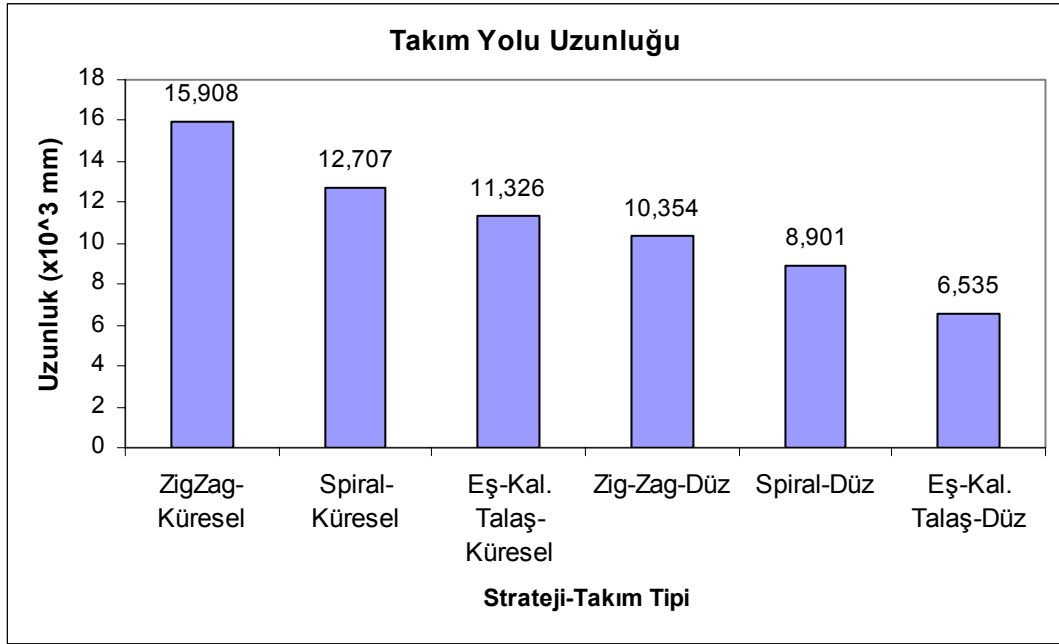
Karşılaştırma V



Şekil 4.9. B-Spline yüzey örneği.

Tablo 4.5. Küresel ve düz takımların karşılaştırması takım yolu uzunlukları

Takım çapı D=16mm küresel Kalıntı talaş $h_{maks}=0,2$ mm Yanal kayma $\omega=1,904$ mm f= 100 mm/dk $\epsilon=0,05$ mm	Zig-zag çift yön	Spiral	Eş kalıntı talaş
		Yol uzunluğu: 15.908 mm İşleme Zamanı: 2s 29 dk	12.707 mm 2s 7 dk
Takım çapı D=16mm düz Kalıntı talaş h=0,2 mm f= 100 mm/dk $\epsilon=0,05$ mm	Yol uzunluğu: 10.354 mm İşleme Zamanı: 1s 43 dk	8.901 mm 1s 29 dk	6.535 mm 1s 5 dk



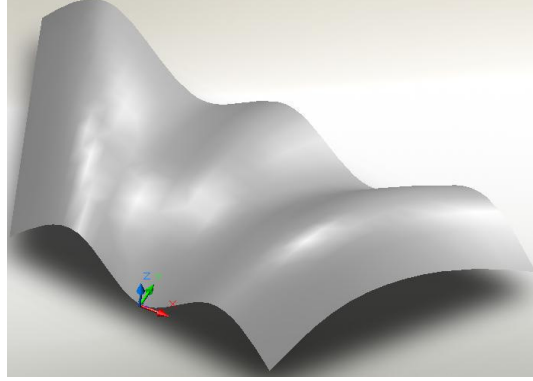
Şekil 4.10. Takım yolu uzunluklarının karşılaştırılması.

Her iki örnek yüzeyde de aynı strateji de aynı çaplı düz uçlu takımların işleme zamanını %30-40 oranında düşürdüğü gözlenmiştir. En düşük işleme zamanı eş kalıntı talaş stratejisinde düz uçlu takımların kullanıldığı takım yollarında oluşmaktadır. Bunun sebebi takımın efektif kesici yarıçapının büyütülerek iç bükey yüzeylerde daha çok yanal kayma yapılabilmesidir. Böylelikle yanal kayma içbükey yüzeylerde artırılmış ve yüzey pürüzlülüğü aynı kalmak şartıyla işleme zamanı düşürülebilmektedir.

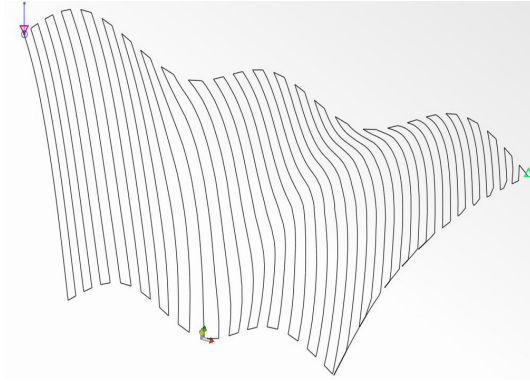
4.3. Takım Yolu Geometrilerinin Karşılaştırılması

Takım yolu geometrilerinin kıyaslanması amacıyla aynı takım ve işleme şartlarında oluşturulan takım yolları simüle edilerek ekran görüntüleri alınmıştır.

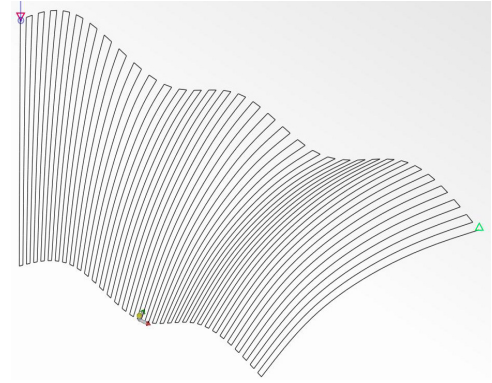
Karşılaştırma VI



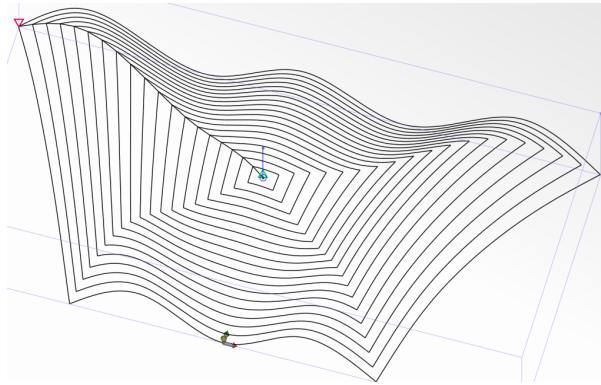
(a) Örnek B-Spline yüzeyi



(b) Eşit kalınlı talaş/Zig-Zag



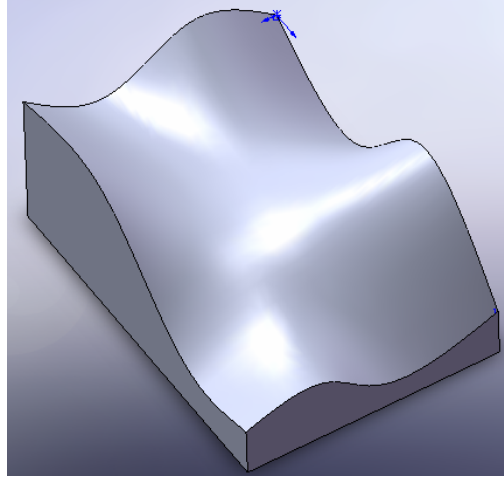
(c) İzo-parametrik/Zig-Zag



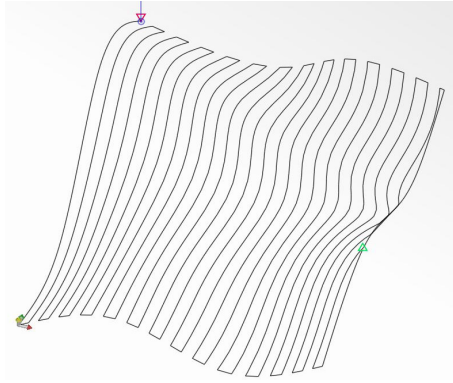
(d) İzo-parametrik/paralel-spiral

Şekil 4.11. Takım yolu geometrilerinin karşılaştırılması.

