



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK EKSENLİ FREZELEMEDE TAKIM AÇILARI
İLE FREZELEME YÖNÜ İLİŞKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

BURAK ŞEKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2020

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK EKSENLİ FREZELEMEDE TAKIM AÇILARI
İLE FREZELEME YÖNÜ İLİŞKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

BURAK ŞEKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

KAHRAMANMARAŞ 2020

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Burak ŞEKER



Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**ÇOK EKSENLİ FREZELEMEDE TAKIM AÇILARI İLE FREZELEME YÖNÜ
İLİŞKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BURAK ŞEKER**

ÖZET

Çok eksenli frezelemelerde; kesme yönü, kesme açısı, çevresel hız ve ilerleme hızı gibi bazı parametreler doğrudan takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve imalat maliyeti gibi faktörleri etkilemektedir. Bu nedenle, istenmeyen etkileri en aza indirmek için kesme parametrelerinin en uygun değerlerde belirlenmesi gerekir.

Bu çalışmada, AISI 4140 çelik malzeme, 3 mm çapında karbür küresel parmak freze ile 4 eksenli CNC tezgahı kullanılarak farklı kesme yönlerinde (aşağı ve yukarı) ve farklı kesme açılarında (eğilme ve yatma) bazı kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Takımlarda oluşan yan yüzey aşınma miktarları kesme işlemlerinin belirli periyotlarında dijital mikroskopla incelenerek ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda, kesilen paso sayısına göre aşınma miktarı değerleri kullanılarak aşınma grafikleri oluşturulmuş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok eksenli frezeleme, Küresel parmak frezeleme, Takım ömrü, Efektif çap, Frezeleme yönü, Eğilme ve Yatma açıları

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ağustos / 2020

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERMURAT
Sayfa sayısı: 61

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TOOL ANGLES AND MILLING
DIRECTION RELEATIONSHIP IN MULTI-AXIS MILLING**

**M.Sc. THESIS
BURAK SEKER**

ABSTRACT

In multi-axis milling; some parameters such as cutting direction, cutting angle, surface speed and feed rate directly affect factors such as tool life, surface roughness and manufacturing cost. Therefore, cutting parameters should be determined at optimum values in order to minimize unwanted effects.

In this study, some cutting operations were carried out in different cutting directions (up and down) and at different cutting angles (leading and tilting) using a 4-axis CNC machine with 3 mm diameter carbide ball end mill on AISI 4140 steel material. The amount of flank wear on the tools was measured by examining with a digital microscope at certain periods of the cutting processes. As a result of the measurements, wear graphs were created by using the wear amount values according to the number of cutting passes and were analyzed comparatively.

Anahtar Kelimeler: Multi-axis milling, Ball End Milling, Tool life, Effective diameter, Milling direction, Leading and Tilting angles

Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering, August /2020

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet ERMURAT

Page number: 61

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim süresi boyunca bilgi ve birikiminden yararlandığım, her zaman yanımda ve desteğini hiç eksik etmeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ermurat'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Mesleki deneyimleriyle katkı sağlayan ve fikirleri ile ışık olan çalışma arkadaşım Sayın Mak. Yük. Müh. Güçhan Taşlıalan'a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Deneyin yapım aşamasında maddi manevi desteğini esirgemeyen Aileme, Eşime ve Dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Burak ŞEKER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
EKLER LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. FREZELEME HAKKINDA GENEL BİLGİLER	3
2.1. Yukarı ve Aşağı Frezeleme	3
2.2. Küresel Frezeleme	4
2.3. Üç Eksenli Frezeleme	5
2.4. Çok Eksenli Frezelemede Eğilme ve Yatma Açıları	6
2.5. Efektif Çap ve Efektif Kesme Hızı	8
2.6. Takım ve Aşınma.....	11
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	14
4. MATERYAL VE METOD	21
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	30
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR.....	54
EKLER	56
ÖZ GEÇMİŞ.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 4.1. Deney değişken parametreleri.....	27
Çizelge 4.2. Deney sabit parametreleri	28
Çizelge 5.1. Deney değişkenleri ve kesilen malzeme miktarları	50



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. (a) Yukarı yönlü frezeleme, (b) Aşağı yönlü frezeleme.....	3
Şekil 2.2. Düz parmak freze	4
Şekil 2.3. Eğrisel ve karmaşık şekle sahip parça (İstanbul kalıp merkezi)	5
Şekil 2.4. Küresel parmak freze.....	5
Şekil 2.5. Beş eksenli CNC freze figürü	6
Şekil 2.6. (a) Eğilme Açısı (Lead Angle), (b) Yatma Açısı (Tilt Angle) N, takımın dik pozisyonunu (döner eksenleri 0 derece), F takımın ilerleme yönünü, C ise paso ilerlemesi yönünü gösterir.	6
Şekil 2.7. (a) 15 eğilme 40 yatma , (b) 15 eğilme -40 yatma	7
Şekil 2.8. Efektif çap şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.9. Efektif çapın 3 eksene göre gösterimi	9
Şekil 2.10. Efektif yarıçapın 15° eğilme açısına bağlı değişimi	9
Şekil 2.11. Efektif yarıçapın 30° eğilme açısına bağlı değişimi	10
Şekil 2.12. Kesici takımın aşınma aşınmaları	12
Şekil 2.13. Kesme hızının takım aşınmasına etkisi	13
Şekil 4.1 CNC dik işlem merkezi ve deney düzeneği	21
Şekil 4.2 Küresel takım	22
Şekil 4.3. 3 eksen frezeleme deneylerine ait kesme yönü grafikleri (a) Deney 1 (b) Deney 2	23
Şekil 4.4. A ekseni ile Eğilme (a-b) ve Yatma (c-d) açısı ilişkisi	24
Şekil 4.5. Aşağı yönlü frezeleme deneylerine ait oryantasyon ve kesme yönü grafikleri..... a) Deney 4, b) Deney 6, c) Deney 8, d) Deney 10.....	25
Şekil 4.6. Yukarı yönlü frezeleme deneylerine ait oryantasyon ve kesme yönü grafikleri. 26 a) Deney 3, b) Deney 5, c) Deney 7, d) Deney 9.....	26
Şekil 4.7. Dijital mikroskop düzeneği	28

Şekil 4.8. Dijital mikroskopla elde edilen küresel takımın kesici ucuna ait bir görüntü ve yan yüzey aşınma miktarı ölçümü	29
Şekil 5.1. Deney 1'e ait takım aşınma görüntüleri	30
Şekil 5.2. Deney 1'e ait takım aşınma miktarı grafiği.....	31
Şekil 5.3. Deney 2'ye ait takım aşınma görüntüleri	32
Şekil 5.4. Deney 2'ye ait takım aşınma miktarı grafiği.....	32
Şekil 5.5. Deney 3'e ait takım aşınma görüntüleri	34
Şekil 5.6. Deney 3'e ait takım aşınma miktarı grafiği.....	34
Şekil 5.7. Deney 4'e ait takım aşınma görüntüleri	36
Şekil 5.8. Deney 4'e ait takım aşınma miktarı grafiği.....	36
Şekil 5.9. Deney 5'e ait takım aşınma görüntüleri	37
Şekil 5.10. Deney 5'e ait takım aşınma miktarı grafiği.....	38
Şekil 5.11. Deney 6'ya ait takım aşınma görüntüleri	39
Şekil 5.12. Deney 6'ya ait takım aşınma miktarı grafiği.....	39
Şekil 5.13. Deney 7'ye ait takım aşınma görüntüleri	40
Şekil 5.14. Deney 7'ye ait takım aşınma miktarı grafiği.....	41
Şekil 5.15. Deney 8'e ait takım aşınma görüntüleri	42
Şekil 5.16. Deney 8'e ait takım aşınma miktarı grafiği.....	42
Şekil 5.17. Deney 8'e ait malzeme yüzeyinde biriken talaşların görüntüsü.....	43
Şekil 5.18. Deney 9'a ait takım aşınma görüntüleri	44
Şekil 5.19. Deney 9'a ait takım aşınma miktarı grafiği.....	44
Şekil 5.20. Deney 10'a ait takım aşınma görüntüleri.....	45
Şekil 5.21. Deney 10'a ait takım aşınma miktarı grafiği.....	46
Şekil 5.22. Bütün deneylerin paso sayısına göre takım aşınma miktarı grafiği	47
Şekil 5.23. Deneylerde gerçekleşen kesme miktarları.....	49
Şekil 5.24. Takımın aşınma ve kırılma bölgelerinin sembolik olarak gösterimi.....	51
Şekil 5.25. Kesilen malzemenin kesme bölgelerinin fotoğraf görüntüleri	51

EKLER LİSTESİ

Ek 1. Makine tanıtım sekmesi	56
Ek 2. Post seçim sekmesi.....	56
Ek 3. İşlemin 4 eksen olarak belirlenmesi.....	57
Ek 4. Divizörün hangi eksen üzerinde dönüş yapacağıın konumlandırılması.....	57
Ek 5. Takım arayüz sayfası.....	58
Ek 6. Devir arayüz sayfası.....	58
Ek 7. Kesim parametresi.....	59
Ek 8. Yapılan programlar	60

1. GİRİŞ

3 eksenli frezelemede freze takımı, ikisi yatay olmak üzere 3 doğrusal eksen (X,Y ve Z) hareket ederek kesme işlemi gerçekleştirilir. 3'ten fazla olan frezelemelerde ise bu 3 eksene ek olarak bu eksenlerin dönme eksenini vazifesini yaptığı döner eksenler (A,B ve C) devreye girer. 3 eksenden fazla hareket kabiliyetine sahip olan CNC tezgahları, üreticinin belirlemiş olduğu özelliklere göre farklı eksen konfigürasyonuna sahiptir. Mesela 5 eksenli frezeleme işlemlerinde 3 adet doğrusal eksenlerin yanı sıra 2 adet döner eksen vardır. Döner eksenler hangi doğrusal eksen üzerinde dönme vazifesi yapıyorsa ona göre adlandırılır. Mesela Şekil 2.3'te gösterilen 5 eksenli CNC tezgahının X,Y ve Z olan doğrusal ve A ve C olan döner eksenleri bulunmaktadır.

Döner eksenlerin kullanılması frezeleme işlemlerinde alışkanlıkların dışına çıkmayı gerektiren davranışlar gözlenir. Örneğin freze takımının kesme hızına (çevresel hız) bağlı olarak doğrusal hareket eden ve dairesel hareket eden eksenlerin ilerleme senkronizasyonunun sağlanabilmesi için döner eksenin hareketinin doğrusal eksenin hareketine nazaran çok hızlı veya çok yavaş hareket etmesi gerekebilir. Hatta yine döner eksenin tersine hareket etmesi gerekebilir. Bu, eksen kinematiği ile ilgilidir.

Diğer yandan döner eksenlerin önceden konumlandırılması ile takım ile iş parçası arasında oluşan takım açılarının (eğilme ve yatma açıları) frezeleme yönünü dahi değiştirme durumları söz konusu olmaktadır. Mesela küresel frezeleme ile aşağı yönlü frezeleme yaparken negatif eğilme açısı gerçekte (yanal ve düşey kesme adım miktarına bağlı olarak) yukarı yönlü frezeleme ile kesim yapmaktadır. Bu da kesme işleminde yüzey pürüzlülüğü, kesim kalitesi ve takım aşınması konularında beklenmedik sonuçların alınmasına neden olmaktadır.

Çok eksenli frezelemelerde özellikle serbest form yüzeyler küresel takımlar kullanılır. Küresel takımla frezelemede eksenden bağımsız bir problem bulunmaktadır. Bu da farklı kesme derinliklerinde kesme işlemi gerçekleştirilirken, devir ve ilerleme hesaplarının belirleyicisi olan çap miktarının değişiklik göstermesidir. Efektif çap olarak adlandırılan ve takımın çapına ve kesme yüksekliğine bağlı olan bu çap değeri çok eksenli frezelemede eğilme ve yatma açılarına göre de değişikliğe uğrar. 3 eksenli frezelemede küresel takımda yaşanan efektif çap problemi çok eksenli frezelemede efektif çapın daha fazla değişiklik gösterebilmesi ve frezeleme yönlerinin de değişebilmesi bakımından çok eksenli frezelemeyi karmaşık hale getirmektedir.

Çok eksenli talaşlı imalat yöntemleri önem derecesi; bil hassa havacılık, otomotiv, kalıpçılık ve biyomedikal endüstrileri vb. parçaların yüzeylerinin karmaşık olduğu sektörlerde oldukça artmıştır. Çok eksenli frezeleme işlemi gerçekleştiren işleme merkezlerinin sayılarının artması ve sanayide kullanımının giderek yaygınlaşması bu gibi konularda çalışmayı gerektirmekte ve optimum yüzey kalitesi ve minimum takım aşınması için önemli derecede yer işgal etmektedir.

Bu çalışmanın amacı; 5 eksenli frezelemede takım açıları ile frezeleme yönü ilişkisinin deneysel olarak incelenmesi, yapılan inceleme neticesinde takımın sahip olduğu eğilme ve yatma açılarının frezeleme yönü bakımından değerlendirilmesi, ayrıca 3 eksenli frezeleme şartlarında gerçekleştirilen frezeleme ile karşılaştırılması gerçekleştirilecektir. Bu deneysel çalışmalar esnasında kesme derinliği dikkate alınarak takımın efektif çapı göz önünde bulundurulacaktır. Çok sayıda yapılacak deneylerde deney şartlarının aynı olmasının sağlanması için düzlemsel açılı yüzeylerin frezelenmesi gerçekleştirilecektir. Frezeleme esnasında belirli pasolar arasında kesme işlemleri durdurularak takım dijital mikroskop kamera ile incelenerek takım aşınma bölgesi ve miktarı incelenecek ve bu aşınmanın miktarı ve tipi değerlendirmeye tabi tutulacaktır.

2. FREZELEME HAKKINDA GENEL BİLGİLER

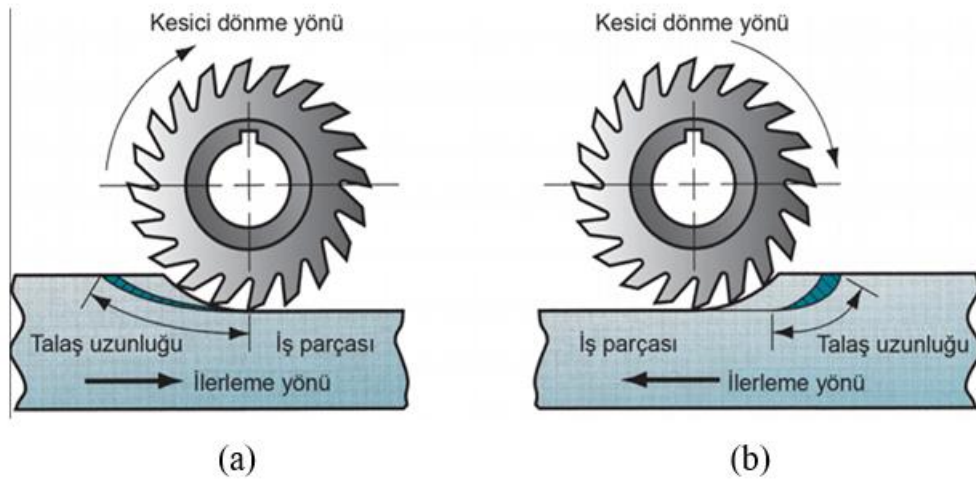
Frezeleme, çok sayıda kesme kenarı olan bir kesici takımın döndürülerek iş parçası üzerinden talaş kaldırarak gerçekleştirilen bir imalat metodudur. Frezelemede, iş parçası tabla üzerine sabitlenmiştir ve herhangi bir dönme hareketine sahip değildir. Döndürülen kesici takımla iş parçasının birbirine göre doğrusal veya dairesel bağıl hareketi neticesinde kesici takım iş parçasından farklı miktarlarda talaş kaldırıp uzaklaştırarak farklı geometrilerde parça oluşturulacak şekilde kesme işlemi gerçekleştirilmiş olur.

2.1. Yukarı ve Aşağı Frezeleme

Kesme yönü bakımından yukarı yönlü frezeleme ve aşağı yönlü frezeleme olmak üzere iki tür frezeleme vardır.

Yukarı yönlü frezelemede kesme işlemi, talaşın minimum kalınlığından başlayıp maksimum kalınlığında sonlanır. Kesici takımın dönüş yönü ile ilerleme yönü zıt yönlü olduğu için ters yönlü frezeleme olarak da adlandırılır. Ayrıca bu yöntem eskiden beri kullanıldığı için de geleneksel frezeleme olarak da adlandırılır (Groover, 2015).

Aşağı yönlü frezelemede ise kesme işlemi, talaşın maksimum kalınlığından başlayıp minimum kalınlığında sonlanır. Kesici takımın dönüş yönü ile ilerleme yönü aynı yönlü olduğu için eş yönlü frezeleme olarak, kesici dişlerin malzemenin dış kısmından batarak talaş kaldırdığı için de tırmanma frezeleme olarak da adlandırılır (Groover, 2015). Şekil 2.1’de yukarı ve aşağı yönlü frezeleme yöntemleri şematik olarak gösterilmiştir.



Yukarı yönlü frezelemede, her bir kesici ucun oluşturduğu talaş çok ince başlayıp giderek kalınlaştığı için talaşın malzemeden uzaklaştırılması işlemi, malzemenin soymaya çalışılmasına benzetilmiştir ki sürtünmenin fazla olmasından dolayı takımın ısınması ve aşınması daha fazla gerçekleşir. Ayrıca, takımla iş parçasının hareketi birbirine zıt yönlü olmasından dolayı bu kesme yönteminde hem talaşın kalınlığı ince ancak boyu uzundur hem de takımın kesici ucu iş parçası içerisinde daha fazla zaman geçirmesi nedeniyle de sürtünmenin fazla olmasına neden olur. Sürtünmenin fazla olması, takım ömrünü negatif yönde etkiler. Diğer yönden takım iş parçasını tabla üzerinden çekmeye çalışacağından dolayı, iş parçasını tutmak için daha fazla bağlama kuvveti gerekir. Yüzey pürüzlülüğünün kötü olduğu bu kesme yönteminde kesme esnasında çıkan talaşlar tekrar kesme bölgesine taşınarak kesme kalitesini negatif yönde etkileyebilir, hatta takımın zarar görmesine de neden olabilir.