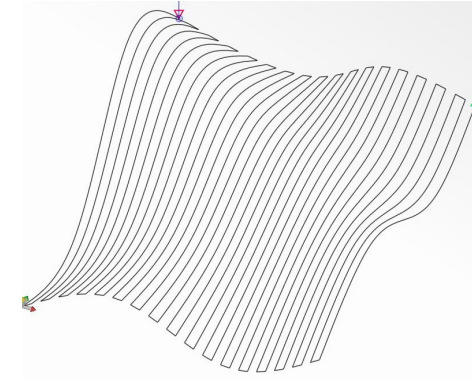
Karşılaştırma VII



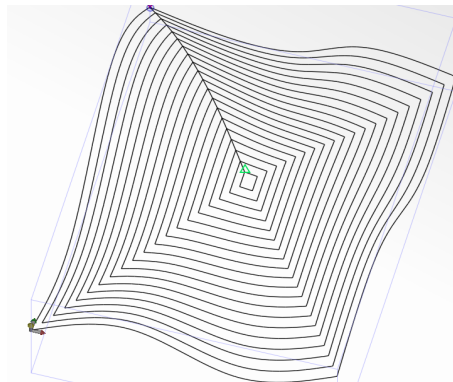
(a) Örnek B-Spline yüzeyi



(b) Eşit kalınlı talaş/Zig-Zag



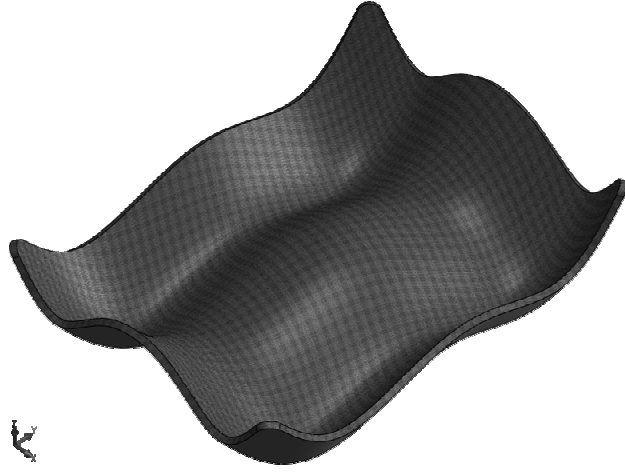
(c) İzo-parametrik/Zig-Zag



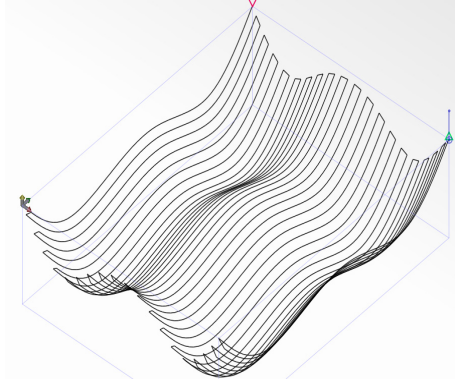
(d) İzo-parametrik/paralel-spiral

Şekil 4.12. Takım yolu geometrilerinin karşılaştırılması

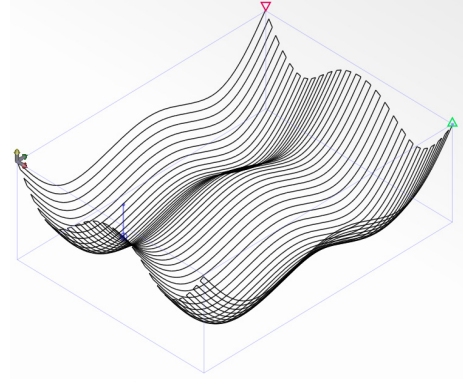
Karşılaştırma VIII



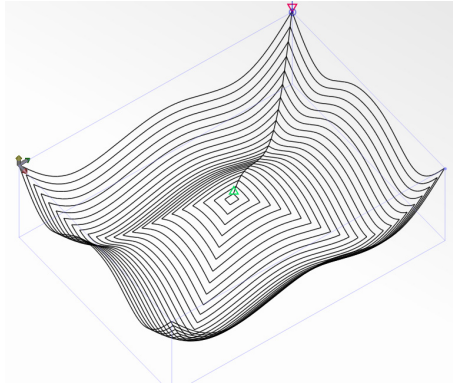
(a) Örnek B-Spline yüzeyi



(b) Eşit kalınlı talaş/Zig-Zag



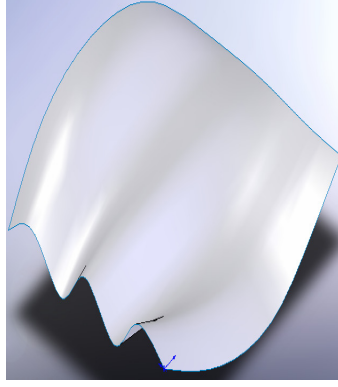
(c) İzo-parametrik/Zig-Zag



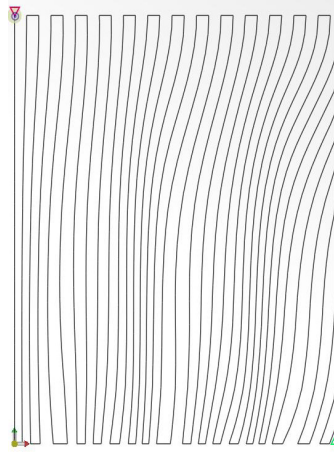
(d) İzo-parametrik/paralel-spiral

Şekil 4.13. Takım yolu geometrilerinin karşılaştırılması

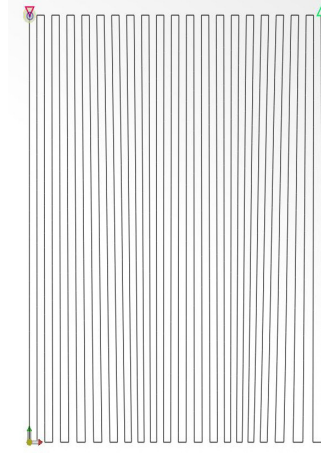
Karşılaştırma IX



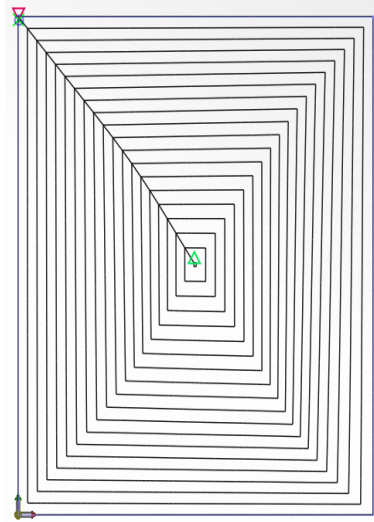
(a) Örnek B-Spline yüzeyi



(b) Eşit kalınlı talaş/Zig-Zag



(c) İzo-parametrik/Zig-Zag



(d) İzo-parametrik/paralel-spiral

Şekil 4.14. Takım yolu geometrilerinin karşılaştırılması

Takım yolu geometrileri incelendiğinde, eşit kalıntı talaş stratejisiyle işlenen yüzeylerde takım yolu aralıklarının yüzey eğriliğine göre adaptif olarak değiştiği görülmektedir. İzo-parametrik zig-zag ve paralel spiral takım yolunda ise takım yolu aralıklarının sabit olduğu görülmektedir. Eşit kalıntı talaş stratejisinde, ilerleme yönündeki karşılıklı kenarlarda oluşan takım yolu sayısı farklılık gösterebilmektedir. Herhangi bir kenardaki takım yolu köşe noktaya erişince diğer kenardaki takım yolu sayısı sone ermemiş olabilir. Böyle bir durumda takım yolu başlangıçtaki, sınır eğrisi ile komşu kenardaki sınır eğrisi arasında gerçekleşebilir. Bunun sebebi karşılıklı kenardaki sınır eğrilerine ait uzunlukların ve eğriliklerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum karşılaştırma 6,7,9'da gösterilen b,c şekillerinde net olarak görülmektedir. Karşılaştırma 8'de bu durumun oluşmamasının sebebi ise karşılıklı sınır eğrisinin tasarımda süpürme yüzeyi boyunca değişiklik göstermemesinden kaynaklanmaktadır. Komşu kenarlar arasında da takım yolu oluşması eşit kalıntı talaş stratejisinin en belirgin özelliğidir. İzo-parametrik zig-zag takım yolunda ise yol sürekli karşılıklı kenarlar arasında gidip gelmektedir. İşleme zamanının bu stratejide yüksek çıkmasının en büyük sebeplerinden biride budur.

4.3. Tartışma

Beş eksen takım yolu oluşturma hakkında literatürde birçok araştırmaya rastlanmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı izo-parametrik bir kısmı ise eşit kalıntı talaş stratejisi ile ilgili çalışmalardır. Bütün çalışmaların ortak amacı, toplam takım yolu uzunluğunun azaltılarak işleme zamanının kısaltılması aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün azaltılması yönündedir. Takım yolu oluşturma stratejilerinin içerisinde düşünülmesi gereken bir diğer durum ise yerel ve geri dalmanın engellenmesidir. Bu iki durum takım yolu oluşturmada hesaplama süresini oldukça etkileyen bir işlemler bütünüdür.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığı zaman takım yolu oluşturulan yüzey şekli olarak Nurbs ve Bêzier gibi parametrik yüzeyler ve fonksiyonu kullanıcı tarafından belirlenen yüzeyler yanında yaklaşık yüzey temsili sağlayan poligonlaştırılmış yüzeyler ve nokta bulutu kullanıldığı da görülmektedir(Athulan 2009, Lo 1999). Bezier gibi parametrik yüzey kullanılan çalışmalarda kontrol poligonlarına ait noktalar kullanıcı tarafından girilmiştir. Yapılan çalışmaların birçoğu BDT alanında kullanılan veritabanlarını kullanmamıştır.

Yapılan bu çalışmada serbest şekilli yüzeylerin modellenmesinde sıkça tercih edilen üçüncü derece (bikübik) B-Spline yüzeyleri kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yüzeye ait bilgiler STEP AP-214 veri tabanından alınmıştır. Alınan verilerle yüzey denklemi kurulmuş ve takım yolu oluşturulmuştur.

Hazırlanan bu tez çalışmasında oldukça kompleks forma sahip parametrik yüzey yamaları kullanıldığından endüstriyel uygulamalara adapte edilmesi oldukça kolaydır. Literatürdeki çalışmalar tek parça bezier yüzeyiyle sınırlı kaldığından veya denklemi araştırmacı tarafından girildiğinden daha fazla geliştirilme olanakları sınırlıdır (Lo 1999).

Eğrisel yüzeylerin beş eksenli tezgâhlarda işlenmesi genelde düz uçlu parmak frezelerle yapılmaktadır. Bu çalışmada eğrisel yüzeylerin etkin bir şekilde frezelenmesi için eğrilik eşleştirmeli bir strateji oluşturulmuştur. Literatürdeki bir çok ize parametrik takım yolu oluşturma stratejisi sabit bir parametrik yanal kayma miktarı kullanmış ve ilerleme yönünde adım uzunluğunu göz ardı etmiştir (Jensen 2001, Jinhua 2008). Yüzey üzerinde takım yolu aralığına göre kalıntı talaş analizi yapan çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak bir yüzey eğrilik analiz prosedürü geliştirilmiştir. Bu analiz neticesinde daha takım yolu oluşturulmadan yüzeyde bırakılan kalıntı talaş miktarı bilinmektedir. Aynı zamanda adım uzunlukları da eğriliğe bağlı sabit kirişsel hataya bağlı olarak yapılabilmektedir.

Beş eksen işlemede optimal takım seçimi üzerine çok fazla bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan çalışmalarda köşeleri yuvarlatılmış takım ve belirlenen takım kütüphanesiyle sınırlıdır (Jensen 2001). Bu tez çalışmasında literatürdeki bu açığı gidermek amacıyla optimal düz ve küresel uçlu takım seçim önerisi gerçekleştiren bir prosedür geliştirilmiştir. Ayrıca önerilen takım ile beraber etkin bir frezeleme için sabit eğim açısı öneren birde prosedür bulunmaktadır.

Eşit kalıntı talaş stratejisi üzerine yapılan çalışmalarda yine B-Spline parametrik yüzeylerini kullanan çalışmalara rastlanmamıştır. Literatürdeki çalışmalar genelde parametrik bezier ve üçgenleştirilmiş yüzeyleri tercih etmektedir (Jianhua 2008, Jun 2003). Bu yüzden yapılan bu tez çalışması endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilen B-spline yüzeylerini STEP formatından alarak beş eksen frezeleme için eşit kalıntı talaş takım yolu oluşturan ilk çalışmadır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde birçok çalışmanın sınırlı kaldığı ve endüstriyel uygulamalara aktarılmasının çok zor olacağı anlaşılmaktadır. Örneğin yapılan birçok çalışmada yüzey denklemini kullanıcı tarafından girilmiştir. Bu teknik nümerik hesaplama açısından birçok kolaylık sağlar fakat endüstriyel uygulamalara aktarılması sınırlıdır.

Literatürde yapılan bazı çalışmada geri dalma TT noktası altında kalan takım gölgesinin sadece sınırlarında yapılmaktadır. İç noktalardaki muhtemel dalma göz ardı edilmektedir (Hosseinkhania 2007). Bu çalışmada oldukça hassas bir geri dalma prosedürü geliştirilmiştir. Tarama 0,15 mm lik aralıklarla yapıldığından takım kenarı ve orta kısmı da dahil olmak üzere tüm dalmalar elimine edilmiş güvenli bir beş eksen takım yolu oluşturulmuştur.

Yapılan bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen tüm durumları komple bir bütün olarak ele alan ve endüstriyel uygulamalara uygun bir çalışma yapılmıştır. Çalışma öncelikle standart bir veri tabanı olan STEP formatı kullanmakta ve BDT alanında tercih edilen B-Spline yüzeylerini tanımaktadır. Takım yolu oluşturulmadan önce yüzey analiz edilmekte yüzeye ilgili bilgiler kaydedilmektedir. Bu analiz

neticesinde kullanıcıya düz ve küresel uçlu takım seçimi önerileri gerçekleştirilmektedir. Ve kullanıcının girdiği yanal kayma miktarına göre yüzeyde oluşabilecek maksimum ve minimum kalıntı talaş miktarı tahmin edilebilmektedir. Takım yolu oluşturmada ise eğrilik eşleştirmeli bir strateji oluşturulmuştur. Takım oryantasyonu ile talaş kaldırma oranı maksimize edilmiş, aynı anda yerel ve geri dalma durumları kontrol altına alınmıştır. Ayrıca takım yolu adımlarını kontrol eden eğriliğe bağlı olarak izin verilen toleransta adım uzunluğu oluşturan algoritmalar kurulmuştur. Böylece takım yolu adım sayısı kontrol altına alınmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, serbest şekilli eğrisel yüzeylerin eğimli-döner bir 5 eksen nümerik kontrollü tezgahta işlenebilmesi için gerekli takım yollarını oluşturan bir program geliştirilmiştir. Eğrisel yüzey olarak B-Spline parametrik yüzeyi kullanılmış ve eğrisel yüzey Solidworks-09 programında “loft-swept” komutları kullanılarak tasarlanmıştır. Eğrisel yüzey “Step AP-214” formatında kaydedilmiş ve geliştirilen yazılım vasıtasıyla step dosyası açılarak “B-Spline” yüzey denklemini elde etmek için gerekli parametreler okunmuştur. Eğrisel yüzey olarak 3. dereceden oldukça karmaşık sayılabilecek yüzeylerin matematiksel ifadeleri oluşturulabilmiştir.