Aşağı yönlü frezelemede ise kesici takımın dönme yönü ile ilerleme yönü aynı yönlü olmasından dolayı kesici uç parça içerisinde daha az zaman geçirir. Bundan dolayı talaş daha kalın ancak boyu daha kısadır. Bu da sürtünme miktarının daha az olmasına neden olur. Kesici uç, parçaya dışarıdan batarak kesme yaptığı için soyma davranışı oluşmaz, dolayısıyla talaş ısısı takıma çok fazla geçmez. Çıkan talaşların tekrar kesme bölgesine ulaşması ihtimali yoktur. Bu nedenlerden dolayı yukarı yönlü frezelemeye nazaran aşağı yönlü frezelemede daha az takım aşınması ile daha iyi yüzey pürüzlüğü ve kesme kalitesi elde edilir (Groover, 2015)

2.2. Küresel Frezeleme

Düzlemsel yüzeylerin frezelenme işlemlerinde kullanılan kesici takımlar, düz parmak freze olarak adlandırılan alın kısmı düz olan helisel kesme kenarına sahip kesici takımlardır. 2.2.'de gösterilen düz parmak frezelerle sadece düzlemsel yüzeylere sahip, alın yüzey, yan duvar, düz kanal ve cep frezeleme gibi işlemler gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.2. Düz parmak freze

Eğrisel yüzeylere sahip ve kalıp gibi karmaşık parçaların imalatında ve aerodinamik özellikteki yüzeylerin işlenmelerinde ise küresel uçlu parmak frezeler kullanılmaktadır (Özcan ve ark., 2003). Şekil 2.3.'te bu duruma örnek bir resim verilmiştir.



Şekil 2.3. Eğrisel ve karmaşık şekle sahip parça (İstanbul kalıp merkezi)

Küresel parmak frezeler de düz parmak frezeler gibi helisel kesme kenarına sahip olmakla birlikte alın kısımları komple küresel kavise sahiptir.



Şekil 2.4. Küresel parmak freze

2.3. Üç Eksenli Frezeleme

Üç eksenli frezelemede; freze takımı, iki tanesi yatay olmak üzere üç doğrusal eksen (X, Y ve Z) hareket ederek kesme işlemi gerçekleştirilir. Üç eksenenden fazla olan frezelemelerde ise bu üç eksene ek olarak bu eksenlerin dönme eksenini vazifesini yaptığı döner eksenler devreye girer. Beş eksenli frezeleme işlemlerinde ise üç adet doğrusal eksenlerin yanı sıra iki adet de döner eksen vardır. Bu döner eksenlerin yardımı ile açılı yüzeyler, takımın 3 ekseninde ulaşmasının mümkün olmadığı derin eğrisel yüzeyler veya negatif bölgeye sahip kompleks parçaların işlenmesi mümkün hale gelir. Buna örnek olarak Şekil 2.5'de görünen CNC freze tezgahında bağlı işlemesi zor olan parçaya ulaşması mümkün hale gelmiştir. Şekil 2.5'de görünen CNC freze tezgahında üç tanesi doğrusal eksen (X, Y ve Z), iki tanesi de döner eksen (B ve C) olmak üzere; toplamda beş ayrı eksen bulunur. B eksenini X doğrusal eksenini etrafında, C eksenini ise Z doğrusal eksenini etrafında oluşan döner eksenlerdir. Şekilde B ve C döner eksen hareketleri divizör üzerinde

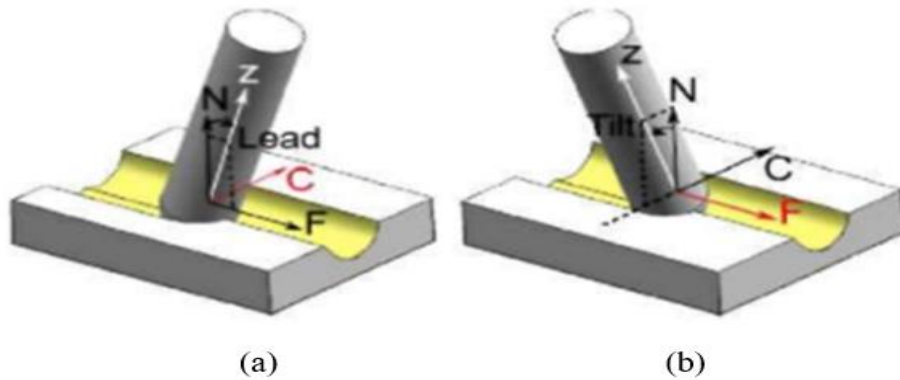
hareket yapmaktadır. Her iki döner eksenin kafada veya tablada gerçekleştirildiği tezgah konfigürasyonları da bulunmaktadır. Bu üreticinin, tezgahın hitap edeceği sektöre göre gerçekleştirdiği tasarıma göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.5. Beş eksenli CNC freze figürü (Bilgen, 2016)

2.4. Çok Eksenli Frezelemede Eğilme ve Yatma Açıları

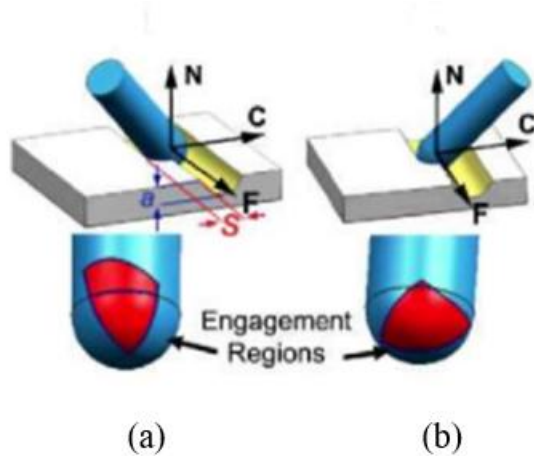
Beş eksenli frezelemede kesici doğrusal eksen haricindeki ilave hareketleri iki döner eksenlerdir. Kesici takımın oryantasyonu, takım eksenini ve yatay pozisyondaki tablanın dikeyi arasında ölçülen eğilme ve yatma açıları ile tanımlanır. Bu açılar kesici takımın istenilen açıya sahip olabilmesi için ilerleme yönüne bağlı olarak döner eksenlerin pozisyon alması ile oluşur. Eğilme açısı, takımın ilerleme yönüne doğru veya ilerleme yönünün gerisine doğru açılı bir pozisyon almasıdır. Yatma açısı ise takımın ilerleme yönü doğrultusu ekseninde sağa veya sola yapmış olduğu açıdır. Diğer bir deyişle yatma açısı ilerleme doğrultusu ekseninden takımın açı yapması iken eğilme açısı ise ilerleme doğrultusuna dik doğrultu ekseninde (paso ilerlemesi yönünde) takımın açı yapması olarak da tanımlanabilir. Şekil 2.6-a'da eğilme açısı, Şekil 2.6- b'de ise yatma açısı gösterilmiştir.



Şekil 2.6 (a) Eğilme Açısı (Lead Angle), (b) Yatma Açısı (Tilt Angle) N, takımın dik pozisyonunu (döner eksenleri 0 derece), F takımın ilerleme yönünü, C ise paso ilerlemesi yönünü gösterir. (Öztürk ve ark., 2009)

Takımın ilerleme yönüne doğru eğilmesi pozitif (+) eğilme, geriye doğru eğilmesi ise negatif (-) eğilme olarak adlandırılırken, ilerleme yönü doğrultusunda sağa doğru yatması pozitif (+) yatma, sola doğru yatması ise negatif (-) yatma olarak adlandırılır.

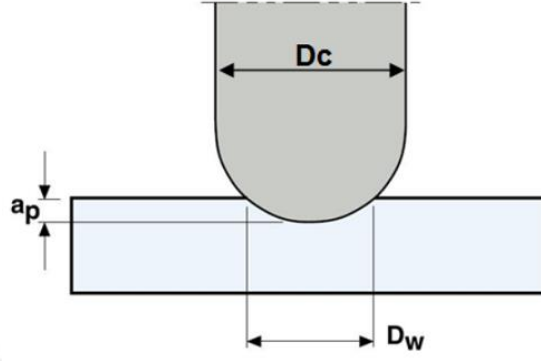
Kesme derinliğinin takımın küresel bölgesinin gerçek yarıçap değerini aştığı durumlarda malzemeden tek seferde ve aynı paso şartlarında çıkartılan talaş miktarında dahi değişiklik olurken, yarıçap değerinden düşük olduğu durumlarda aynı paso şartlarında çıkartılan talaş miktarı gerek 3 eksen için gerekse farklı kombinasyonlardaki eğilme ve yatma açılara sahip 5 eksenli frezeleme için aynı olmaktadır. Her ne kadar aynı miktarda paso miktarı kaldırılacak olsa da malzeme ile takım arasındaki etkileşim bölgesinde farklılıklar oluşacaktır. Etkileşim bölgesindeki bu farklılıklar kesici takımın hangi açı ile (yani takımın kesici uçlarının hangi kısmının kesmesi ile) talaş kaldıracığını belirler ki takımın aşınma davranışını belirleyen önemli bir etkidir. Bu olay frezeleme yönü bakımından incelendiğinde ise farklı eğilme ve yatma açılarında olması gerekenden çok farklı kesme yöntemi davranışı gösterecektir. Takımın her farklı eğilme ve yatma açılarında farklı davranış göstermesi tam kanal kesiminde bile geçerli iken ardışık pasolarla yapılan yanal frezelemede daha fazla oranda geçerli olacaktır. Söz konusu bu durum Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Şekilde, ardışık pasolarla ve aynı eğilme ve farklı yatma açılarında yapılan kesme işlemi esnasında takım ile malzemenin anlık temas bölgeleri gösterilmiştir. Her iki şekilde de 15° pozitif eğilme açısı kullanılmış, (a)’da 40° (pozitif) yatma açısı (b)’de ise -40° (negatif) yatma açısı kullanılmıştır. Aynı yatma açısı miktarının farklı yönlerde kullanılması ile takımların çalışan bölgeleri de ayrıca gösterilmiştir.



Şekil 2.7. (a) 15° eğilme 40° yatma , (b) 15° eğilme -40° yatma (Öztürk ve ark.2009)

2.5. Efektif Çap ve Efektif Kesme Hızı

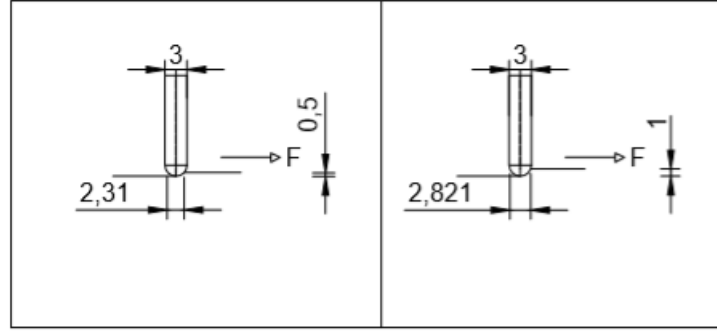
Efektif sözcüğünün birçok anlamı olmasına rağmen kelime manası olarak geçerli, gerçek anlamlarına gelen bir kelimedir. Efektif çap olarak adlandırılan ve küresel takımın çapına ve kesme yüksekliğine bağlıdır. Küresel bir takımın, yarıçapından daha düşük bir kesme yüksekliğinde sahip olduğu gerçek çap, Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Efektif çap şematik gösterimi (Koca, 2008)

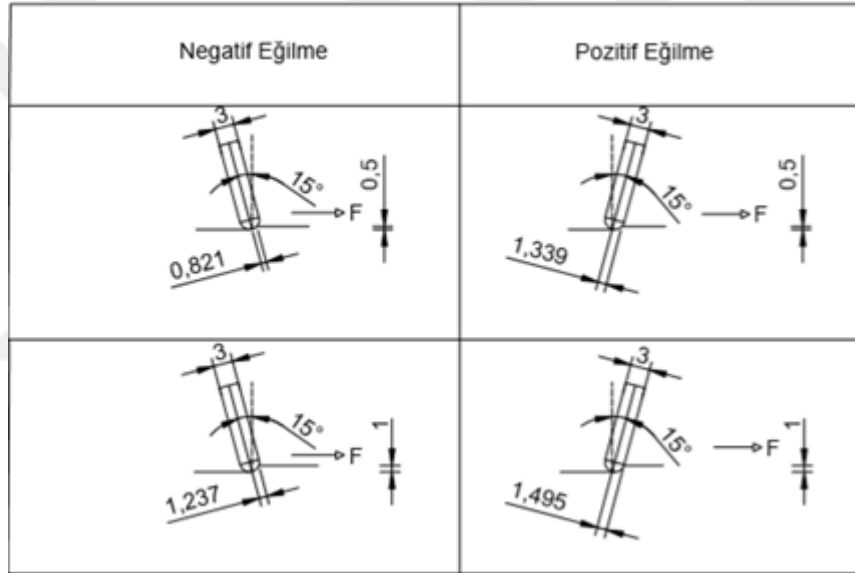
Şekil 2.8’de D_w Efektif çapı, a_p talaş derinliğini, D_c ise Küresel Takım çapını ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında, Autocad programı kullanılarak yapılan efektif yarıçap ve efektif çap gösterimi iki boyutlu olarak ifade edilmiştir. Efektif çap çok eksenli frezelemede yine kesme derinliğine bağlı olmak üzere eğilme ve yatma açısı miktarına göre de değişikliğe uğrayabilir. Buna göre; Şekil 2.9’da dik konumdaki (3 eksenli durum) takımın efektif çap gösterimi verilmektedir. Şekil 2.10 ve şekil 2.11’de ise takımın farklı açılardaki efektif çap gösterimi verilmiştir. Çapı 3mm olan küresel parmak freze takımın dik konumda çalışırken 0,5mm ve 1mm talaş derinliği için ölçülen efektif çaplar farklıdır. Bunun neticesinde talaş derinliği arttıkça, efektif çap da artmıştır. Efektif çaplardaki değişkenlikler çevresel hızı etkiler. Normalde çevresel hız sabit tutulmak istendiğinde farklı derinliklerde kesme işlemi gerçekleştirilmek istendiğinde efektif çapa göre farklı ilerleme hızları kullanılmak durumundadır. Ancak, farklı derinliklerde aynı iş mili devri kullanılırsa, düşük efektif çapa sahip derinliklerde çevresel hız düşük olurken yüksek efektif çapa sahip derinliklerde çevresel hız yüksek olacaktır. Bu da takımın derinlik farkından dolayı farklı bölgelerde aşınma gerçekleşmesine neden olmasının yanısıra aşınma davranışında da farklılık oluşturacaktır.



Şekil 2.9 Efektif çapın 3 eksene göre gösterimi

3 mm çapındaki küresel parmak freze kullanıldığında, 0,5mm ve 1mm talaş derinliklerinde ve 15°negatif ve pozitif eğilme (veya yatma) durumlarında efektif yarıçaplarda yaşanan değişim Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Efektif yarıçapın 15° eğilme açısına bağlı değişimi

Yine 3mm küresel parmak freze kullanıldığında, 0,5mm ve 1mm talaş derinliklerinde ve 30° negatif ve pozitif eğilme (veya yatma) durumlarında efektif yarıçaplarda yaşanan değişim Şekil 2.11’de gösterilmiştir.

Negatif Eğilme	Pozitif Eğilme

Şekil 2.11. Efektif yarıçapın 30° eğilme açısına bağlı değişimi

Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de gösterilen şekiller eğilme için çizilmiş ve F değeri bakımından eğilmeye yönelik çizimler olmakla birlikte söz konusu açılarla parçanın ilişkisi bakımından yatma için de geçerli çizimlerdir. Çizimlerdeki açılar yatma olarak okunmak istediği durumda F yönü çizime dik pozisyonda olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Şekil 2.9’da 3 eksenli frezeleme durumunda talaş derinliğinin artması efektif çapı artıran önemli bir unsur olduğu gösterilmişti. Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de ise farklı eğilme ve yatma pozisyonlarının ve açı değerlerinin de farklı efektif çap değerleri oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 2.10 ve Şekil 2.11 birlikte değerlendirildiğinde, eğilmenin veya yatmanın pozitif yönde olması, negatif yöne göre daha fazla efektif çap oluşturduğu görülmektedir.

Diğer yandan kesme derinliğinin artması da (Şekil 2.9’da olduğu gibi) efektif çapı ayrıca artıran bir etken olmaktadır.

Şekil 2.9, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11 birlikte değerlendirildiğinde ise negatif eğilme veya yatma, dik durumdan daha düşük bir efektif çap, pozitif eğilme veya yatma ise daha büyük bir efektif çap oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu etki farklı derinliklerde benzer sonuçlar vermektedir.

Efektif çapın değişmesi, kesici takımının aşınma bölgelerini değiştirir. Efektif çap küçük ise takımın uç kısmı aşınmaya uğrar. Efektif çap büyük ise tam çapa yakın bölgeden aşınma meydana gelir.

Şekil 2.11’de görüldüğü üzere; takım normal eksenenden 30° negatif eğilme ve 30° pozitif eğilme yaparak efektif yarıçaplar, açığa bağlı olarak değişim göstermiştir. Buna göre eğilme veya yatma açısının artması da efektif çapta değişiklik meydana getirmektedir. Kesici takımın yapmış olduğu derinlik ve açılar ile takımın farklı bölgesinin çalıştığı da görülmüştür.

Efektif kesme hızı; bil hassa ball nose-tam küre- solid karbür veya takma uçlu frezelerin talaş kaldırma sırasında; talaş derinliğine bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde artan veya azalan gerçek kesme hızıdır (Koca, 2008).