Yüzey denkleminin doğruluğu, yüzeyi ifade edecek sıklıktaki noktaların bir nokta bulutu verisine dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Bu işlem için her iki parametrik yönde izo-parametrik tarama yapılarak noktalar elde edilmiştir. Elde edilen nokta koordinatları için bir “AutoLisp” programı yazılmış ve hazırlanan program “AutoCAD” ortamında çalıştırılarak yüzey koordinatlarının doğruluğu görsel olarak incelenebilmiştir.

İzo-parametrik takım yolu oluşturma stratejilerinde takım yolu oluşturulmadan önce verilecek parametre artışlarının hesaplanabilmesi için takım yolu oluşturulmadan önce yüzeyi analiz eden ve yüzeyin her iki parametrik yönüne ait minimum iç ve dış bükey eğrilik yarıçaplarını hesaplayan bir analiz algoritması geliştirilmiştir. Bu analizin sonucunda yanal kayma için verilecek parametrik artışlar hesaplanabilmiştir. Analiz algoritması neticesinde elde edilen değerler kullanılarak, verilen bir yanal kaymanın yüzey üzerinde oluşturacağı yüzey pürüzlülüğü takım yolu oluşturulmadan önce hesaplanabilmektedir. Tam ters olarak yüzey üzerinde izin verilen bir yüzey pürüzlülüğünün oluşabilmesi için yanal kayma miktarını hesaplanabilmektedir.

Analiz algoritması sonuçları aynı zamanda takım seçimi içinde kullanılmaktadır. Yüzey üzerinde hesaplanan minimum içbükey eğrilik yarıçapları kullanılarak takım seçim algoritması geliştirilmiştir. Algoritma yerel dalmanın oluşmaması ve takımın eğriliğe yanaşamamasından kaynaklanan kalıntı talaş oluşmaması için uygun küresel ve düz uçlu takım seçimini gerçekleştirmektedir.

Küresel uçlu takımlarla 3 eksen frezeleme işlemlerinde kesici uç çapının sıfıra indiği kesici takımın en uç noktasında kesme hızı sıfıra inmekte dolayısı ile tam bir kesme oluşmamaktadır. Beş eksen frezelemenin en büyük avantajlarından biride bu kesme noktasının takıma verilecek ekstra eğim açısıyla ayarlanabilmesidir. Düz uçlu parmak frezelerin ise 3 eksen eğrisel yüzey işlemede kullanımı sınırlıdır. Çünkü yüzey eğriliği ile kesici takım eğriliğinin bir biri ile uyum sağlamadığı durumlarda yerel dalma meydana gelmektedir. Düz uçlu takımlarda takıma verilecek ekstra eğim açısı ile kesici takımın efektif kesici yarıçapı değiştirilerek yüzey eğriliğine uydurulabilmektedir. Kurulan algoritmalarda küresel uçlu takıma isteğe bağlı olarak ekstra bir eğim açısı verilebilmektedir. Böylelikle takımın kesme hızının sıfıra indiği merkez noktasında kesme işlemi engellenebilir. Düz uçlu kesici takım kullanılması durumunda ise verilecek zorunlu eğim açısı algoritma neticesinde hesaplanabilmektedir. Burada lokal yüzey eğriliği hesaplanmış ve takım eğriliği yüzey eğriliğine uydurularak yerel dalma engellenmiştir.

Takım yolları oluşturulurken düz uçlu bir takım kullanılması durumunda oluşabilecek muhtemel geri dalma kontrolünün yapılabilmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, takım yolu oluşturma esnasında her hangi bir TT noktası hesaplandığında, takımın kesme yapmayan geri noktasında, takım gölgesi altında kalan bölgede dalma analizi yapmaktadır. Verilen fark açısının dalma oluşturduğu durumda ise fark açısını artırarak dalma durumunu ortadan kaldırmaktadır.

İlerleme yönünde takım yolu adımlarını kontrol eden bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algorithmada her iki TT noktası arasında oluşan kirişsel hata kontrol altına alınmıştır. Böylelikle TT adımları sayısı sınırlanmıştır. Kullanıcının izin verdiği kirişsel hata miktarına ve ilerleme yönündeki eğrilik yarıçapına göre TT noktası aralıkları değişmektedir. Yüzey eğrilik yarıçapı büyüyerek düzleme yaklaştığı bölgelerde adım uzunluğu artmış, eğrilik yarıçapının küçüldüğü bölgelerde ise adım uzunluğu küçülmüştür.

İzo-parametrik takım yolu stratejileri yukarıda bahsedilen bu algoritmaların hepsini kendi içinde kullanarak takım yolu oluşturmaktadır. İlk geliştirilen izo-parametrik takım yolu stratejisi zig-zag tek yön talaş kaldırma stratejisidir. Bu stratejide takım tek yönde ilerleyerek talaş kaldırmakta geri gelirken parçadan yükselerek yanal kayma yapmakta ve başlangıca konumlama yaparak tekrar talaş kaldırma yapmaktadır. Bu takım yolu stratejisinde tek yönlü talaş kaldırma yapıldığı için hızlı yapılan yükselme ve konumlama işleme zamanına etki etmektedir.

İkinci izo-parametrik takım yolu stratejisi ise zig-zag çift yön talaş kaldırma stratejisidir. Bu stratejide takım ileri ve geri gelme esnasında talaş kaldırmakta ve parçadan hiç yükselme hareketi yapmamaktadır. Burada yine takım seçim algoritması takım seçimi gerçekleştirmekte ve yüzey pürüzlülüğü kalıntı talaş şeklinde analiz edilebilmektedir. Kurulan analiz algoritması neticesinde seçilen takıma ve verilen yanal kayma miktarına göre, yüzey üzerinde minimum ve maksimum kalıntı talaş yüksekliği takım yolu oluşturulmadan belirlenebilmektedir. Veya kullanıcının girdiği maksimum kalıntı talaş yüksekliğine göre verilmesi gereken yanal kaymayı hesaplayabilmektedir.

Üçüncü izo-parametrik takım yolu ise paralel spiral takım yolu stratejisidir. Bu stratejide takım dıştan içe küçülen veya içten dışa büyüyen paralel spiraller şeklinde talaş kaldırmaktadır. Zig-zag takım yolu stratejilerinde kirişsel hata sürekli tek yönde oluşmaktadır. Bu stratejide ise zig-zag talaş kaldırma stratejilerine nazaran her iki yönde de kirişsel hata oluşumu gerçekleştirdiği için daha uniform bir kirişsel hata dağılımı gerçekleşmektedir.

İzo-parametrik takım stratejisinde yanal kaymalar parametrik alanda sabit olarak verildiğinden fiziksel yüzeyin her yerinde farklı yanal kaymalar oluşmaktadır. Bu durum yüzey üzerinde kalıntı talaş miktarına ve yüzey pürüzlülüğüne etki etmektedir. Sabit bir kalıntı talaş yüksekliği için; iç bükey yüzeylerde yanal kayma artırılmalı, dış bükey yüzeylerde ise azaltılmalıdır. Tam ters olarak sabit bir parametrik yanal kaymada; iç bükey eğrisel yüzeylerde kalıntı talaş miktarı azalırken, dış bükey yüzeylerde artmaktadır. İç bükey yüzeylerde yanal kayma miktarının artırılmaması işleme süresine direk etki etmektedir. Aynı zamanda kalıntı talaş miktarının yüzeyin eğriliğine bağlı olarak her yerde değişmesi yüzey pürüzlülüğünün homojen olarak dağılımını engellemektedir. Sabit parametrik yanal kaymada iç bükey yüzeylerde gereksiz bir yüzey pürüzlülüğü düşüşü gerçekleşirken tam ters olarak dış bükey yüzeylerde ise yüzey pürüzlülüğünde bir artış meydana gelmektedir.

Bu dezavantajlarından dolayı değişen eğriliğe rağmen yüzeyin her bölgesinde eşit miktarda kalıntı talaş bırakacak farklı bir stratejiye ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde “izo-scallop” olarak adlandırılan bu yöntemde, yanal kaymalar yüzey eğriliğine göre adaptif olarak yapıldığından yüzeyin her yerinde kalan talaş miktarı eşit olmaktadır. Eş kalıntı talaş olarak adlandırılan bu stratejide yüzey eğriliğinin değişimine göre, iç bükey eğrilik yarıçapının olduğu bölgelerde yanal kayma artırılmakta, dış bükey eğrilik yarıçapının olduğu bölgelerde yanal kayma azaltılmaktadır. Yanal ilerleme yönünde adaptif bir yanal kayma yaparken aynı zamanda ilerleme yönünde izin verilen kırışsel hataya bağlı adım uzunluğunu hesaplamak oldukça zordur.

Eşit kalıntı talaş stratejisinde iki farklı takım yolu oluşturma algoritması geliştirilmiştir. Her iki algoritmaya ait takım yolu geometrileri ve takım yolu uzunlukları bir birine çok yakın çıkmıştır. İki algoritma arasındaki fark, hesaplama süresinin farklı olmasıdır. İlk stratejide yanal kayma yönünde ilerleme yaparken aynı zamanda ilerleme yönünde adım uzunluğu hesaplanabilmesi için iki farklı algoritma geliştirilmiştir. İlk algoritmada yüzey eğriliğine göre adaptif yanal kaymalar hesaplanmış, ikinci algoritma hesaplanan bu noktalar arasından ilerleme yönünde

kirişsel hataya bağlı uygun noktaları seçerek takım yolu oluşturmuştur. Eşit kalıntı talaş için kurulan ikinci strateji hem yanal kaymayı hem de ilerleme yönünde adım uzunluğunu iteratif bir yöntemle hesap etmektedir. Bu yöntem ilk stratejiye göre daha kısa sürede hesaplama yapmaktadır. Bu stratejiler ile elde edilen takım yolunda ilerlemeler yüzey eğriliğine göre adaptif olarak yapıldığından yüzeyin her yerinde eşit kalıntı talaş meydana gelmektedir. Fakat diğer yöntemlere nazaran işleme süresi yüzeyin eğriliğine göre %30-50 düşmektedir.

Bu çalışmadan sonra yapılabilecek çalışmalar ise şu şekilde sıralanabilir;

Bu tez çalışmasında oluşturulan paralel spiral takım yolları geliştirilerek, yüzeyde eşit kalıntı talaş bırakan gerçek spiraller şeklinde takım yolu oluşturma algoritmaları geliştirilebilir.

Bu çalışmada endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilen küresel ve düz uçlu takım seçim önerisi gerçekleştirilmiştir. Bu teknik köşeleri yuvarlatılmış takıma adapte edilebilir.

Tasarım yüzeyi olarak tercih edilen B-spline yüzeyleri yerine Nurbs yüzeyleri ve üçgenleştirilmiş yüzey verisi kullanılabilir.

Bu çalışmada eğrilik eşleştirme ve optimal oryantasyon sadece eğim açısıyla yapılmış ve dönme açısı sabit tutulmuştur. Daha optimal bir çözüm için hem eğim hemde dönme açısı kullanılabilir.

Bu çalışmada TT noktaları arasında değişen oryantasyon değişimleri, takım yollarının yüksek hızda işleme şartlarına uygun hale getirilmesi için sınırlandırılabilir.

Kesme kuvvetlerinin tahmini, ilerleme hızının ayarlanması ve optimizasyonu kullanarak takım yolu stratejileri oluşturulabilir.

Kaba ve yarı kaba işleme için optimum talaş kaldırma stratejisi ve takım seçimi üzerine çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Athulan, V., Aaron, M.H., Jeffrey H., David A.D. 2009 Improving end milling surface finish by workpiece rotation and adaptive toolpath spacing. *International journal of MachineTools&Manufacture*. 49:89–98.
- Austin, S., Jerard, R.B., Drysdale S. 1997 Comparison of discretization algorithms for Nurbs surfaces with application to numerically controlled machining. *Computer Aided design* 29:71-83.
- Bohez, E.L.Z. 2002 Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 42:505–520.
- Chen-Hua, S., Chun-Cheng, C. 2007 Development of a five-axis postprocessor system with a nutating head. *Journal of Materials Processing Technology*. 187:60-64.
- Chen, Y.J., Ravani B. 1987 Offset surface generation and contouring in computer aided design. *ASME Journal of Mechanism, Transmission and Automation in Design* 109:42-132
- Choi, B., Kim, B.H. 1997 Die-Cavity pocketing via cutting simulation. *Computer Aided Design*. 29:837-845.
- Choi, B. 1991 *Surface modeling for CAD-CAM*. Amsterdam: Elsevier Science Publications.
- Christophe, T., Emmanuel, D. 2005 Iso-scallop tool path generation in 5-axis milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 25:867–875.
- Choi, B., Jerard R. 1998 *Sculptured surface machining-theory and applications*. Kluwer Academic Publ. Dordrecht.
- Choi, B. 1988 Triangulation of scattered data in 3D space. *Computer Aided Design*. 20(3):239-247.
- Chun-Cheng, C., Chen-Hua, S. 2007 Design of a generic five-axis postprocessor based on generalized kinematics model of machine tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 47:537–545
- Cox, M.G. 1972 The numerical evaluation of B-splines. *Journal of Mathematic Application*. 10:134-149.
- Çiçek, A., Gülesin, M. 2006 Cad/Cam Uygulamaları İçin Step Dosyalarının Yorumlanması. *Teknoloji* 8:47-58.
- Çelikkol, S. 2003 *Programlamaya giriş ve algoritmalar*. Dilara Yayınevi. Ankara.

- David, J.R. 2004 Mechanistic modeling of 5 axis machining. PhD. Thesis. University of Waterloo., Canada.
- De Boor, C. 1972 On calculating with B-splines. *Journal of Approximate Theory*. 10:50-62.
- Ersoyoğlu, A.S. 2005 Serbest şekilli yüzeylerin işlenmesi için takım yolu oluşturulması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü , Konya).
- Fang-Jung, S., Ruey-Tsung, L. 2006 Calculation of the Unit Normal Vector Using the Cross-Curve Moving Mask for Measurement Data Obtained from a Coordinate Measuring Machine. *Journal of Physics*. 48:122–127.
- Farrin, G. 1993 *Curves and surfaces for computer aided geometric design*, Academic Press. M.A. Cambridge.
- Faux, I.D., Pratt M.J. 1979 *Computational geometry for Design and manufacture*. John Willey and Sons. Newyork.
- Gray, P., Bedi, S., Fathy, I. 2003 Rolling ball method for 5 axis surface machining. *Computer Aided Design*. 35:347-357.
- Hansen, A. Arbab F., 1992 an algorithm for generating NC toolpath for arbitrarily shaped pockets with islands. *ACM Trans graphics* 11:82-152.
- Hosseinkhania, Y., Akbaria, J., Vafaesefat, A. 2007 Penetration–elimination method for five-axis CNC machining of sculptured surfaces. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 47:1625-1635.
- Hong., 2001 NURBS machining and feed rate adjustment for high-speed cutting of complex sculptured surface. *International Journal of Production Research* 39:21-41.
- Jerard, R.B., Drysdale, R.L., Hauck K. 1988 Geometric simulation of numerical controlled machining. *ASME Computers in Engineering Conf*. 36-129.
- Jensen, C.G., Red, W.E., Pi, J. 2001 Tool selection for five axis curvature matched machining. *Computer Aided Design* 34:251-266.
- Jianhua, F., Alan, B. 2008 Quadric method for cutter orientation in five-axis sculptured surface machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48:788–801.
- Julian F. 1995 *STEP for data management, exchange and sharing*. Technology Appraisals Ltd; Great Britain.
- Jun, C.S., Kyungduck, C.Y., Shin, L. 2003 Optimising tool orientation for 5 axis machining by C-space search method. *Computer Aided Design* 35:549-566.