2.6. Takım ve Aşınma

Kesme takımları, talaşlı imalat operasyonlarının temel taşıdır. Talaşlı imalat sırasında oluşan aşırı güçler ve aşırı sıcaklıklar takımlarda istenmeyen durumlar oluşturur. Kesme kuvveti çok yüksek olursa, takım kırılır. Diğer yandan kesme sıcaklığı çok artarsa, takım malzemesi yumuşar ve işlevini yerine getiremez. Takımda kırılmaya ve yumuşamaya neden olan yüksek kesme kuvveti ve sıcaklık artışı olmaz ise kesici takım sürekli bir doğal aşınmaya uğrar ve sonunda kesme işlemini yerine getiremez duruma düşer (Groover,2015).

Takımların talaş kaldırma işlevini yerine getirememesi üç nedenden dolayıdır. Bunlar; Kırılma (çatlama), Sıcaklık bozulması, Sürekli aşınma

Takımdaki sürekli aşınma; talaş yüzeyi ve takım yan yüzeyi olmak üzere 2 bölgede meydana gelir. Bu aşınma bölgelerinin alt tanımları aşağıda yapılmıştır. Buna göre;

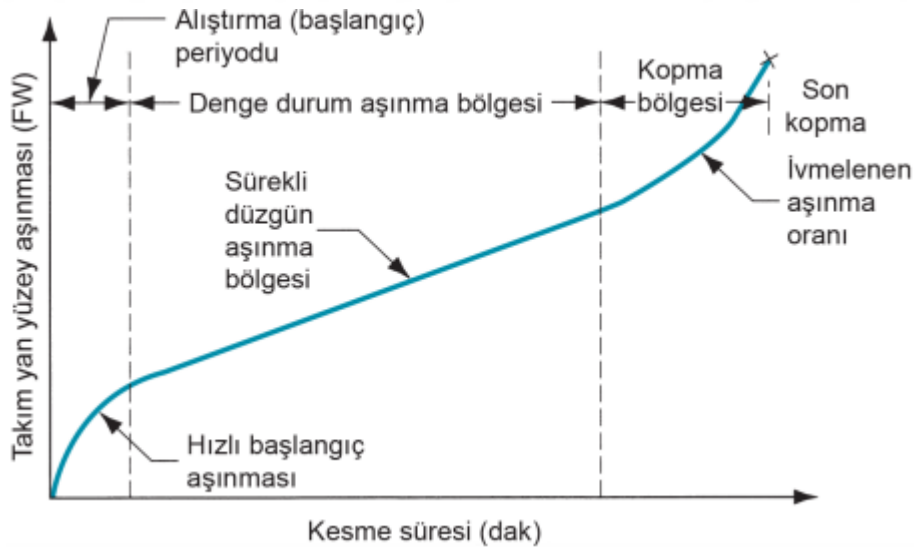
- Krater aşınması; Takımın talaş yüzeyinde krater (boşluk, oyuk) şeklinde meydana gelir ve kesme sırasında ortaya çıkan talaşın, yüzey üzerinde kayması ile büyür.
- Yan yüzey (yanal) aşınması; Takımın boşluk açısının verildiği yan yüzeyinde meydana gelir. Yan yüzey aşınması kesme kesici kenara bitişik yan yüzey ve kesme esnasında parçanın talaş kaldırılan yeni yüzeyin arasında oluşan sürtünme sonucu oluşur.
- Çentik aşınması; Kesilen iş parçasının orjinal yüzeyinin soğuk çekme veya talaşlı imalat sonucu ortaya çıkan sertleşmelerden, döküm sırasında parça yüzeyinde kalan kum taneciklerinden ya da başka nedenlerden dolayı parçanın iç kesimine göre daha sert ve aşındırıcı olmasından kaynaklanır.

- Burun yarıçap aşınması; Yan yüzey aşınması ayrıca takım ucunun yardımcı kesici kenara doğru olan bölgede görülür ve uç (burun) yarıçap aşınması olarak adlandırılır.

Talaş kaldırma prosesi esnasında takım ile işlem yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı ısı meydana gelir. Meydana gelen ısının bir kısmı talaş ile giderek parçadan ve takımdan uzaklaşır. Geri kalan kısmı da parçaya ve takıma geçerek parçanın ve özellikle takımın ısınmasına neden olur.

Kesici takım işleme başladığı andan itibaren aşınma sürecine girmiş olur. Aşınma arttıkça kesici kuvvetler de artar; daha çok ısı ortaya çıkar ve bunun sonucunda aşınma hızlanır. Aşınma belli bir noktadan sonra, takımın kesici uçlarının kullanılamaz hale gelmesine neden olur.

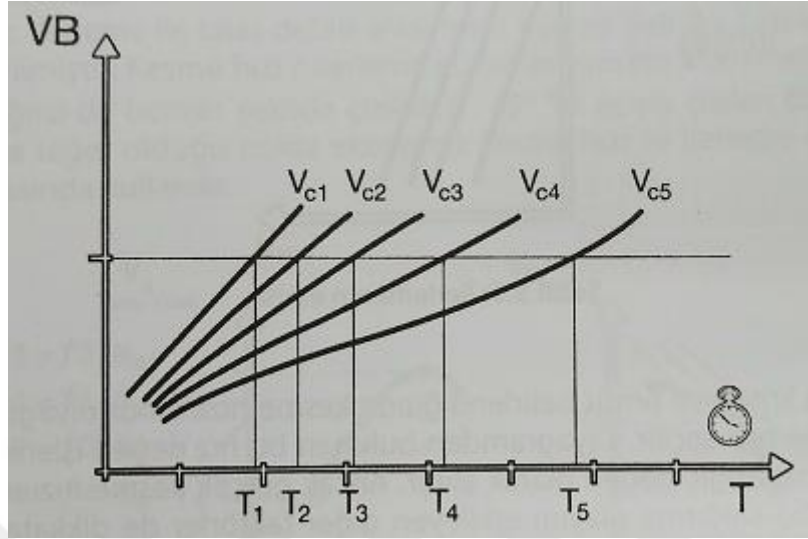
Kesici takımın aşınma aşamaları Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Toplamda 3 bölgeden oluşan takımın aşınmasında, 1.bölge takımın hızlı bir aşınma davranışı gösterdiği hızlı başlangıç aşınması olarak adlandırılır. 2.bölge takımın zamana bağlı olarak kararlı bir şekilde aşınma davranışı gösterdiği ve aşınma bakımından denge durumunda olduğu sürekli düzgün aşınma bölgesi ve 3.bölge ise aşınmada artışın yaşandığı ve sonunda takımın kırılıp kopması ile sonuçlanan kopma bölgesi olarak adlandırılır.



Şekil 2.12. Kesici takımın aşınma aşamaları (Gülmez T., 2020).

Aşınma ile kesme hızı arasında da önemli bir ilişki bulunmaktadır. Şekil 2.13’te Aşınma (VB) / Zaman (T) diyagramı verilmiştir. Bu diyagrama göre, takım aşınmasının her zaman doğrusal olması beklenemez. Aşınma eğrisinin başlangıçta orta hızlarda seyretmesi, daha sonra ise ani bir artış söz konusudur. Eğrinin şekli kesme hızına bağlıdır

ve her bir hız için farklı aşınma eğrileri çizilebilir. Şekle göre, düşük kesme hızları için aşınmanın daha yavaş meydana geldiği, yüksek kesme hızları için ise genellikle daha hızlı bir aşınmanın söz konusu olduğu gözlenmektedir (Çakır, 2006).



Şekil 2.13. Kesme hızının takım aşınmasına etkisi (Çakır, 2006)

Küresel takımla işlemede gerek takımın çapı, paso derinliği ve genişliğine gerekse eğilme/yatma açısı miktarına ve yönüne bağlı olarak efektif çap olarak adlandırılan farklı çaplar söz konusu olmaktadır. İş mili devrinin sabit tutulduğu durumlarda farklı efektif çap işlemlerinde farklı kesme hızları elde edilmesi kaçınılmazdır. Nitekim, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de sadece eğilme ve yatma yönlerinin farklılığı ile farklı efektif çaplar elde edildiği gösterilmiştir. Buna göre pozitif yönlü eğilme ve/veya yatma açılarının negatif yönlü eğilme ve/veya yatma açılara oranla (diğer parametreler sabit kalmak kaydıyla) daha yüksek kesme hızlarına sahip olduğu Denklem 2.1’den anlaşılmaktadır.

$$V_c \text{ (m/dk)} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Buradan hareketle, yüksek efektif çap sonucunu doğuran eğilme/yatma yönlerindeki kesme işlemlerinde düşük efektif çap sonucunu doğuran eğilme/yatma yönlerindeki kesmeye nazaran daha erken aşınma yaşanacağı beklenmelidir.

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Öztürk çalışmasında; küresel uçlu takımın kullanıldığı 5 eksen freze işlemleri için bir kuvvet modeli geliştirmiştir. 5 eksen frezeleme için, kesme kuvvetlerinden dolayı oluşan kesici takım esnemeleri de formüle edilmiştir. Kesme kuvvetleri için geliştirilen modelin tahminleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak ve doğrulanmıştır (Öztürk, 2005).

Tunç ve Budak çalışmalarında; 5 eksen frezeleme proseslerinin benzetimi ve en iyilemesi yapıldı. Geometrik modelleme için kullanılan parametreler, belirlenen takım yolu dosyasından elde edilmiştir. Bu parametreler kullanılarak takım ve parça kesişim sınırları, eğilme-yatma açıları gibi kesme koşullarının hesaplanması anlatılmıştır. Bu değerler mevcut bir kuvvet modeline uygulanıp frezeleme kuvveti benzetimi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kesme kuvveti açısından kesme parametrelerinin en uygun değerleri belirlenmiştir. Hesaplanan en iyi değerler deneysel sonuçlarla teyit edilmiştir. (Tunç ve Budak, 2006).

Tunç çalışmasında, küresel uçlu takımlar kullanılarak 5 eksenli frezeleme işlemleri için tam bir geometrik model sunulmuştur. Geliştirilen model, belirli bir takım yolu boyunca kesme kuvvetlerini simüle etmek için mevcut 5 eksenli bir işlem modeliyle entegre edilmiştir. Ayrıca, yatma ve eğilme açısı çiftinin proses mekaniği üzerindeki etkisi araştırılmıştır ve çeşitli koşullar altındakilerin optimize edilip değerleri belirlenmiştir. Diğer yandan, düzenli serbest biçimli yüzeyler için kaba işleme ve ince talaş işleme operasyonları için çeşitli işleme stratejileri arasında en uygun stratejiyi öneren bir model sunulmuştur. Geliştirilen modeller deneylerle doğrulandı ve uygulamalar karmaşık yüzeylerde gösterildi (Tunç, 2006).

Öztürk ve ark. çalışmalarında; öncelikle takım ucu temasının yüzey kalitesi üzerine etkilerini araştırılmıştır. Bunun sonucunda, takım açısı ve kesme derinliğinin temas yüzeyi ile ilişkisi incelenerek, istenmeyen temastan kaçınmak için koşullar belirlenmiştir. Bu doğrultuda oluşturulan model deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır (Öztürk ve ark.2009).

Öztürk çalışmasında; 5-eksenli küresel uçlu frezeleme prosesleri için geometri, kuvvet ve kararlılık modelleri sunmaktadır. Eğilme ve yatma açılarının işlem geometrisi, kesici ve iş parçası kesişim limitleri, yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri üzerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, 5-eksen küresel uçlu frezeleme işleme için takım esnemeleri/şekil hataları ve kararlılık limitleri hesaplanmıştır. Minimum kesme kuvvetleri veya maksimum kararlılık limitlerine sebep olan eğilme ve yatma açıları seçimi için sunulan modelin ne şekilde kullanılacağı gösterilmiştir. Kesme kuvvetleri, şekil hataları ve

kararlılık limitleri için model kullanılarak tahmin edilen değerler deneylerle karşılaştırılmış ve deney sonuçlarıyla teyit edilmiştir (Öztürk, 2010).

Boz çalışmasında; serbest yüzey geometrileri olan parçaların 5-eksen küresel frezeleme işlemlerinde sanal talaşlı imalat simülasyon modeli sunulmuştur. 5-eksen frezeleme kinematiği 3-eksen frezeleme kinematiğinden farklılıklar göstermektedir. Bu sebepten, 5-eksen takım tezgahlarının kinematik model tasarımı yapılmıştır ve değişken ilerleme hızlarını destekleyen genel geçer bir son-işlemci (postprocessor) geliştirilmiştir. Diğer yandan, NC (nümerik kontrol) kodlarından takım tezgahının hareketlerini simüle edebilen bir sanal makine simülasyonu modeli sunulmuştur. Talaşlı imalatta kesme kuvvetleri ön görüşü iş parçası ile takımın temas bölgesini belirleyerek yapılmıştır. Bu bilgi, işlenmiş parçadan takım eksenini boyunca ayırık diskler için giriş ve çıkış açıları şeklinde ifade edilmektedir. 5-eksen küresel frezeleme için takım iş parçası temasını bulabilmek için ayırık modellemeye dayalı bir takım-iş parçası temas modeli (Three-Orthogonal Dexelfield) geliştirilmiştir. Bu modelin neticeleri katı model tabanlı takım-iş parçası teması modeli ile karşılaştırılmıştır. 5-eksen küresel frezeleme süreçlerinde kuvvet ön görüşü yapabilen bir model ortaya çıkarılmıştır. Kesme kuvveti modellemesi sabit eksen takımı (tabla tipi dinamometre) ve döner eksen takımı (döner eksenli dinamometre) için yapılmıştır. Ortaya konulan bu model modüler olup farklı iş parçası geometrileri, takım hareketleri fazladan bir analize gerek kalmadan bu modele dahil edilebilmektedir. Çalışmada birden fazla gerçekleştirme testi sunulmuş olup, gerçekleştirme testleri göstermiştir ki ortaya konulan model hesaplama açısından verimlidir ve kuvvet ön görüşleri deneysel verilerle iyi bir uyum sağlamıştır (Boz, 2010).

Özkırmırlı çalışmasında; kesici takımın üç boyutlu nokta bulutu şeklinde tanımlandığı, sayısal mekanik ve dinamik proses modeli geliştirilmiştir. Herhangi bir karmaşık form takımını kolaylıkla modellemek için takımların geometrik bilgileri CAD verilerinden elde edilmiştir. Bununla beraber, değişken ve dalgalı kesici kenar formları düşünülerek, kesici kenarların geometrik değişkenlikleri de modele göre güncellenebilmektedir. Takım-iş parçası çakışma bölgeleri geliştirilen Boolean kesişim modeliyle bulunmaktadır. Ek olarak, geliştirilen mekanik model Z-haritalama yöntemiyle birleştirilerek uzun değişken işlemler esnasında kesme kuvvetleri hesaplanmış ve testlerle teyit edilmiştir. Süreç dinamiği yönündense, önceden geliştirilmiş tek frekansa dayalı kararlılık modeli olası bütün takım geometrilerini kapsayacak şekilde geliştirilmiştir. Ortaya konulan süreç modeli yapılan mekanik kesme ve kararlılık analiz testleriyle teyit edilmiş ve kullanılabilirliği kanıtlanmıştır (Özkırmırlı, 2011).

Lazoğlu ve ark. çalışmalarında; karmaşık serbest biçimli yüzeylere sahip parçaların beş eksenli işlemede kesme kuvvetlerinin tahmini için yeni ve genel bir yaklaşım sunmuştur. Kesici ve parça arasındaki etkileşim simülasyonları, son zamanlarda geliştirilen bir sınır temsil yöntemi ile tam olarak takım yolu boyunca gerçekleştirilir. Ayrıca, beş eksenli frezeleme mekaniği için matematiksel model, karmaşık serbest biçimli yüzeylere sahip herhangi bir katı parça modeli için geliştirilmiştir. Teorik simülasyonlar ve deneysel doğrulamalar, karmaşık serbest form yüzeylerinin beş eksenli işlemesi için kesme kuvvetlerinin hızlı ve hassas bir şekilde tahmin edildiğini göstermektedir (Lazoğlu ve ark., 2011).

Boz ve ark. çalışmalarında; 5 eksenli küresel frezeleme kesme kuvveti tahmini için bir kesme kuvveti modeli sunmuştur. Kesici-iş parçası bağlantısı, geliştirilmiş katı modelleyici taban modeli ile çıkarılır. Önerilen modelin doğrulaması, pervane göbeği takma takımlarına uygulanmıştır. Doğrulama testinin sonucu ve simülasyonla ayrıntılı karşılaştırması makalede sunuldu (Boz ve ark., 2011).

Cao ve ark. çalışmalarında; eğim açısını dikkate alınarak kuvvet katsayılarının belirlenmesi için yeni bir deneysel yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde, herhangi bir kesme koşulunda kesme açılarına göre modellenir. Gradisek ve arkadaşlarının araştırmasına dayanarak, oluklu deneysel yöntemin aksine, kesme elemanının bir küresel uçlu freze kenarı üzerindeki konumu yaklaşık olarak kesme kuvveti katsayılarını etkileyen tek faktör olarak kabul edilmiştir.

Kesme kuvveti katsayılarının sırasıyla yeni yöntem ve kanal açma yöntemine göre hesaplanması için deneyler yapılmıştır. Sonuçlar; son frezeleme de, kuvvet katsayılarının belirlenmesi için yeni deneysel yöntemin, yarıklı deney yönteminden daha iyi olduğunu gösterilmiştir (Cao ve ark., 2011).

Layegh ve ark. çalışmalarında; 5 eksenli şekillendirilmiş yüzey frezeleme işlemi mekanik olarak modellendi ve aynı oranda kaldırılan malzeme hacmi için yatma ve eğilme açısının kesme kuvvetleri, kesme torku ve kesme enerjisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı eğilme ve yatma açılarında deneysel testler yapıldı ve sonuçlar doğrulanmıştır (Layegh ve ark., 2012).

Tüysüz ve ark. çalışmalarında; Bu makale talaş kalınlığı dağılımını ve kesme ve girinti mekaniğini modelleyerek besleme (x), normal (y) ve eksenel (z) yönlerindeki kesme kuvvetlerini tahmin eden bir mekanik model sunmuşlardır. Buna göre kesme kuvvetleri yaygın olarak bilinen kesme mekaniği modellerine dayanmıştır. Kesme kenarının çalışma malzemesine girmesi, pozitif veya negatif eğim açısına sahip sert bir kesici takım kenarı

tarafından preslenen çalışma malzemesinin elasto-plastik deformasyonu dikkate alınarak analitik olarak modellenmiştir. Talaş kalınlığının ve girinti bölgesinin geometrisinin dağılımı, takım yolu boyunca aletin beş eksenli hareketi dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Önerilen model, dalma girintisinde ve ayrıca serbest biçimli yüzeylerin üç ve beş eksenli küresel uçlu frezelemede deneysel olarak doğrulandı. Eksenel (z) kesme kuvvetlerinin tahmininin, önerilen girinti modeli küresel uçlu frezeleme mekaniğine entegre edildiğinde önemli ölçüde iyileştirildiği gösterilmiştir (Tüysüz ve ark., 2012).

Poyraz ve ark. çalışmalarında; titanyum alaşımlı bir blisk parçası için 5 eksen kaba frezeleme sırasında oluşan kesme kuvvetleri, yazılım yardımıyla hesaplandı. Elde edilen sonuçlar neticesinde ilerleme değerleri optimizasyonu gerçekleştirildi ve kesme kuvvetleri zamana bağlı olarak dengelendi. Optimizasyon uygulanmış takım yollarından makine kodları oluşturularak deneyler yapılmıştır ve anlık kesme koşulları, takım durumu izleme sistemleri ile gözlemlenmiştir. Çevrim dışı benzetim ve eş zamanlı takım durumu izleme sistemi ile elde edilen grafikler karşılaştırılmıştır. Son aşamada adaptif geri beslemeli kontrol uygulanarak kesme deneyleri tekrar edilmiştir. Çalışma neticesinde, titanyum blisk parçalarının 5 eksen kaba frezeleme üretim zamanları ve freze takım aşınmaları önemli ölçüde azaltılmıştır (Poyraz ve ark., 2014).

Scippa ve ark. çalışmalarında; sabitleme, araç ipucu dinamikleri ve malzeme sökme etkilerini dikkate alarak sapmaları azaltmak için optimize edilmiş, kesme hızını tanımlamaya izin veren sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayanan kapsamlı bir frezeleme işlemi planı yaklaşımına genel bir bakış sunulmuştur. Buna göre, önerilen modelin önceki çalışmalara göre avantajları şunlardır: (1) Bir CAM paketleri tarafından üretilen G kodunu içe aktarmak için kesintisiz bir arayüz sağlamıştır. (2) CAM tarafından sağlanan araç ipucu konumunu göz önünde bulundurarak karmaşık iş parçalarının hesaplamalı olarak etkili bir model süperpozisyon frekansı tepki analizi gerçekleştirmiştir. (3) Değişen geometrisinden dolayı işleme sırasında iş parçasının doğrusal olmayan davranışını öngörmüştür. (4) Hem takım ipucu dinamikleri hem de yerel iş parçası model davranışını dikkate alarak iş mili hızını takım yolu boyunca otomatik olarak ayarlanmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliği deneysel olarak doğrulanmıştır (Scippa ve ark., 2014).

Bilgen çalışmasında; çok eksenli talaşlı imalat operasyonlarında, döner eksenlerin ilerleme hızlarını, eksenlerin maksimum ivme ve sarsım limitleri dâhilinde tekrar düzenleyerek daha kaliteli yüzeylere sahip parçaların imalatını mümkün kılacak yeni bir tasarım sunmuştur. Deneyler ve testler sonucunda elde edilen maksimum hız, ivme ve sarsım değerleri algoritmaya verilerek algoritmanın takım eksen değişkenlerini, eğilme ve

yatma açılarını, işlem süresini azaltmak ve parça yüzey kalitesini arttırmak için tekrar hesaplamasına imkan verilmiştir (Bilgen, 2016).

Shan ve ark. çalışmalarında; İlk olarak, küresel uçlu frezelemede kesme kuvveti ile takım eğim açısı arasındaki ilişki teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak oluşturulmuştur. İkinci olarak, alet eğim açısının ince cidarlı parçaların elastik deformasyonu üzerindeki etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Son olarak, doğrulama deneyi 4 eksenli bir CNC takım tezgahında gerçekleştirildi ve paslanmaz çelik test iş parçalarının deformasyon değerleri bir koordinat ölçüm makinesi (CMM) ile ölçülmüştür. Sonuçlar, alet eğim açıları 15° veya 45° olduğunda, hem freze kuvvetinin hem de test iş parçalarının deformasyonunun en küçük olduğunu görülmüştür (Shan ve ark., 2016).

Geng ve ark. çalışmalarında; deformasyonun temel nedenlerini analiz ederek işleme çatışmalarını keşfetti ve olası problem çözme yönleri anlamına gelen buluş ilkelerini almıştır. Sonrasında, bu makale ile işleme çatışmalarına dayanan madde-alan modellerini oluşturuldu ve olası problem çözme yolu anlamına gelen ilgili standart çözümleri alınmıştır. Neticesinde standart çözümlerin ve bir buluş prensibinin kombinasyonu, aralarındaki anlamsal benzerliğin hesaplanmasıyla seçilip, standart çözümlerin ve buluşun prensibinin bu kombinasyonu, çözme yönünü ve çözme yolunu gösteren kavramsal çözüm olarak kabul edilmiştir. Son olarak, kavramsal çözüm kullanılarak işleme prosesinin optimize edilmiş ve çok yönlü bir çözümü önerilmiştir. Optimize edilmiş işleme işlemi, karmaşık ince duvarlı parçanın bir işleme örneği ile doğrulanmıştır. (Geng ve ark., 2016).

Altıntaş ve Chao çalışmalarında; takım yolu boyunca gereksiz yerlerden kaçınarak takım eksen yönlerinin otomatik olarak ayarlanmasını sunmuşlardır. Küresel uçlu frezelemenin proses mekaniği ve dinamikleri kesici-iş parçası bağlantı koordinat sisteminde model sunmaktadır. Takım ve iş parçasının yapısal dinamikleri, takım yolu ve takım tezgahının kinematikleri dikkate alınarak kesici-iş parçası bağlantı koordinatlarına dönüştürüldü. 5 eksenli küresel uçlu frezelemenin stabilitesi her takım yolu konumunda modellenip, taşıma serbest takım eksen yönlemleri, olup açma sınırlarından kaçınırken Nyquist kriteri kullanılarak tekrarlı olarak aranmıştır. Takım yolu, yani kesici konum (CL) dosyası, parçaların gereksiz hareketlerden kaçınarak, 5 eksenli küresel uçlu frezelemesi sağlayacak şekilde güncellenmiştir. Önerilen algoritma 5 eksenli küresel uçlu kesme testlerinde deneysel olarak kanıtlanmıştır. (Altıntaş ve Chao, 2016).

Long ve ark. çalışmalarında; çok cepli yapı Kirchhoff plakalarının bir kombinasyonu olarak kabul görmüştür. Bu ince duvarlı yapının titreşimi için yarı analitik

çözümler, önceden yazarlar tarafından önerilen alt alan ayrıştırma yöntemi ile elde edilmiştir. Sonrasında, kesme kuvvetinin modellenmesi için kesme konumu ve titreşim durumlarına ilişkin dinamik bir kesme modeli belirlenmiştir. Hem titreşim modeli hem de dinamik kesme modeli, ince duvar frezeleme işlemi için dinamik özellikleri tamamen dikkate alan yönetim denklemini oluşturmak için birbirine entegre edilmiştir. Yarı statik hipoteze dayanarak, ince duvarlı yapının frezelenmesinin stabilitesi, bir dizi ayırık noktada kesmenin stabilitesi olarak kabul edilip, bu yarı cidarlı kesme işleminin stabilitesini analiz etmek için yarı ayrıklaştırma yöntemi uygulanmıştır. Kritik kesme derinliğinin, her bir mod için mod şekli karesiyle uygun şekilde ters orantılı olduğu bulunmuştur. Ek olarak, çoklu modun etkisi ve kesim stabilitesi üzerindeki mod birleştirme etkileri tartışılmaktadır.

İnce duvarlı yapının frezeleme işlemleri için dinamikler ve stabilite hakkında daha net bilgi verilmiştir. (Long ve ark., 2017).

Lotfi ve ark. çalışmalarında; 5 eksenli küresel uçlu frezelemede, 3 eksenli frezelemenin parametrelerine ek olarak, yatma ve eğilme açıları olan iki önemli parametre vardır. Birleşme bölgesini ve talaş kalınlığını etkiler ve kesme kuvvetlerini değiştirirler. Gerçek diş yörüngesine ve işleme yüzeyi geometrilerine dayanarak, bu makale kesici iş parçası katılımı (CWE) bölgesi ve anlık büyük ölçüde şekillendirilmiş çip kalınlığı ve küresel parmak frezelerinin yeni bir analitik modelini sunmuştur. Modeli doğrulamak için bir mekanik kuvvet modeli kullanılmıştır, simülasyon ölçülen modelle karşılaştırıldı ve aralarında iyi bir anlaşma kanıtlanmıştır. (Lotfi ve ark., 2018).

Li ve ark. çalışmalarında; ince duvarlı parçaların beş eksenli flank frezelemede iş parçasının hem esnek hem de ince parmak frezenin deformasyonlarından kaynaklanan boyutsal yüzey formu hatalarını tahmin etmek için bir yöntem önermiştir. Parmak frezesi dirsekli bir giriş olarak modellenmiştir. İnce cidarlı parçanın sertliği, metal çıkarıldıkça ve alet parçası temas konumu değiştikçe değişir. İnce cidarlı parçanın zamana göre değişen sertliği, sadece ilk iş parçasının FE modeline ihtiyaç duyan ve her bir kesici konumunda parçanın yeniden birleştirilmesini önleyen etkin bir yapısal sertlik modifikasyonu yöntemiyle tahmin edilmiştir. Kesme kuvvetleri, hem kesme takımı hem de geçme bölgesindeki parça üzerine dağıtılır ve deformasyonların daldırma üzerindeki etkisi hesaplanmıştır. Aletin radyal salgısının etkisi talaş kalınlığında, dolayısıyla kesme kuvveti tahmininde dikkate alınmıştır. Son olarak, kesici ve iş parçası tanımlarının bitmiş kısımda kalan yüzey hatalarını tahmin ettiği düşünülmektedir. Önerilen yöntem beş eksenli bıçak frezeleme deneylerinde ispatlanmıştır. (Li ve ark., 2018).

Zhu çalışmasında; beş eksenli flank frezelemede deformasyon hatalarını takım yolu optimizasyonu açısından telafi etmek için kapsamlı bir yöntem sunulmuştur. İlk olarak, işlenmiş yüzey, öngörülen takım ve iş parçası deformasyonlarının kesici zarf yüzeyine basılmasıyla oluşturulmuştur. İkinci olarak, tasarım yüzeyindeki numune noktalarından makine yüzeyine işaretli mesafeler, işleme hatası değerlendirmesi için hesaplanmıştır. Yüzeysel hataların, takım tarafından algılanan düzeltmelere göre değişimlerini karakterize eden farklı artışları olmuştur. Son olarak, önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için beş eksenli bıçak frezeleme deneyleri yapılır.

Sonuç olarak esnek bıçakların sabit frezelemede işleme deformasyonlarının neden olduğu yüzey hatalarının, geliştirilen algoritma kullanılarak büyük ölçüde azaltılabileceğini öngörülmüştür. (Zhu, 2019).

Bu çalışmada, küresel takımla yapılan çok eksenli operasyonlarda gerek takımın efektif çapında yaşanan değişiklik, gerek takımın aşınma bölgesinde yaşanan değişiklik ve gerekse yukarı ve aşağı frezeleme mantalitesinde yaşanan fiziksel değişimlerin takımın yanal aşınmasında yaşattığı değişiklikler deneysel olarak incelenmiştir.

4. MATERYAL VE METOD

Çok eksenli frezelemede takım açıları ile frezeleme yönü ilişkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney; “Şekermaksan” isimli firmada, 4 eksenli CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1 de CNC dik işlem makinesi ve deney düzeneği gösterilmiştir. CNC dik işlem makinesinin üç adet doğrusal eksen (X,Y,Z) ve buna yardımcı bir adet döner eksen (A) ile birlikte toplamda dört adet eksen bulunur. Dik işleme merkezinin tabla ölçüleri X 1200mm - Y 600mm - Z 600mm’dir.



Şekil 4.1. CNC dik işlem merkezi ve deney düzeneği

Bütün deneylerde aynı özellik ve kalitede küresel uçlu takımlar kullanılmıştır. Küresel takımlar 3mm çap ve iki kesici uçlu karbür kaplamalı özelliklere sahiptir. Takımların tam boyu 38mm olup helis boyu 12 mm’dir. Bütün takımlar pens tipi tutuculara tutturulmuştur. Her bir deney için ayrı ayrı takım sıfırı alınmış, ayrıca mikroskop görüntüleri arasında odaklama farklılıklarının oluşturacağı hataları minimuma indirebilmek için bağlama boyu 16.20mm olarak sabit tutulmuştur. Toplamda 10 farklı deney için, on adet aynı seri üretilen (KSKF203038) hiç kullanılmamış, “Karcan” marka küresel uçlu takım kullanılmıştır, Şekil 4.2.



Şekil 4.2. Küresel takım

Çalışmada iş parçasının malzemesi AISI 4140 çelik olarak kullanılmıştır. Bu malzemenin kullanılmasının nedeni; orta sertlikte bir mekanik özelliğe sahip olduğu için daha kısa sürede takım aşınması gerçekleşeceğinden, kısa sürelerde deney sonucunun görülmek istenmesidir.

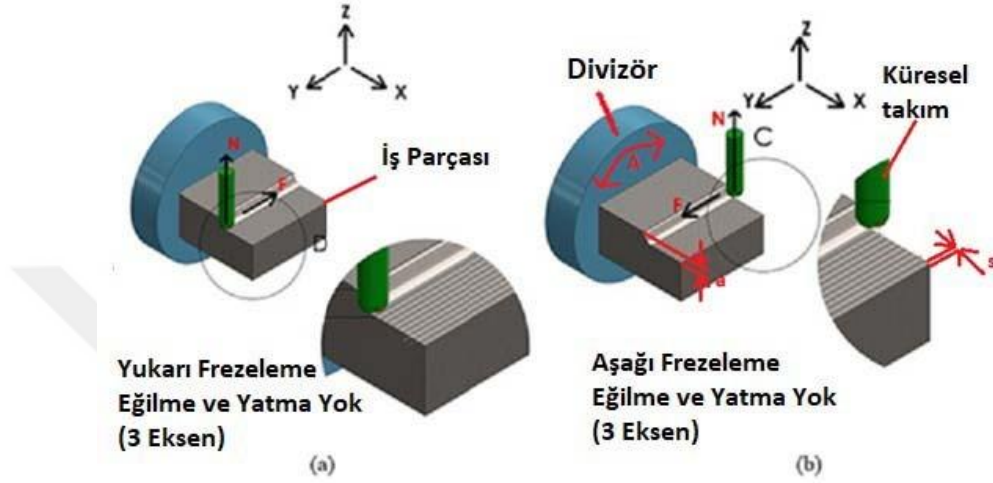
Deneyde kullanılan AISI 4140 çelik malzemeye ısıtılarak sertliği rockwell sertlik ölçme cihazında ölçülerek malzemenin 35 HRC sertliğinde olduğu belirlenmiştir. İlk olarak uygun şekilde tesviye edilen silindirik şekilli AISI 4140 çelik CNC dik işlem tezgahının divizörüne bağlanmıştır. İşlenecek yüzeyin düzgün bir yüzey olması için, parçanın her iki karşılıklı kısmı (A0 ve A180 pozisyonlarında) düz tarama kafaları kullanılarak frezelenmiştir. Elde edilen bu frezelenmiş yüzeyler deneylerde kesme yüzeyleri olarak kullanılmıştır. Kesimlerin aynı şartlar altında olabilmesi için malzeme üzerine, takımların kesmeye başladığı ilk pasoya giriş yerlerine farklı bir takım ile kanallar açılmıştır.

Çok eksenli frezelemede takım açıları ile frezeleme yönü ilişkisini incelemek için, 10 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerin değişken parametreleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Gerçekleşen her bir deneyde, diğer kesme parametreleri aynı kalmak suretiyle yalnızca kesme yönleri ve kesme açısı tipleri değiştirilerek; bu durumun takım üzerine olan etkisi irdelenmiştir. Deneylerin modelinin anlaşılması için her bir deney; “Solidworks” programı ara yüzünde üç boyutlu olarak modellenmiş, yön ve açı bilgileri konfigüre edilerek 3 boyutlu görüntüleri çıkartılmıştır.