- Ko, T. J., Kim, H.S., Lee, S.S. 2001 Selection of the Machining Inclination Angle in High-Speed Ball End Milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17:163-170.
- Lee, Y.S., Choi, B.K., Chang, T.C. 1992 Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining. *International Journal of Production Research* 30:1447-1470.
- Lin, R.S., Koren Y. 2000 Ruled Surface Machining on Five-Axis CNC Machine Tools *Journal of Manufacturing Processes*, 2:25-35.
- Lo, C.C. 1999 Efficient cutter-path planning for five-axis surface machining with a flat-end cutter. *Computer-Aided Design* 31:557-566.
- Lozano, P.T. 1987 automatic planning of manipulators transfer movements. *Robot motions*. MIT Press 489-520.
- Mansour, S. 2002 Automatic generation of part programs for milling sculptured surfaces. *Journal of material processing technology* 127:31-39.
- Marshall, S., Griffith, G. 1992 A new cutter path construction technique for milling machines. *International Journal of Production Research* 33:1723-1736.
- Marciniak, K. 1987 Influence of surface shape on admissible tool positions in 5-axis face milling. *Computer-Aided Design* 19:233-236.
- Mortenson, M.E. 1985 *Geometric modeling*. John Willey and Sons inc. Newyork.
- Nan, W., Kai, Tang. 2008 Five-axis tool path generation for a flat-end tool based on iso-conic partitioning. *Computer Aided Design* 40:1067:1079.
- Paul, J. G., Fathy, I., Bedi S. 2004 Graphics-assisted Rolling Ball Method for 5-axis surface machining *Computer-Aided Design* 36:653-663.
- Paul, J., Sanjeev, B., Fathy, I. 2005 Arc-intersect method for 5-axis tool positioning. *Computer-Aided Design* 37:663-674.
- Paul J. G., Fathy, I., Bedi S. 2007 Arc-intersect method for 3 11/22 -axis tool paths on a 5-axis machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47:182-190.
- Piegl, L., Tiller, W. 1997 *The Nurbs Book*. Springer Publications. New York.
- Rao, N., Fathy, I., Bedi, S. 1997 Tool Path Planning For Five-Axis Machining Using The Principal Axis Method. *International Journal Of Machine Tool And Manufacture* 37:1025-1040.

- Sarıöz, E., 2005 Bilgisayar Destekli Gemi Dizaynı ve Üretimi Ders Notlari İstanbul Teknik Üniversitesi.
- SCRA. 2006 Step application handbook-ISO 10303-ver 3. SCRA Advance Tech. North Charleston.
- Sergey, A.I., Stanislav, S.M., Mud-Armeen, M., 2004 New numerical algorithms to optimize cutting operations of a five-axis milling machine. Applied Numerical Mathematics 49:395–413.
- Sheng, X., Hirsch B. 1992 Triangulation of trimmed surfaces in parametric space, Computer Aided Design 24(8):437-444.
- Sylvain, L., Christophe, T., Claire, L. 2008 Optimization of 5-axis high-speed machining using a surface based approach Computer Aided Design 40:1015-1023.
- Taejung K., Sanjay E.S. 2002 Toolpath generation along of maximum kinematic performance; a first cut at machine-optimal paths Computer aided design 34:453-468.
- Valentino, J.V. 2000. Introduction to Computer Numerical Control. Prentice Hall. Ohaio.
- Vickers, G.W. Quan K.V. 1989 Ball mills versus end-mills for curved surface machining Journal of Engineering Industry 111:6-22.
- Warkentin, A., Fathy, I., Bedi, S. 2000 Multi-point tool positioning strategy for 5-axis mashing of sculptured surfaces. Computer Aided Geometric Design 17:83–100.
- Weihang, Z., Yuan-Shin L. 2004 Five-axis pencil-cut planning and virtual prototyping with 5-DOF haptic interface Computer Aided Design 36:1295–1307.
- Young-Keun, C., Banerjee A. 2007 Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces International Journal of Machine Tools & Manufacture 47:689–696.
- Yu-Wen, S., Dong-Ming, G., Zhen-Yuan, J. 2006 Spiral cutting operation strategy for machining of sculptured surfaces by conformal map approach. Journal of Materials Processing Technology 180:74–82.
- Yu, W., Xiaowei T, 1999 Five-Axis NC Machining of Sculptured Surfaces. International Journal of advanced manufacturing technology 15:7-14.

EKLER

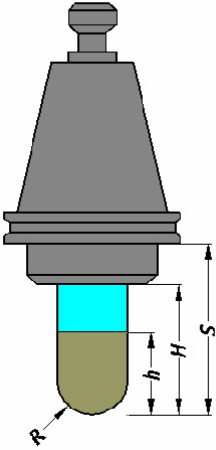
EK-A. “B-Spline Surface with knots” ögesi içeren örnek bir Step-AP 214 dosya formatı.

```
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION (( 'STEP AP214' ),
  '1' );
FILE_NAME ('xxx.STEP',
  '2008-08-01T13:27:05',
  ('ahmet'),
  ('sü'),
  'SwSTEP 2.0',
  'SolidWorks 2008',
  '' );
FILE_SCHEMA (( 'AUTOMOTIVE_DESIGN' ));
ENDSEC;
DATA;
#1 = B_SPLINE_SURFACE_WITH_KNOTS ('NONE', 3, 3, (
  (#3, #2, #4, #10, #5, #12, #11, #9, #8, #7, #6 ),
  (#27, #13, #18, #16, #28, #19, #20, #40, #15, #14, #17 ),
  (#39, #38, #45, #44, #43, #42, #41, #32, #31, #30, #29 ),
  (#37, #36, #35, #34, #33, #26, #25, #24, #23, #22, #21 ),
  (#107, #66, #46, #71, #77, #68, #67, #111, #110, #109, #108 ),
  (#70, #69, #49, #48, #47, #106, #105, #65, #64, #63, #62 ),
  (#76, #75, #74, #73, #72, #54, #53, #52, #51, #50, #61 ),
  (#60, #59, #58, #57, #56, #55, #92, #91, #90, #89, #88 ),
  (#87, #86, #85, #84, #83, #82, #81, #80, #79, #78, #104 ),
  (#103, #102, #101, #100, #99, #98, #97, #96, #95, #94, #93 ) ),
  .UNSPECIFIED., .F., .F., .F.,
  ( 4, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 4 ),
  ( 4, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 4 ),
  ( 0.00000000000000000000, 0.2155212274333137000, 0.2305463135074957700, 0.4045197922577249400,
  0.4077083539444982300, 0.7426387199303522400, 0.7580968589835224100, 1.000000000000000000 ),
  ( 0.00000000000000000000, 0.1336349832037847500, 0.2227015191871486400, 0.3086635672731938800,
  0.4749111762334956600, 0.6822127794371629600, 0.7351589948808878700, 0.8693260569950792500,
  1.00000000000000000000 ),
  .UNSPECIFIED. );
#2 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 5.780162769084116200, 160.0000000000000000, 0.1433597015236367200 ));
#3 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 0.00000000000000000000, 160.0000000000000000, -2.997117026008431900E-015 ));
#4 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 15.41275297086574100, 159.9999999999999700, 0.3822673778979063800 ));
#5 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 43.44178414153248000, 159.9999999999999700, -1.016527956225229800 ));
#6 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 129.4754493919020600, 160.0000000000000000, 4.577700871035874600E-015 ));
#7 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 123.8431476332010600, 159.9999999999999700, -0.3674823987307684300 ));
#8 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 112.4277978808947000, 159.9999999999999700, -1.111010497271683000 ));
#9 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 98.71524185128457400, 159.9999999999999700, -1.900988741244382900 ));
#10 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 28.74012143313809300, 159.9999999999999700, 0.1235914687008257000 ));
#11 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 81.66979348743760200, 159.9999999999999400, -2.702595296722309500 ));
#12 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 63.21938214139605300, 159.9999999999999700, -3.043989460204696000 ));
#13 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 5.791278558261239200, 149.3991114821925800, 5.581085697499525500 ));
#14 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 123.7030007995401100, 150.3835524995237700, -9.413925413756977900 ));
#15 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 112.0036243971775600, 150.2882492136344300, -9.600759045133394000 ));
#16 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 28.90521252594853200, 149.5903237105397900, 3.196296749394681200 ));
#17 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 129.4754493919020600, 150.4305756413627600, -9.321163654469989600 ));
#18 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 15.44239312452708100, 149.4792508342598000, 3.728231341182709700 ));
#19 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 63.05064760029047500, 149.8784878321123400, -6.465120083086692800 ));
#20 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 81.79706800724126500, 150.0319626146503000, -4.520819216193442200 ));
#21 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 129.4754493919020600, 119.2508881851692000, -32.11630683131461000 ));
#22 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 123.2900368193868000, 119.1625736022689400, -31.61007526882308500 ));
#23 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 110.7537326548132800, 118.9835836493821800, -30.58317697168818600 ));
#24 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 98.21187021567368400, 118.7688105646366000, -17.39256557481469700 ));
#25 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 82.17210175504165200, 118.5022494975782300, -6.991916213340065400 ));
#26 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 62.55344558820022600, 118.2140071369982200, -14.34650049847913100 ));
#27 = CARTESIAN_POINT ('NONE', ( 0.00000000000000000000, 149.3510228072407800, 6.692915386354856700 ));
```

```
#28 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 43.67524323823288800, 149.7131322710076800, 1.529606077531261700 ) );
#29 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 129.4754493919020600, 140.1940178110892200, -19.29215325828078400 ) );
#30 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 123.5530836139567200, 140.0966933039062500, -19.09104219853057000 ) );
#31 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 111.5498796123912100, 139.8994426530700500, -18.68237134673719500 ) );
#32 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 98.45126219991597300, 139.6627582466834100, -11.87212972941924800 ) );
#33 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 44.36316600650344100, 117.9034513800220900, 10.49141679116801000 ) );
#34 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 29.39167856298931300, 117.6728035251542900, 13.15994132184785700 ) );
#35 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 15.52973234945709700, 117.4641965636332200, 13.99982396608256300 ) );
.....
.....
.....
.....
#105 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 82.58800899735480500, 77.23506923965572900, -3.704432382844914200 ) );
#106 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 62.00205542949090900, 77.46465045234685900, -20.53083917325267600 ) );
#107 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.0000000000000000000, 107.0494233263014100, 31.82783787771963100 ) );
#108 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 129.4754493919020600, 108.0584539934332800, -36.26293016011703000 ) );
#109 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 123.1650634347615100, 108.0145026548042600, -35.71028320915874600 ) );
#110 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 110.3754836816207800, 107.9254250894445600, -34.58939410272277800 ) );
#111 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 98.09813521817318400, 107.8185394057210400, -18.60713046440236700 ) );
#112 = DIRECTION ( 'NONE', ( 1.00000000000000000, 0.00000000000000000, 0.00000000000000000 ) );
#113 = DIRECTION ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 0.00000000000000000, 1.00000000000000000 ) );
#114 = B_SPLINE_CURVE_WITH_KNOTS ( 'NONE', 3,
( #121, #133, #123, #122, #119, #118, #127, #126, #125, #124, #131 ),
.UNSPECIFIED., .F., .F.,
( 4, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 4 ),
( 0.00000000000000000, 0.1306739430049207500, 0.2648410051191121300, 0.3177872205628370400,
0.5250888237665043400, 0.6913364327268061200, 0.7772984808128513600, 0.8663650167962152500,
1.00000000000000000 ),
.UNSPECIFIED. );
#115 = AXIS2_PLACEMENT_3D ( 'NONE', #132, #113, #112 );
#116 = SHELL_BASED_SURFACE_MODEL ( 'NONE', ( #162 ) );
#117 = MANIFOLD_SURFACE_SHAPE_REPRESENTATION ( 'xxx', ( #116, #115 ), #130 );
#118 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 63.21938214139605300, 159.9999999999999700, -3.043989460204696000 ) );
#119 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 81.66979348743760200, 159.9999999999999400, -2.702595296722309500 ) );
#120 = ( LENGTH_UNIT ( ) NAMED_UNIT ( * ) SI_UNIT ( .MILLI., .METRE. ) );
#121 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 129.47544939020600, 160.0000000000000000, 4.577700871035874600E-015 ) );
#122 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 98.71524185128457400, 159.9999999999999700, -1.900988741244382900 ) );
#123 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 112.4277978808947000, 159.9999999999999700, -1.111010497271683000 ) );
#124 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 5.780162769084116200, 160.0000000000000000, 0.1433597015236367200 ) );
#125 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 15.41275297086574100, 159.9999999999999700, 0.3822673778979063800 ) );
#126 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 28.74012143313809300, 159.9999999999999700, 0.1235914687008257000 ) );
#127 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 43.44178414153248000, 159.9999999999999700, -1.016527956225229800 ) );
#128 = UNCERTAINTY_MEASURE_WITH_UNIT ( LENGTH_MEASURE ( 1.000000000000000100E-005 ), #120,
'distance_accuracy_value', 'NONE' );
#129 = ( NAMED_UNIT ( * ) SI_UNIT ( $, .STERADIAN. ) SOLID_ANGLE_UNIT ( ) );
#130 = ( GEOMETRIC_REPRESENTATION_CONTEXT ( 3 ) GLOBAL_UNCERTAINTY_ASSIGNED_CONTEXT ( (
#128 ) ) GLOBAL_UNIT_ASSIGNED_CONTEXT ( ( #120, #134, #129 ) ) REPRESENTATION_CONTEXT ( 'NONE',
'WORKSPACE' ) );
#131 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 160.0000000000000000, -2.997117026008431900E-015 ) );
#132 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 0.00000000000000000, 0.00000000000000000 ) );
#133 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 123.8431476332010600, 159.9999999999999700, -0.3674823987307684300 ) );
#134 = ( NAMED_UNIT ( * ) PLANE_ANGLE_UNIT ( ) SI_UNIT ( $, .RADIAN. ) );
#135 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 129.47544919020600, 160.0000000000000000, 4.577700871035874600E-015 ) );
#136 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 129.4754493919020600, 150.4305756413627600, -9.321163654469989600 ) );
#137 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 129.4754493919020600, 140.1940178110892200, -19.29215325828078400 ) );
#138 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 129.4754493919020600, 119.2508881851692000, -32.11630683131461000 ) );
#139 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 129.4754493919020600, 108.0584539934332800, -36.26293016011703000 ) );
#140 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 107.0494233263014100, 31.82783787771963100 ) );
#141 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 117.2233703602056400, 26.25275958100969100 ) );
#142 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 137.9596509982820000, 13.85242810497628300 ) );
#143 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 149.3510228072407800, 6.692915386354856700 ) );
#144 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 160.0000000000000000, -2.997117026008431900E-015 ) );
#145 = CARTESIAN_POINT ( 'NONE', ( 0.00000000000000000, 160.0000000000000000, -2.997117026008431900E-015 ) );
.
.
.
ENDSEC;
END-ISO-10303-21;
```

EK-B. Takım seçim sayfası arayüzü.

TAKIM SEÇİM SAYFASI



TOOL DIAMETER : D= 10

CUTTING LENGHT : h= 20

FULL LENGHT : H= 40

HOLDER LENGHT : S= 70

SPHERE RADIUS : R= 5

NUMBER OF TEETH z= 2

CUTTING SPEED (m/min) 20

FEED RATE (mm/dk) 100

SPINDEL SPEED (RPM) 1000

COOLANT: ON

Surface Analsis

Min. konkav (v)	30,1094887927618
Min. konkav (u)	26,0544985816258
Max. konkav (v)	3307065,482936
Max. konkav (u)	2387825,78459989
Min. konvex (v)	-20,9895272706704
Min. konvex (u)	-26,0544985814386
Max. konvex (v)	-2929174,23521963
Max. konvex (u)	-5074379225967,93
Patches	TOTAL PATCH 6x5=30
Degree (u)	4
Degree (v)	4

PREFERRED TOOLS

BALL (D) LESS THAN 52

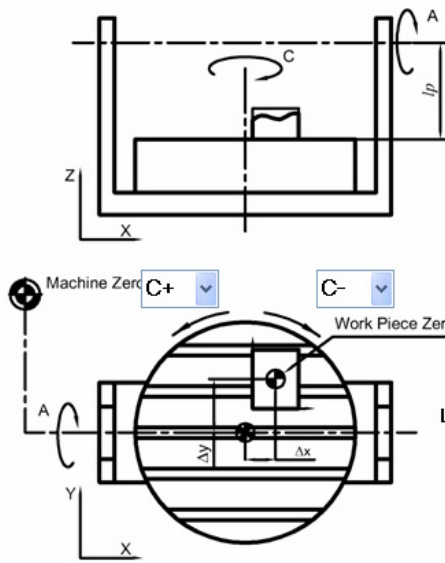
FLAT (D) LESS THAN 16

MINIMUM STURZ 17,8814613349

OK

EK-C. Makine konfigürasyonu arayüzü.