Buna göre;

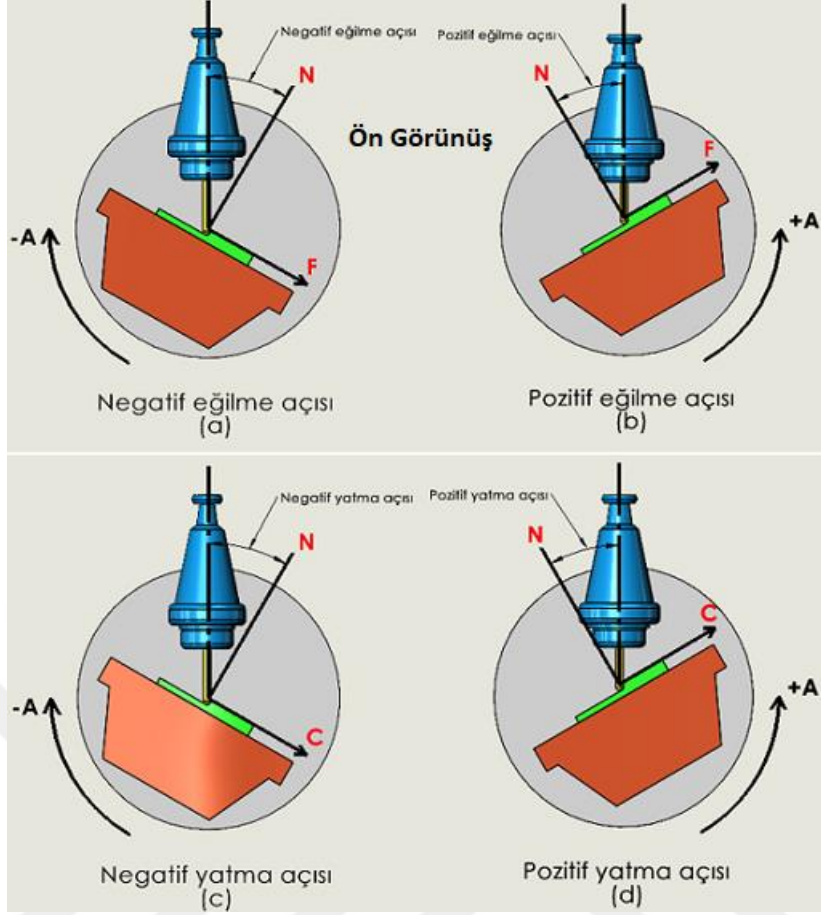
Şekil 4.3’te takımın 3 eksen oryantasyonunda yukarı ve aşağı yönlü yapılan kesme işlemleri gösterilmiştir. Takımın 3 eksen oryantasyonu herhangi bir eğilme veya yatma açısı kullanılmadan kesim yapması anlamına gelmektedir. Yani A ekseni olan divizör 0°

konumundadır. Şekil 4.3-a'da yukarı frezeleme Şekil 4.3-b'de ise aşağı frezeleme oryantasyonu gösterilmektedir. Şekiller üzerindeki a ölçüsü kesme derinliğini (paso derinliği), S ise kesme genişliğini (paso genişliği-yanal adım) göstermektedir. Bu iki değer 5 eksenli oryantasyonların gösterildiği diğer şekillerde de aynı olmakla birlikte tekraren gösterilmemiştir. Diğer yandan N iş parçası yüzeyinin dik doğrultusunu, F takımın ilerleme yönünü temsil etmektedir.



Şekil 4.3. 3 eksen frezeleme deneylerine ait kesme yönü grafikleri (a) Deneysel 1 (b) Deneysel 2

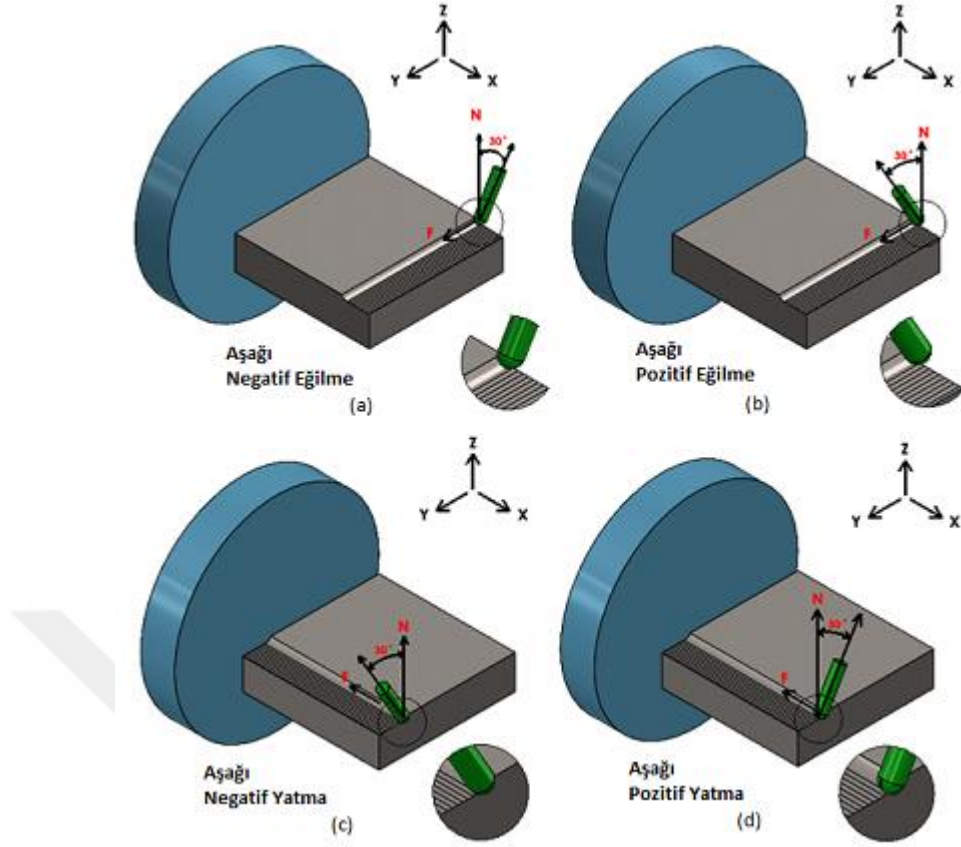
Diğer kesme işlemleri olan 5 eksenli frezeleme işlemlerini temsilen eğilme ve yatma açıları divizörün döndürülmesiyle gösterilmiştir. Bu gösterme işlemi aşağı ve yukarı frezeleme olarak gruplandırılarak gerçekleştirilmiştir. Tezgahın sahip olduğu 4. eksen (A eksen) kullanılarak 5 eksen frezeleme şartları gerçekleştirilmiştir. Şöyle ki; divizör döndürülmüş durumunda iken takım hareketinin divizör eksenine dik yönde gerçekleşmesi pozitif veya negatif eğilmeyi, divizör eksenine paralel yönde gerçekleşmesi pozitif veya negatif yatmayı temsil etmektedir (bkz Konu 2.4). Dolayısıyla 5 eksenli bir frezelemede olması gereken eğilme ve yatma açıları ayrı ayrı ve eş zamanlı olmadan gerçekleştirilmiş olmaktadır, Şekil 4.4. Mesela 5 eksenli bir tezgah olduğu ve bu tezgahın da döner eksenleri çift tabla (A ve B eksenleri) üzerinde olduğu düşünüldüğünde eğilme açılarında A eksenine açı verilerek A eksenini boyunca yapılan ilerleme 4. eksenini gösterirken, B eksenine açı verilerek B eksenini boyunca yapılan ilerleme 5. eksenini gösterecektir. Şekil 4.4'teki deney düzeninde tezgahın tek bir döner eksenini bulunması durumunda ilerleme yönleri döner eksenini boyunca ve döner eksenine dik yönde gerçekleştirilerek eşzamanlı olmayan 5 eksenli bir frezeleme işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır.



Şekil 4.4. A ekseni ile Eğilme (a-b) ve Yatma (c-d) açısı ilişkisi

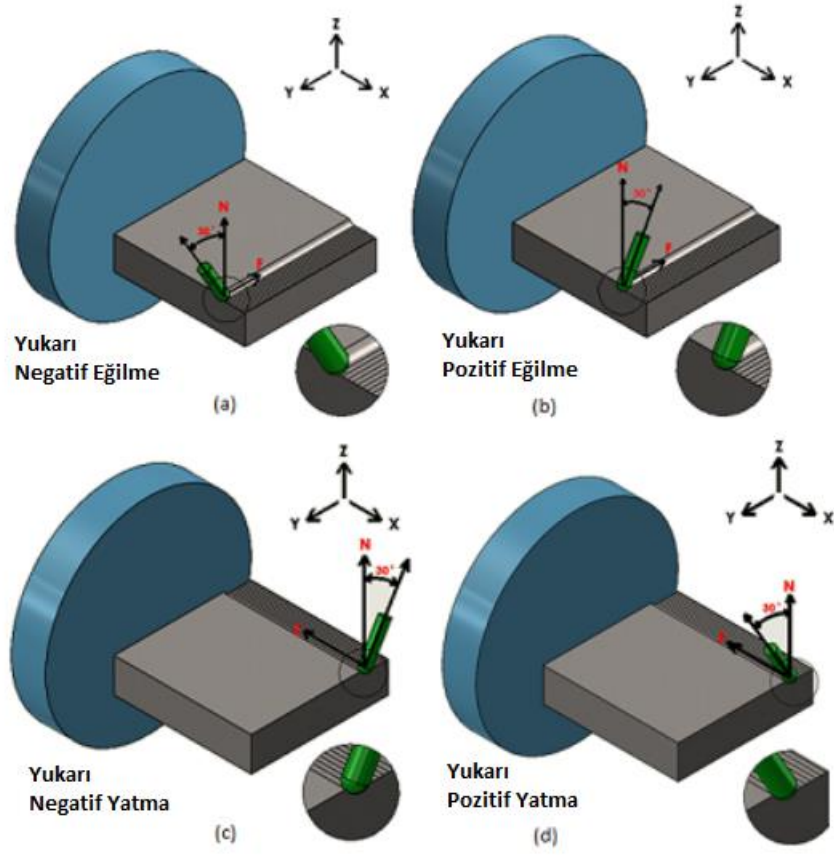
Şekildeki N parça yüzeyine dik pozisyonu, F takım ilerleme yönünü ve C ise iki kesme işlemi arasındaki paso hareketi yönünü göstermektedir.

Şekil 4.5'te aşağı yönlü frezeleme deneylerine ait 5 eksenli frezelemedeki eğilme ve yatma açılarının divizördeki oryantasyonu ve takımın kesme yönü hareket vektörlerinin bulunduğu grafikler gösterilmiştir. Her bir durumda sadece bir açının gösterildiği bu grafiklere göre, a) 4 nolu deneyi, b) 6 nolu deneyi, c) 8 nolu deneyi ve d) ise 10 nolu deneyi temsil etmektedir.



Şekil 4.5. Aşağı yönlü frezeleme deneylerine ait oryantasyon ve kesme yönü grafikleri
a) Deney 4, b) Deney 6, c) Deney 8, d) Deney 10

Şekil 4.6' da ise yukarı yönlü frezeleme deneylerine ait 5 eksenli frezelemedeki eğilme ve yatma açılarının diizördeki oryantasyonu ve takımın kesme yönü hareket vektörlerinin bulunduğu grafikler gösterilmiştir. Her bir durumda sadece bir açının gösterildiği bu grafiklere göre, a) 3 nolu deneyi, b) 5 nolu deneyi, c) 7 nolu deneyi ve d) ise 9 nolu deneyi temsil etmektedir.



Şekil 4.6. Yukarı yönlü frezeleme deneylerine ait oryantasyon ve kesme yönü grafikleri
a) Deney 3, b) Deney 5, c) Deney 7, d) Deney 9

Çizelge 4.1’de verilen deney değişken parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney değişken parametreleri

Deney numarası	Kesme yönü (Yukarı/Aşağı)	Eğilme (Pozitif/Negatif)	Yatma (Pozitif/Negatif)	Açıklama
1	Yukarı	-	-	Yukarı yönlü kesim yapılmıştır. Takım 3 eksen pozisyonunda kesim yapmıştır. (Eğilme ve yatma açısı verilmemiştir.)
2	Aşağı	-	-	Aşağı yönlü kesim yapılmıştır. Takım 3 eksen pozisyonunda kesim yapmıştır. (Eğilme ve yatma açısı verilmemiştir.)
3	Yukarı	Negatif	-	Yukarı yönlü kesim yapılmıştır. Negatif Eğilme (A-30)
4	Aşağı	Negatif	-	Aşağı yönlü kesim yapılmıştır. Negatif Eğilme (A+30)
5	Yukarı	Pozitif	-	Yukarı yönlü kesim yapılmıştır. Pozitif Eğilme (A+30)
6	Aşağı	Pozitif	-	Aşağı yönlü kesim yapılmıştır. Pozitif Eğilme (A-30)
7	Yukarı	-	Negatif	Yukarı yönlü kesim yapılmıştır. Negatif Yatma (A-30)
8	Aşağı	-	Negatif	Aşağı yönlü kesim yapılmıştır. Negatif Yatma (A-30)
9	Yukarı	-	Pozitif	Yukarı yönlü kesim yapılmıştır. Pozitif Yatma (A+30)
10	Aşağı	-	Pozitif	Aşağı yönlü kesim yapılmıştır. Pozitif Yatma (A+30)

Her bir deney için 200 adet paso verilmiştir. Her bir paso uzunluğu 42’şer mm’dir. Pasoların tamamında, soğutucu sıvı ya da hava kullanmadan kuru kesim yapılmıştır. Bunun sebebi takım aşınma süresinin kısaltarak toplam deney süresi içerisinde daha fazla deney yapabilmek hedeflenmiştir. Tüm deneyler için takım uçlarının ilk hali dijital mikroskop ile inceledikten sonra, sırasıyla 5, 10, 20 ve 20’nin katları olan pasolar sonrası takımların aşınması, aşama aşama fotoğraflanarak kayıt altına alınmıştır. 200 pasoyu tamamlayamadan kırılan takımlar ise ayrıca kaçınıcı paso esnasında kırıldı ise not alınmıştır. Çizelge 4.2 de diğer deney sabit parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney sabit parametreleri

Açıklama	Birim	Değer
İşmili devri	rpm	10000
İlerleme hızı	mm/dk	2000
Paso derinliği	mm	1
Paso genişliği-Yanal adım	mm	0.75
Paso uzunluğu	mm	42
Tutucudan sonraki takım boyu	mm	16,20

Dijital mikroskop ile takımların işlem öncesi ve sonrası incelemeleri hassas bir şekilde hem görsel hem de ölçüsel olarak yapılmıştır. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi dijital mikroskopun doğru konumlandırılması için harici bir tutucu aparat tasarlanmıştır. Bu sayede dijital mikroskopun konumu korunarak aynı ekseninde farklı takım uçları için değerlendirmeler yapılabilmektedir. Mikroskop, takım küresel olduğundan dolayı yan yüzey aşınmasının (yanal aşınma) mümkün olduğunca karşı taraftan görülebilmesi için yaklaşık olarak (kesme derinliği ve paso genişliği değerlerine bağlı olacak şekilde) 45°’lik açı ile yerleştirilmiştir. Diğer taraftan takım tutucusu, kendi ekseninde 360 derece döndürülebilmesi ile takımın her iki kesici ucu mikroskop yardımı ile incelenebilmiştir. Küresel takımın tutucu yardımı ile mikroskopa adaptasyonu Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Dijital mikroskop düzeneği

Mikroskopa 500X büyütme ile elde edilen görüntüler ImageJ imaj analiz yazılımı yardımı ile analiz edilmiştir. Takımların mikroskopa adapte edildiği pozisyona konumlandırılan milimetrik cetvelin görüntüsü de aynı büyütme oranı ile elde edilmiştir. Bu milimetrik görüntüler üzerinde ImageJ yazılımında skala ayarlaması yapılmış ve aynı

ayarlar kullanılarak ilgili takımların uygun pozisyondaki elde edilen görüntüleri üzerinden boyutsal ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mikroskopla elde edilen ve küresel takımın kesici ucuna ait bir görüntü ve bu görüntü üzerinde gerçekleştirilen yan yüzey aşınma miktarı ölçümü metodolojisi Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



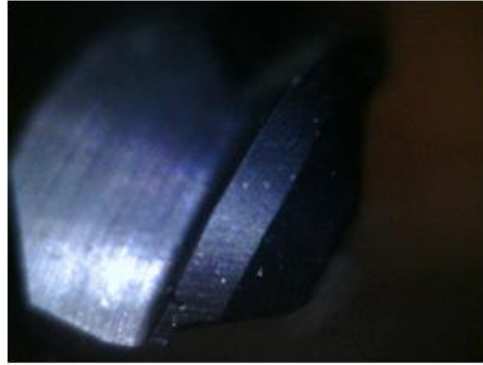
Şekil 4.8. Dijital mikroskopla elde edilen küresel takımın kesici ucuna ait bir görüntü ve yan yüzey aşınma miktarı ölçümü

Deneyler esnasında hem belirtilen aralıklarla takımların mikroskop ölçümleri gerçekleştirilmiş, hem de kesim bölgeleri iş parçası üzerinde gözle değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

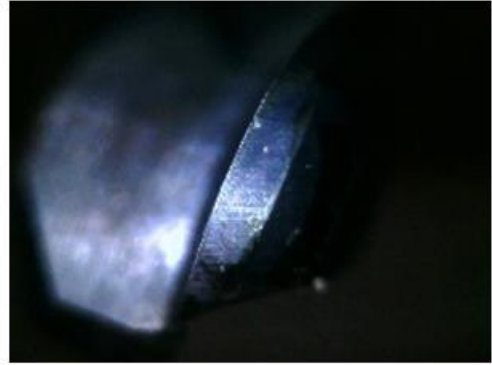
5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, bütün deneyler ve deneylerde elde edilen verilen ayrı ayrı değerlendirilmiş, daha sonra genel olarak karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

Deney 1, divizör konumu 0° , yani 3 eksenli ve yukarı yönlü frezelemede; 5 paso sonrasında görsellerde 2. kesici ucu olarak adlandırılan kısmında ufak bir kırıklık oluşmuştur. 40. paso sonrasında da aynı kırıklığın büyüdüğü gözlenmiştir. Takım 200 paso kesme işlemini başarı ile tamamladığında takımın tepe noktasındaki kırıklık 0,06mm olarak ölçülmüştür. 200 paso sonucunda takımın yan yüzey aşınması ise 0,012mm olduğu tespit edilmiştir. Kesilen malzeme yüzeyinin görsel incelemesinde yüzey kalitesinin kötü çıktığı gözlenmiştir. Şekil 5.1’de takımın deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları verilmiştir.



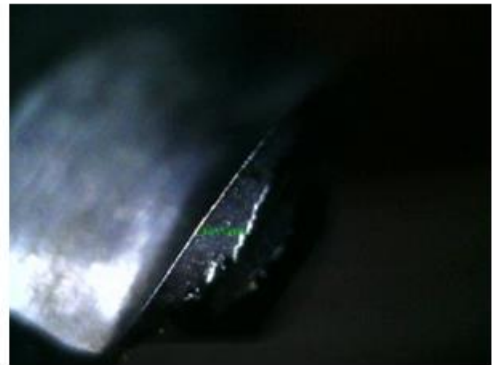
(a) Takımın ilk hali



(b) 5. paso 2. kesme kenarı



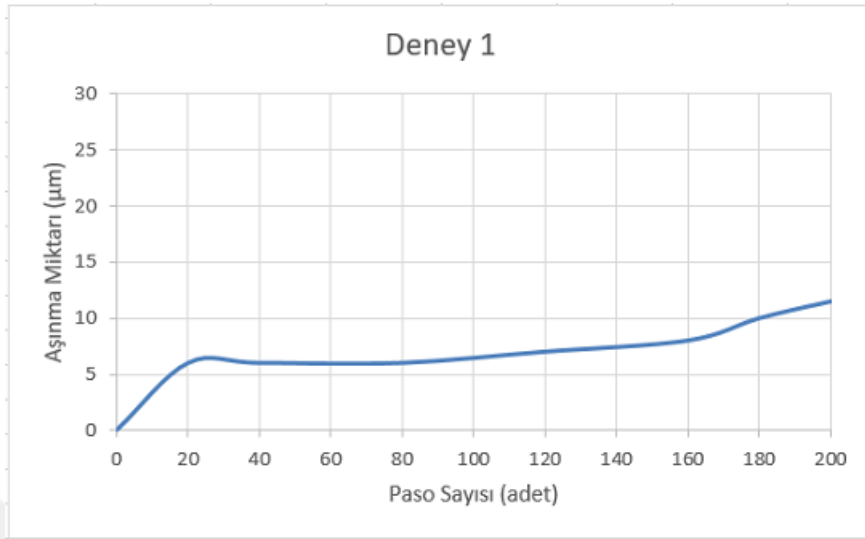
(c) 40. paso 2. kesme kenarı



(d) 200. paso 2. kesme kenarı

Şekil 5.1. Deney 1’e ait takım aşınma görüntüleri

1 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanal yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Deney 1'e ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre, takımındaki 20.pasoya kadar olan aşınma, hızlı başlangıç aşınma özelliğini gösterirken, 180. pasoya kadar düzgün aşınma özelliğini göstermektedir. 180. pasodan sonra takımın aşınmasında ivmelenme görülmekle birlikte 200. pasoda deney sonlandırıldığı için bu davranışın ne kadar devam ettiği hakkında fikir sahibi olunamamıştır.

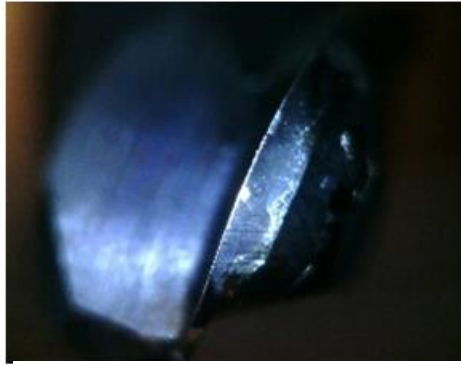
Deney 2, divizör konumu 0° yani 3 eksenli ve aşağı yönlü frezelemede, 10. paso sonrasında görsellerde 1. kesici ucu olarak adlandırılan kısmında 0,02 mm genişliğinde ufak bir kırıklık oluşmuştur. 40. paso tamamladığında kesici ucun birinci kenarında bir kırık daha oluşmuştur. 60. pasoda aynı kırıklığın daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Kesici ucun 100. pasoyu tamamladığında birinci kenarında kırıklık genişliği 0,05 mm genişliğine ulaşmıştır. Kesici uç 160. pasoyu tamamladığında birinci kenarda oluşan kırıklar arası mesafe körleşerek birleşmiştir. Kesici takım 200 pasoyu başarı ile tamamlamıştır. Kesilen malzeme yüzeyinin görsel incelenmesinde yüzey kalitesinin iyi bir düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.3 (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları verilmiştir.



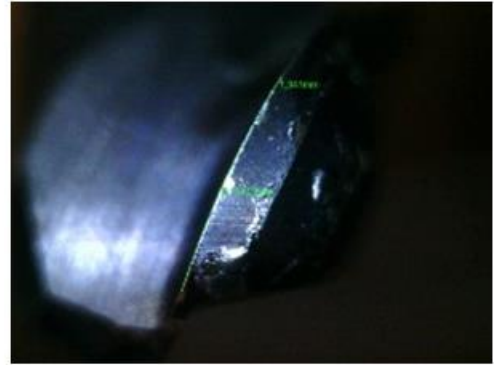
(a) Takımın ilk hali



(b) 100. paso 1. kesme kenarı



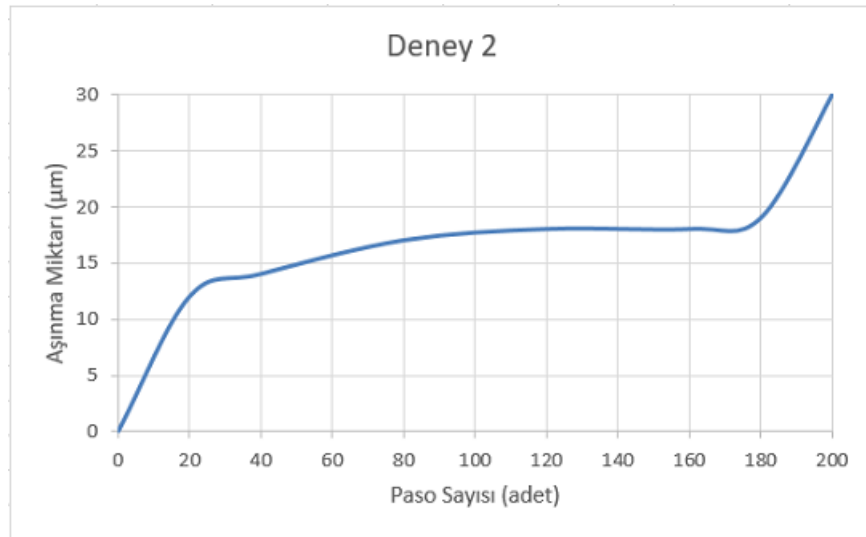
(c) 160. paso 1. kesme kenarı



(d) 200. paso 1. kesme kenarı

Şekil 5.3. Deney 2'ye ait takım aşınma görüntüleri

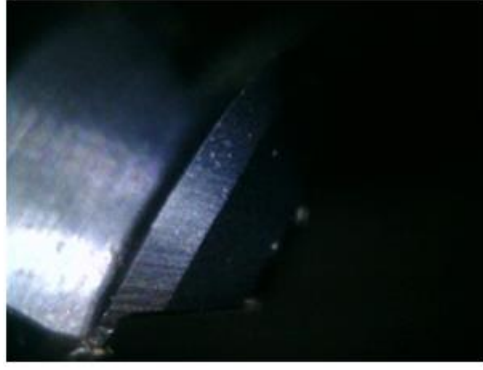
2 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanal yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



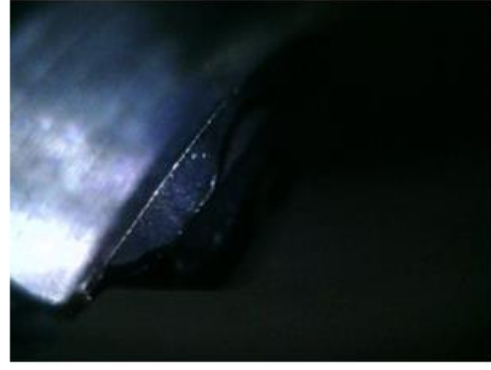
Şekil 5.4. Deney 2'ye ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre, takım 20.pasoya kadar hızlı başlangıç aşınması özelliği göstermekte iken, 20. pasodan 180. pasoya kadar ilk anlarda ivmeli olmak üzere düzgün aşınma özelliği göstermektedir. 180 pasodan sonra takımın hızlı bir şekilde kopma bölgesine girdiği görünmekte ancak 200 pasodan sonra deney sonlandırıldığı için kopma bölgesinin ne kadar devam edeceği ve maksimum aşınmanın ne kadar olacağı hakkında fikir sahibi olunamamıştır.

Deney 3, divizör konumu A-30° yani 4 eksenli ve yukarı yönlü frezelemede, negatif eğilme yaparak, 5 paso sonrasında görsellerde takımın tepe noktasında kırıklıklar oluşmuştur. Kesici takımın uç kısmında oluşan kırıklıklar takımın her iki kesici kenarında da tesir etmiştir. 10. paso sonrasında da aynı kırıkların büyüdüğü gözlemlenmiştir. 20. Paso tamamlandığında kesici ucun tepe noktasındaki kırıklıklar her iki kesici uca görülmüştür. Kesici ucun ikinci kenarındaki kırıklık birinci kısımdan daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Takımın tepe kısmında kırıklık oluşmuştur. Kesici ucun 2. kenarında ise 0,024 mm genişliğinde kırıklık oluşmuştur. Takımın 2. kesici ucun kenar kırıklığının yay uzunluğu 0,26 mm ölçülmüştür. Sonrasında kesici takımın 40. pasoyu tamamladığında ikinci kenarındaki aynı kırıklık 0,03mm olarak gözlemlenmiştir. Kırıklığın yay uzunluğu ise 0,31 mm olarak ölçülmüştür. Kesici takım yeni bir pasoya başladığında takımın ikinci kenarında kırılma gerçekleşmiştir. Takım tek kesici kenar ile kesim işlemi yapamaz hale gelmiş ve sonrasında kesici takım daha fazla yüke maruz kalınca takım ortadan kırılmıştır. Takım toplamda 41 paso yapabilmiştir. Kırılan takımda meydana gelen kırıklık genişlikleri şu şekildedir; tepe noktasındaki kırıklık genişliği 0,09 mm ve kesici takımın 2. kenarında kırıklık genişliği 1,540 mm olarak ölçülmüştür. Kesilen malzeme yüzeyinin görsel incelenmesinde yüzey kalitesinin kötü çıktığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.5 (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafı verilmiştir.



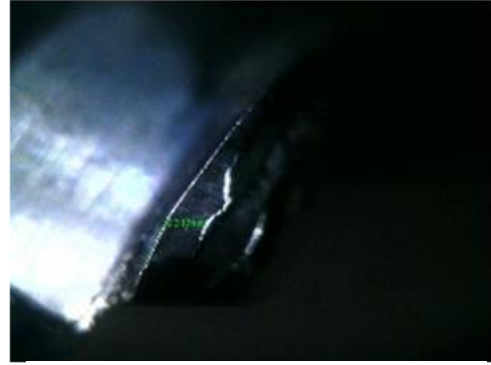
(a) 0. paso 1. ağız



(b) 5. paso 1. kesme kenarı



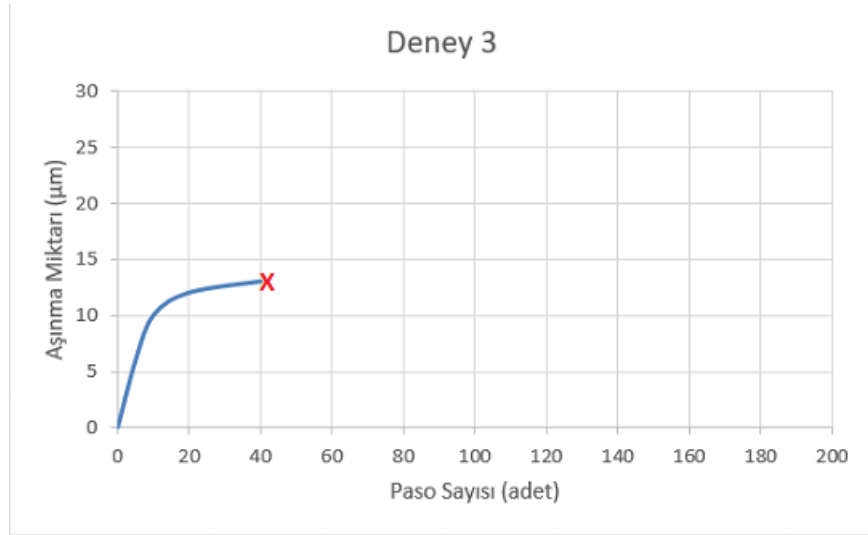
(c) 20. paso 2. kesme kenarı



(d) 40. paso 2. kesme kenarı

Şekil 5.5. Deney 3'e ait takım aşınma görüntüleri

3 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanal yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Deney 3'e ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre 20. pasoya kadar hızlı başlangıç aşınması yaşanmış. Daha sonra düzenli aşınma yaşanmaya başlamış ancak 41. pasoda takım kırılmıştır. Bunun nedeni, takımın tepe noktasında aşınma ile başlayıp, kırıklıklara dönüşmesi, kırık bölgenin büyümesi ve kesme kenarına kadar ilerlemesi, takımın 41 pasoda kırılmasına sebep olmuştur.

Deney 4, divizör konumu $A+30^\circ$ yani 4 eksenli ve aşağı yönlü frezelemede negatif eğilme yapmıştır. 5 paso sonrası takımın birinci kesici kenarının ortasında küçük bir kırık oluşmuştur. Takımın ikinci kesici kenarında ise aşınma meydana gelmiş ve tepe noktasında kırıklık oluşmuştur. 10. pasoda takımdaki aşınmalar yavaş yavaş devam etmiştir. Kesici takımın tepe noktasındaki kırıklık, takımın birinci kesici kenar bölgesine doğru ilerlemiştir. Kesici takım 20. pasoyu tamamladığında kırık olan yerler ve aşınmalar daha belirgin hale gelmiştir. 40. pasoda takımın her iki kesici kenarındaki kırıklıklar büyümeye devam etmiştir. Kesici takım 60. pasoyu tamamladığında kırıklıklar takımın tepe noktasından aşağıya doğru inmeye başlamıştır. Kesici takım 80. pasoyu tamamladığında takımın birinci kesici kenarı büyük hasar görmüştür. Takımın tepe noktasındaki kırıklık 0,27 mm ölçülmüştür. Tepe noktasındaki kırıklık birinci kesici kenarına doğru büyümüştür. Kesici takım 100. pasoyu tamamladığında harici bir kırıklık 0,5 mm olmuştur. Kesici takım 140. Kesimi tamamladığında birinci kesme kenarı parçalanmıştır ve parçalanan yerin kırıklık genişliği 0,8 mm ölçülmüştür. Toplamda kesici takım üzerinde 3 farklı yerde kırılmalar meydana gelmiştir. 3 numaralı takım 200. paso başarı ile tamamlanmıştır. Kesici takımın büyük ölçüde hasar görmesine rağmen kesilen malzeme yüzeyinin görsel incelenmesinde yüzey kalitesinin iyi olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.7 (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları verilmiştir.



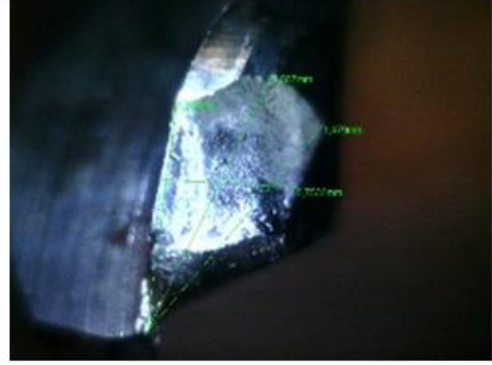
(a) Takımın ilk hali



(b) 20. paso 1. kesme kenarı



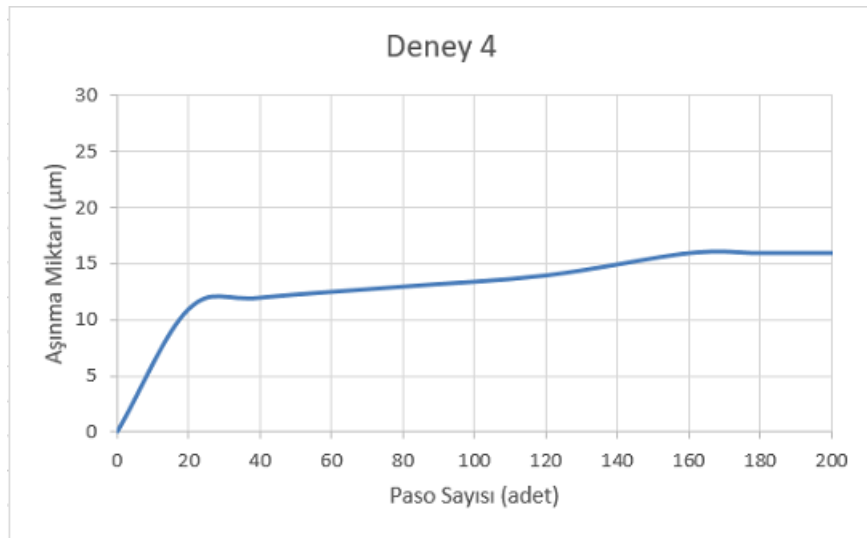
(c) 140. paso 1. kesme kenarı



(d) 200. paso 1. kesme kenarı

Şekil 5.7. Deney 4'e ait takım aşınma görüntüleri

4 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanıl yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



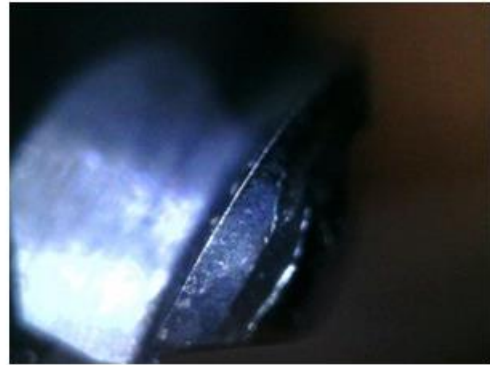
Şekil 5.8. Deney 4'e ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre takım 20. pasoya kadar hızlı başlangıç aşınması özelliği gösterdikten sonra deneyin sonuna kadar sürekli düzgün aşınma özelliği göstermiştir. 140.pasoda bir miktar aşınmada ivmelenme olsa da 160.pasodan sonra aşınma tekrar dengelenmiştir. 200 pasodan sonra deney sonlandırıldığı için sürekli düzgün aşınma bölgesinin ne kadar devam edeceği ve kopma bölgesine ne zaman geçeceği hakkında fikir sahibi olunamamıştır. 200 paso sonunda kesici takımdaki aşınma 0,016 mm'dir.