TOOL PATH MACHCONFIG



Machine Zero C+ C-

Work Piece Zero

DELTA X 125

DELTA Y 60

LENGHT PIVOT 150

A+ A-

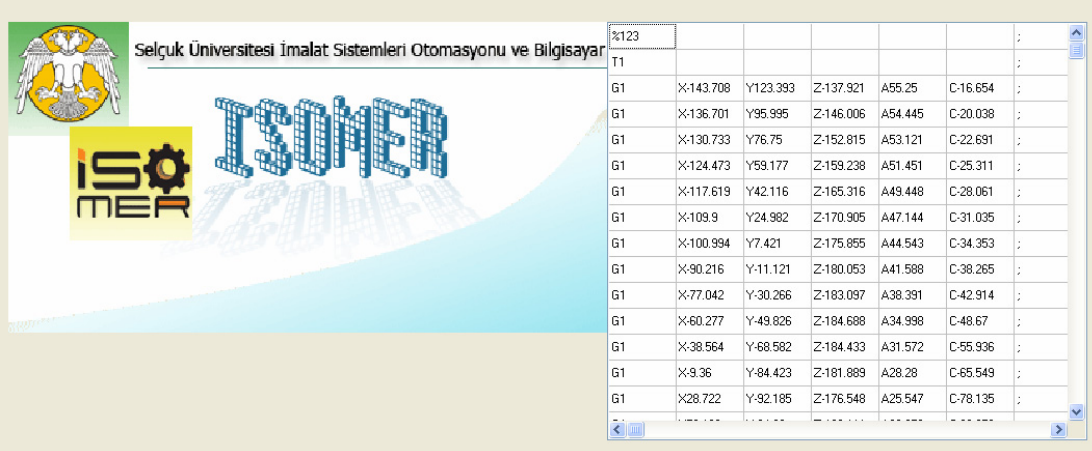
MAX 30 MAX -120

Z

X

Y

EK-D. NC kodlarının hücresel veri dosyasına aktarılması.

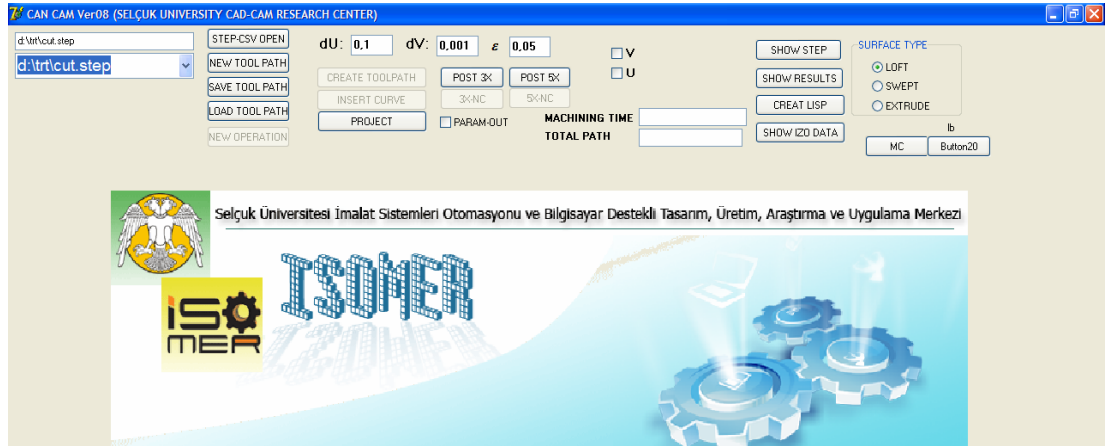


%123						
T1						:
G1	X-143.708	Y123.393	Z-137.921	A55.25	C-16.654	:
G1	X-136.701	Y95.995	Z-146.006	A54.445	C-20.038	:
G1	X-130.733	Y76.75	Z-152.815	A53.121	C-22.691	:
G1	X-124.473	Y59.177	Z-159.238	A51.451	C-25.311	:
G1	X-117.619	Y42.116	Z-165.316	A49.448	C-28.061	:
G1	X-109.9	Y24.982	Z-170.905	A47.144	C-31.035	:
G1	X-100.994	Y7.421	Z-175.855	A44.543	C-34.353	:
G1	X-90.216	Y-11.121	Z-180.053	A41.588	C-38.265	:
G1	X-77.042	Y-30.266	Z-183.097	A38.391	C-42.914	:
G1	X-60.277	Y-49.826	Z-184.688	A34.998	C-48.67	:
G1	X-38.564	Y-68.582	Z-184.433	A31.572	C-55.936	:
G1	X-9.36	Y-84.423	Z-181.889	A28.28	C-65.549	:
G1	X28.722	Y-92.185	Z-176.548	A25.547	C-78.135	:

EK-E. Beş eksen takım yolu için elde edilen örnek NC dosyası.

T1;
M3 S1250;
G1 X166.195 Y110.138 Z-71.527 A40.277 C-164.463 ;
G1 X162.596 Y129.792 Z-54.387 A43.485 C-169.815 ;
G1 X157.502 Y147.562 Z-37.843 A46.235 C-174.748 ;
G1 X150.415 Y165.148 Z-21.923 A48.394 C-179.746 ;
G1 X136.582 Y189.019 Z-6.828 A48.875 C-186.951 ;
G1 X111.317 Y218.18 Z5.19 A47.829 C-196.793 ;
G1 X90.978 Y234.323 Z7.343 A46.247 C-203.421 ;
G1 X69.086 Y247.041 Z6.109 A44.451 C-209.932 ;
G1 X44.715 Y256.994 Z2.53 A42.614 C-216.743 ;
G1 X17.289 Y263.98 Z-2.925 A40.865 C-224.095 ;
G1 X-13.352 Y267.245 Z-10.194 A39.292 C-232.139 ;
G1 X-45.682 Y265.991 Z-18.686 A38.087 C-240.632 ;
G1 X-78.941 Y259.758 Z-28.277 A37.33 C-249.598 ;
G1 X-109.76 Y249.407 Z-37.867 A37.159 C-258.306 ;
G1 X-137.114 Y236.193 Z-47.161 A37.544 C-266.551 ;
G1 X-159.727 Y221.884 Z-55.854 A38.351 C-273.942 ;
G1 X-178.047 Y207.517 Z-64.025 A39.443 C-280.491 ;
G1 X-192.948 Y193.446 Z-71.916 A40.727 C-286.364 ;
G1 X-204.748 Y180.36 Z-79.305 A42.088 C-291.458 ;
G1 X-214.247 Y168.18 Z-86.302 A43.455 C-295.896 ;
G1 X-221.978 Y156.857 Z-92.886 A44.756 C-299.725 ;
G1 X-228.539 Y145.944 Z-99.246 A45.963 C-303.093 ;
G1 X-234.312 Y135.2 Z-105.35 A47.029 C-306.026 ;
G1 X-239.733 Y124.167 Z-111.239 A47.912 C-308.572 ;
G1 X-245.379 Y112.129 Z-116.893 A48.547 C-310.74 ;
M30;

EK-F. Program ana menüsü



EK-G. Program takım yolu oluşturma menüsü