Deney 5, divizör konumu $A+30^\circ$, yani 4 eksenli ve yukarı yönlü frezelemede pozitif eğilme yapmıştır. Kesici takımın 5 paso sonrası takımın 1. ve 2. kesme kenarı uç ve orta kısımda küçük kırıklıklar oluşmuştur. Kesici takım 10. pasoyu tamamladığında her iki kesici kenarda da aşınmalar devam etmiştir. 80. pasoda kırıklar belirgin hale gelmiştir. 140. paso da aşınmalar belirginleşmiştir. 141. pasoda kesici takım kırılmıştır. Kesilen malzeme yüzeyinin görsel incelenmesinde yüzey kalitesinin kötü çıktığı gözlemlenmiştir. Takımdaki kırıklığın genişliği 0,02 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.9 (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri verilmiştir.



(a) Takımın ilk hali



(b) 80. paso 1. kesme kenarı



(c) 140. paso 1. kesme kenarı



(d) 140. paso 2. kesme kenarı

Şekil 5.9. Deney 5'e ait takım aşınma görüntüleri

5 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanal yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Deney 5’e ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre, 80. pasoya kadar hızlı olmayan bir başlangıç aşınması yaşamıştır. 80. pasodan 120. pasoya kadar sürekli düzgün aşınma yaşanmıştır. 120. pasodan itibaren ivmelenen bir aşınma yaşayan takım kopma bölgesi aşınması özelliğini göstermiş ve 140. pasodan sonra kırılmıştır. Takım her ne kadar yanal yüzey aşınması bakımından başlangıçta hızlı bir aşınma yaşamasa da ilk 5 pasodan itibaren kesici uçlarda ufak çaplı kırılmalar yaşanmış ve kesmenin sonuna doğru ilerleyerek devam etmiştir. Bu kırılmalar 120.pasoya kadar aşınmaya olumsuz bir etki oluşturmamış olsa da aşınma bu pasodan sonra ivmelenerek artmış ve 141.pasoda takımın aniden kırılması ile son bulmuştur.

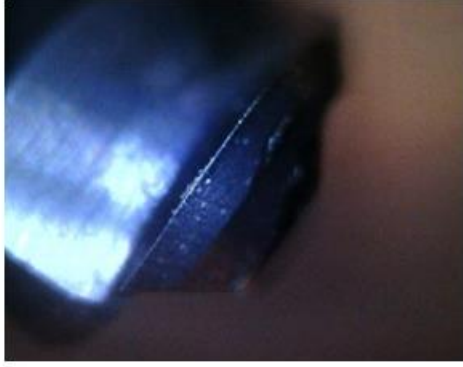
Deney 6, divizör konumu A-30°, yani 4 eksenli ve aşağı yönlü frezelemede pozitif eğilme yapmıştır. 5 paso sonrasında görsellerde takımın her iki kesici ucun uç kısımlarında kırıklıklar oluşmuştur. Kesici takım 10. pasoyu tamamladığında aynı aşınmaların devam ettiği gözlemlenmiştir. 20. paso sonrası takımın birinci ve ikinci kesici ucun uç kısmındaki aşınma, takımın orta kısmına doğru ilerlemiştir. 120. pasoyu yaptıktan sonra her iki ucun körelmesi belirginleşmiştir. Takım 200 pasoyu başarı ile tamamlamıştır. Takımın kırık genişliği 0,02 mm olarak ölçülmüştür. Takım aşınması 0,01 mm ölçülmüştür. Takımda büyük yıpranma ya da büyük kırıklıklar oluşmamıştır. Kesilen malzeme yüzeyinin görsel incelenmesinde yüzey kalitesinin iyi çıktığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.11 (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafı verilmiştir.



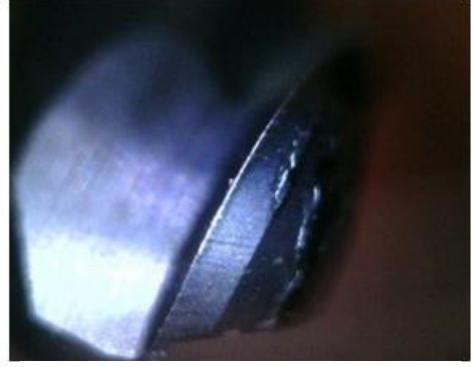
(a) Takımın ilk hali



(b) 5. paso 1. kesme kenarı



(c) 20. paso 1. kesme kenarı



(d) 200. paso 1. kesme kenarı

Şekil 5.11. Deney 6'ya ait takım aşınma görüntüleri

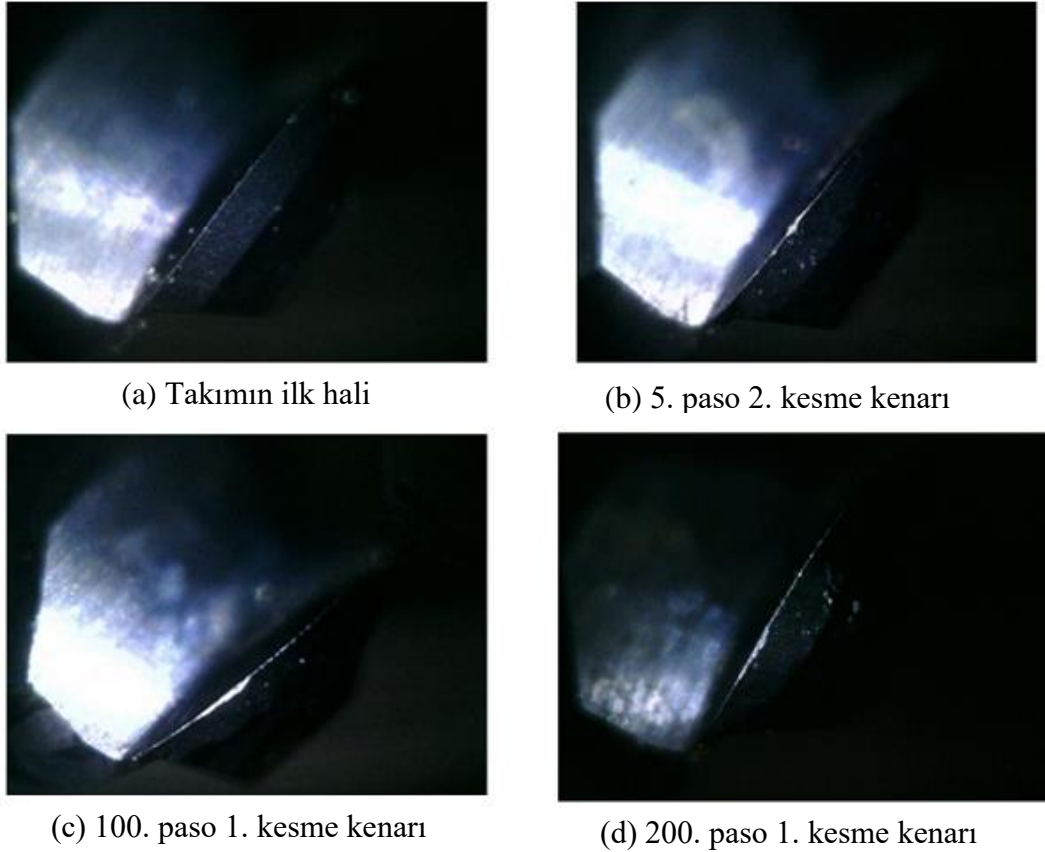
6 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanal yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Deney 6'ya ait takım aşınma miktarı grafiği

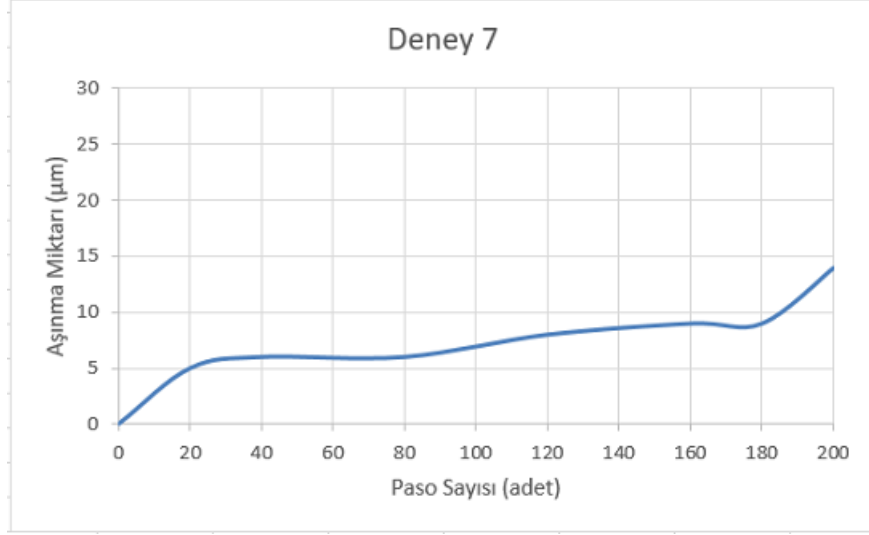
Grafiğe göre, takım 40. pasoya kadar hızlı başlangıç aşınması, sonrasında ise 160. pasoya kadar sürekli artan oranda düzgün aşınma özelliği göstermiştir. 160. pasodan 180. pasoya kadar aşınmada ivmelenme yaşanmış ve sonrasında tekrar düzgün aşınma özelliği göstermekle birlikte 200. pasodan sonra deney sonlandırıldığı için bu bölgenin ne kadar olacağı hakkında fikir sahibi olunamamıştır.

Deney 7, divizör konumu $A-30^\circ$, yani 4 eksenli ve yukarı yönlü frezelemede negatif yatma yapmıştır. 5 paso sonrasında görsellerde takımın 1. kesici ucu olarak adlandırılan kısmının, orta bölgesinde aşınma gözlemlenmiştir. Kesici ucun ikinci kesme kenarında orta kısmında ise kırılma gözlemlenmiştir. Kesici takım 100. pasoyu tamamladıktan sonra 1. kesme kenarının kırıkları daha belirgin hale gelmiştir. Yedi numaralı takım 200 pasoyu başarı ile tamamlamıştır. Takımın durumu iyidir. Takımdaki kırıklık genişliği 0,03 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.13 (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.13. Deney 7'ye ait takım aşınma görüntüleri

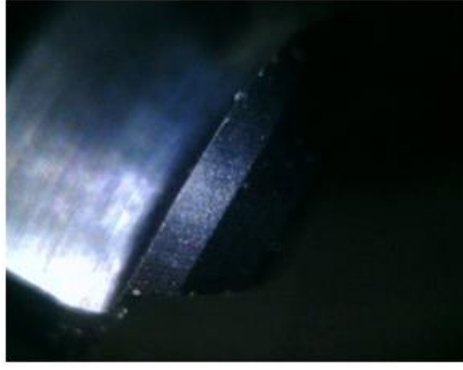
7 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanal yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.14'de gösterilmiştir.



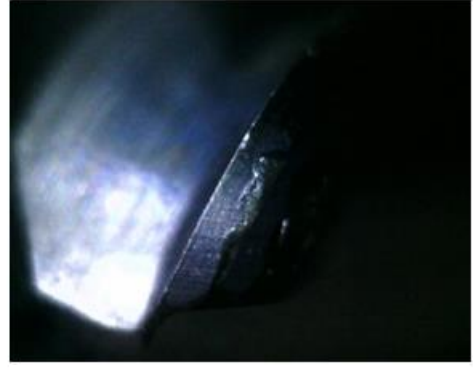
Şekil 5.14. Deney 7'ye ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre; takım 20. pasoya kadar olan hızlı başlangıç aşınması özelliği göstermiştir. 20.pasodan sonra ise 180. pasoya kadar zaman zaman ivmelenerek de olsa sürekli düzgün aşınma özelliği göstermiştir. Ancak 180. pasodan sonra takımın hızlı bir şekilde kopma bölgesi aşınma davranışı gösterdiği görünmektedir ve deney sonlandığı için maksimum aşınmanın ne kadar olacağı hakkında fikir sahibi olunamamıştır.

Deney 8, divizör konumu $A-30^\circ$, yani 4 eksenli ve aşağı yönlü frezelemede; negatif yatma yapmıştır. 20 paso sonrasında görsellerde 1. Kesici ucu olarak adlandırılan kısmında ufak kırıklıklar oluşmuştur. Sonrasında 40. pasoyu tamamladıktan sonra 1. Kesme kenarındaki kırıklıkların genişliği büyümüştür ve yanında yeni bir kırıklık daha oluşmuştur. 100. paso da bittiğinde ikinci kesme kenarının tepe noktasında büyük kırıklıklar oluşmuştur. Takım 121. pasoda kırılmıştır. 1. kesici ucun kırıklık genişliği 0,085 mm. Tepe noktasındaki kırıklık genişliği 0,3 mm olarak kaydedilmiştir. Şekil 5.15 (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafı verilmiştir.



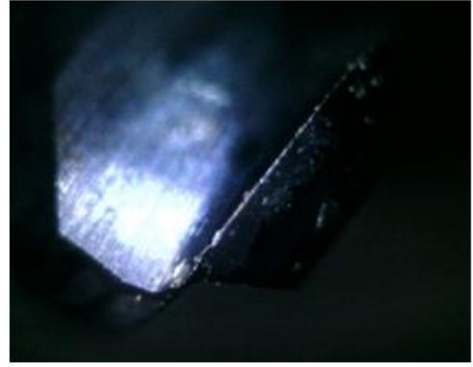
(a) Takımın ilk hali



(b) 20. paso 1. kesme kenarı



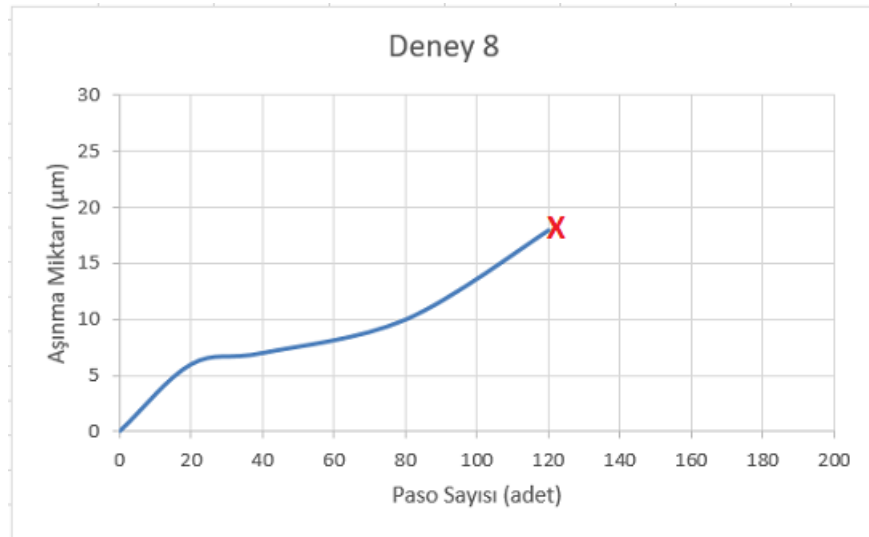
(c) 100. paso 2. kesme kenarı



(d) 120. paso 2. kesme kenarı

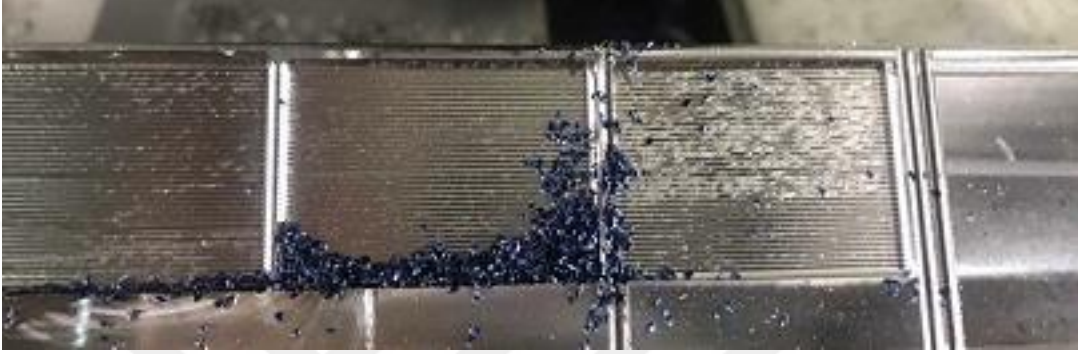
Şekil 5.15. Deney 8'e ait takım aşınma görüntüleri

8 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanal yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.16'de gösterilmiştir.



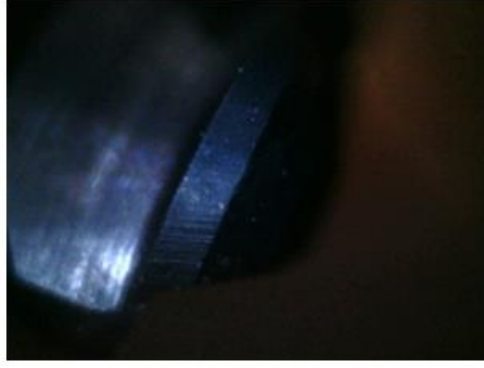
Şekil 5.16. Deney 8'e ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre, takım 20. pasoya kadar hızlı başlangıç aşınması özelliği gösterdikten sonra 80. pasoya kadar sürekli düzgün aşınma özelliği göstermektedir. 80. pasodan itibaren kopma bölgesine giren takımın aşınması 120. pasoya kadar ivmelenerek devam etmiş ve 121. pasoda takım kırılmıştır. Kesilen talaşların parça üzerinde tekrar kesim bölgesinde birikmesi neticesinde takımın kırıklarının oluşmasına ve işlemin devamında bu kırıkların derinleşmesi gözlenmiştir (Şekil 5.17).

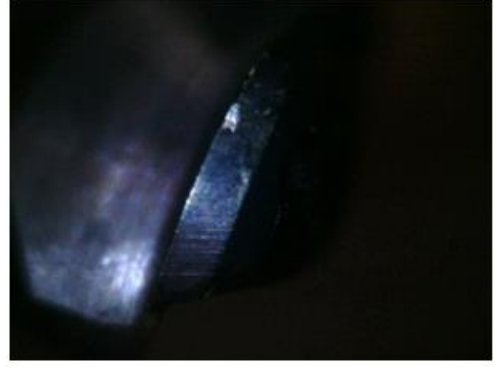


Şekil 5.17. Deney 8'e ait malzeme yüzeyinde biriken talaşların görüntüsü

Deney 9, divizör konumu $A+30^\circ$, yani 4 eksenli ve yukarı yönlü frezelemede pozitif yatma yapmıştır. 5 paso sonrasında görsellerde 1. kesici ucu olarak adlandırılan kısımda önemli bir kırıklık oluşmuştur. Sonrasında kesici uç 10. pasoyu tamamladığında birinci kesme kenarındaki aynı kırıklık daha belirgin hale gelmiştir. 20. pasoda birinci kesme kenarındaki kırıklık büyümüştür. 40. paso sonrası görsellerde kesici ucun tepe noktasında kırıklık belirginleşmiştir ve kesici ucun 2. kesme kenar kısmına da sıçramıştır. Kesici uç 45. pasoyu tamamlarken birinci kesme kenarından parça kopmuştur ve takım kırılmıştır. Kesici uçta, toplamda 3 bölgede kırıklık oluşmuştur. Bunlar; takımın tepe noktasındaki kırıklık genişliği 0,5 mm, 1. kesme kenarın kırıklık genişliği 0,33 mm, 2. kesme kenarının kırıklık genişliği ise 0,18 mm olarak ölçülmüştür. Takım deneyi başarı ile tamamlayamamıştır. Şekil 5.18 (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri verilmiştir.



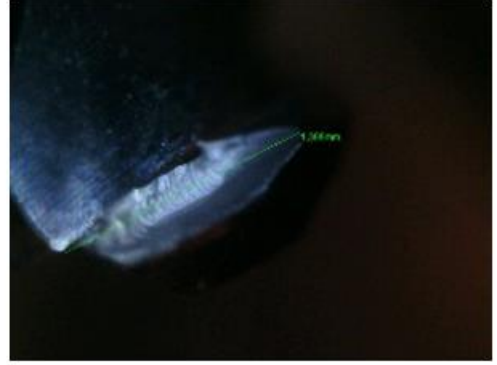
(a) Takımın ilk hali



(b) 5. paso 1. kesme kenarı



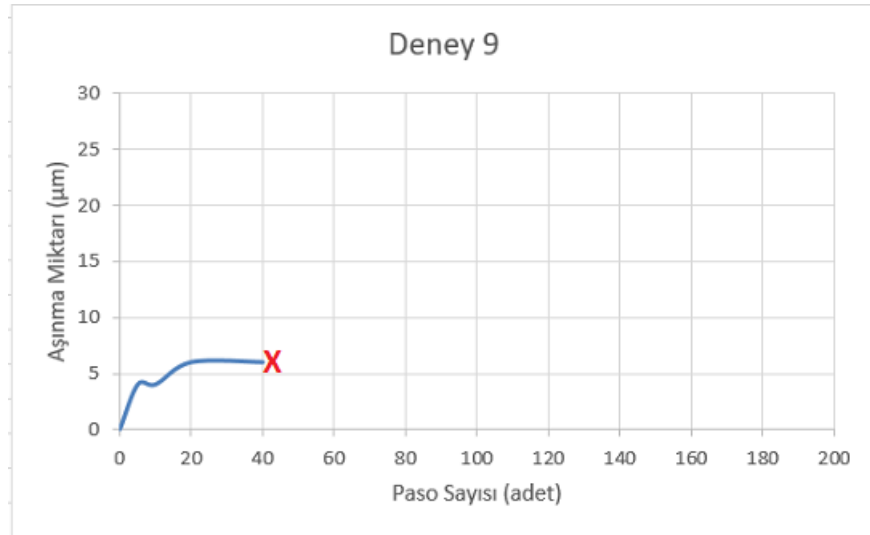
(c) 40. paso 2. kesme kenarı



(d) 45. paso 1. kesme kenarı

Şekil 5.18. Deney 9'a ait takım aşınma görüntüleri

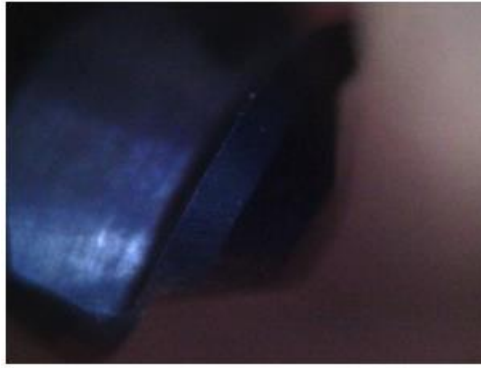
9 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanıl yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.19'de gösterilmiştir.



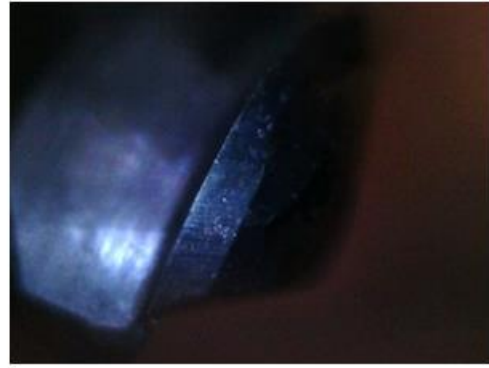
Şekil 5.19. Deney 9'a ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre 10. pasoya kadar çok hızlı bir başlangıç aşınması özelliği göstermiş, ancak ondan sonra düzenli aşınma bölgesi özelliği göstermiştir. Bu bölgede önce yatay yönde bir davranış gözlenirken sonra ivmelenmiş ve tekrar yatay yönlü seyretmiştir. Takım, 45 pasoyu tamamlarken kırılmıştır. Bunun nedeni; deneyin ilk 5 pasoda aşınma ile beraber kesici ucun kavis bölümünde derin bir kırıklık meydana gelmiştir. Bu kırılıktan sonra aşınmanın çok düşük seyretmesi kırılarak yeni oluşan yüzeyin kısa vadeli iyi kesme özelliği gösteren bir kesici uç geometrisi oluşturması olduğu düşünülmektedir.

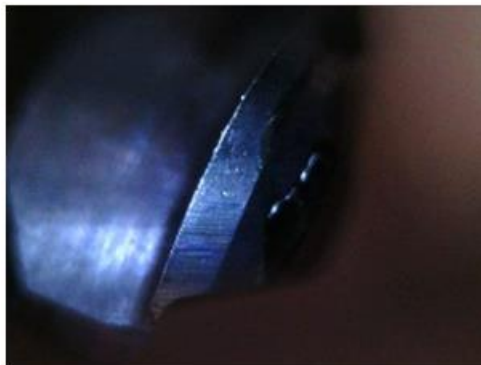
Deney 10, divizör konumu $A+30^\circ$, yani 4 eksenli ve aşağı yönlü frezelemede; pozitif yatma yapmıştır. 5 paso sonrası takımın birinci kesme kenarında ufak bir kırıklık oluşmuştur. 20. pasoyu tamamladıktan sonra birinci kesme kenarındaki aşınma artmıştır. Takım 200 pasoyu başarıyla tamamlamıştır. Takımdaki kırıklık genişliği 0,02 mm'dir. Takım iyi durumdadır. Şekil 5.20'de (a, b, c, d) sırasıyla, takımın deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları verilmiştir.



(a) Takımın ilk hali



(b) 5. paso. 2. kesme kenarı



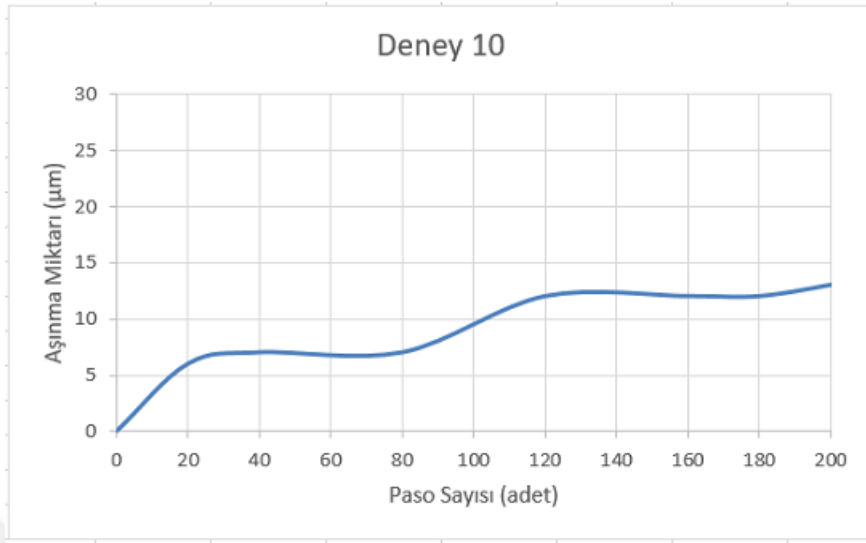
(c) 20. paso 2. kesme kenarı



(d) 200. paso 2. kesme kenarı

Şekil 5.20. Deney 10 'a ait takım aşınma görüntüleri

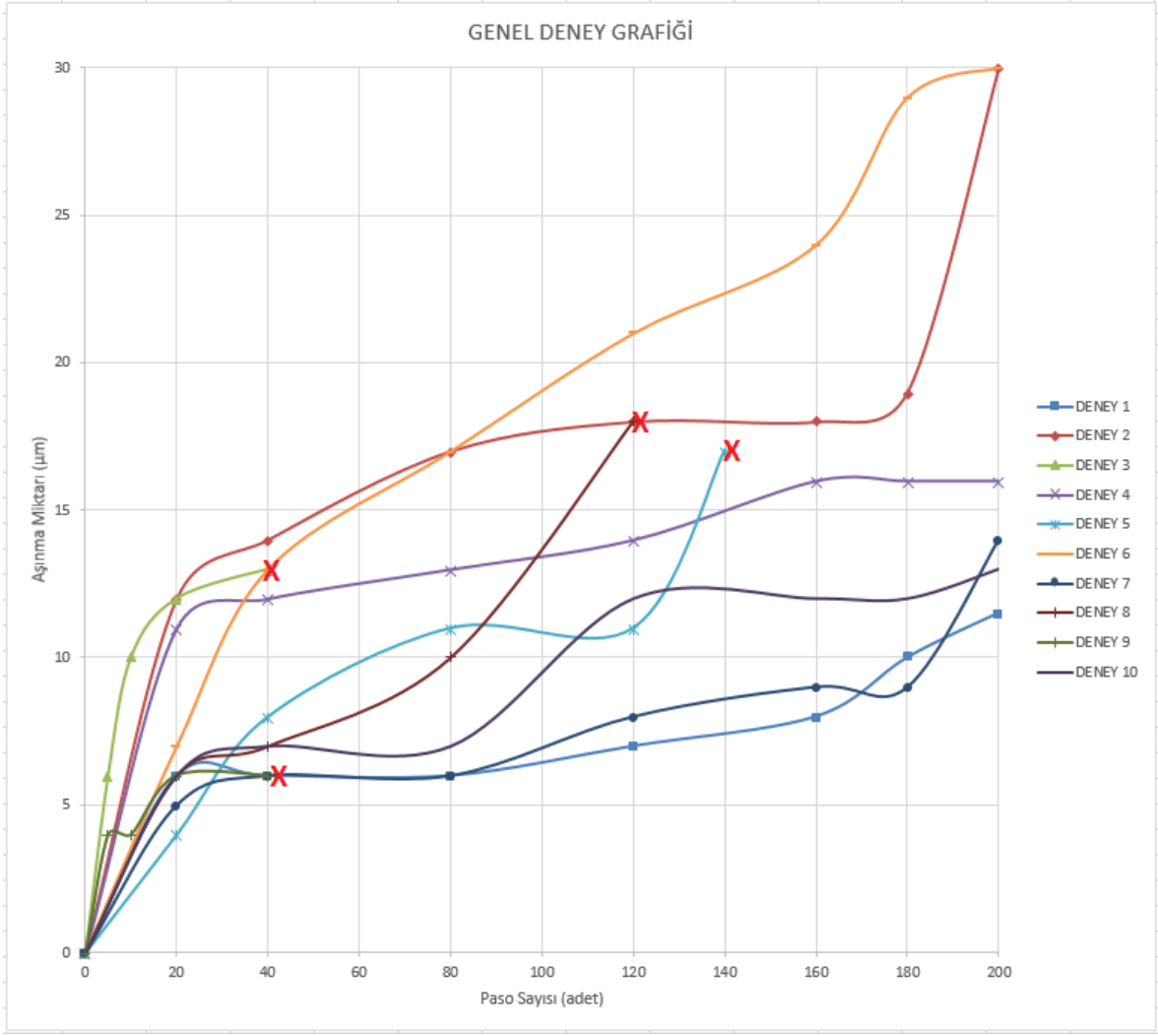
10 nolu deneye ait takımın her mikroskop aşamasında elde edilen görüntülerinden alınan yanal yüzey aşınma miktarları grafiksel olarak Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. Deney 10’a ait takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre, takım 20. pasoya kadar hızlı başlangıç aşınması özelliği göstermektedir. 20. pasodan sonra 80. pasoya kadar sürekli düzgün aşınma bölgesi içerisinde olan takımdaki aşınmada 80. pasodan 120. pasoya kadar ivmelenme yaşanmış ancak sonrasında tekrar düzgün aşınma bölgesine girmiştir. İkinci kez düzgün aşınma bölgesine girmesinin nedeni olarak takımın kendiliğinden keskinleşmesi (self sharpening) gösterilebilir. 200 pasodan sonra deney sonlandırıldığı için bu bölgenin ne kadar devam edeceği ve maksimum aşınmanın ne kadar olacağı hakkında fikir sahibi olunamamıştır.

Bütün deneyler için oluşturulan grafikler karşılaştırmalı inceleme için tek grafikte toplanmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.22.Bütün deneylerin paso sayısına göre takım aşınma miktarı grafiği

Grafiğe göre en yüksek aşınma 6 ve 2 nolu deneylerde gerçekleşmiştir. 3, 5, 8 ve 9 numaralı deneylerde takımlar kırılmıştır. Kesimleri tamamlayan deneyler arasında aşınmanın yüksek olandan düşük olana göre sıralaması 6,2,4,7,10 ve 1 şeklinde oluşmuştur. Diğer yandan tüm deneyler tek bir grafik altında toplandığında ortaya çıkan sonuçların literatürde yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Öyle ki; her bir deneyin aşınma grafikleri incelendiğinde kırılan takımlar haricinde genel olarak tipik bir takım aşınma eğrisinin oluştuğu görülmektedir.

Sonuçlara genel olarak bakıldığında, ilk etapta kategorik bir değerlendirme mümkün görünmemektedir. Sonuçlar genel olarak ele alınacak olursa;

Negatif eğilme/yatma olan deneylerden iki deneyde takımlar (3,8) kırılmıştır. Pozitif eğilme/yatma olan deneylerden iki deneyde takımlar (5,9) kırılmıştır. Takım kırılan deneylerden bir tanesi (8) aşağı frezeleme, üç tanesi (3,5,9) ise yukarı frezelemeye aittir.

Aşınma bakımından en iyi performans gösteren eğilme ve yatma olan deneyler 7 ve 10 nolu deneylerdir. 7 nolu deney yukarı negatif yatma, 10 nolu deney ise aşağı pozitif yatmadır.

Bu çalışmanın en önemli motivasyonu farkı yönlerde eğilme veya yatma yaptığında takımın parça üzerinde talaş kaldırma mekanizmasında frezeleme yönünün farklılaşması yaklaşımı olduğu belirtilmişti. Buna göre kırılan takımların talaş kaldırma mekanizması ayrı ayrı incelendiğinde, hepsinde de (her ne kadar teorik kesme tanımları farklı olsa da) yukarı frezelemenin gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Diğer yandan, frezeleme işlemleri başarılı bir şekilde biten takımlar incelendiğinde (4,6,7,10), hepsinde de aşağı frezeleme mekanizmasının gerçekleştiği görülmektedir. Sadece 6 nolu takım kesmenin ilk başlangıcında aşağı frezeleme gibi davranırken devamında yukarı frezeleme gibi davranmaktadır.

Bundan dolayı, 6 nolu takım diğerlerine nazaran (her ne kadar deney sonuna kadar dayanmışsa da) yüksek aşınma değerlerine sahip olduğu görülmektedir. 3 eksen frezelemelerde ise her iki takım deneyi bitirebilse de yukarı frezeleme daha iyi bir davranış gösterirken aşağı frezeleme daha kötü bir performans göstermiştir.

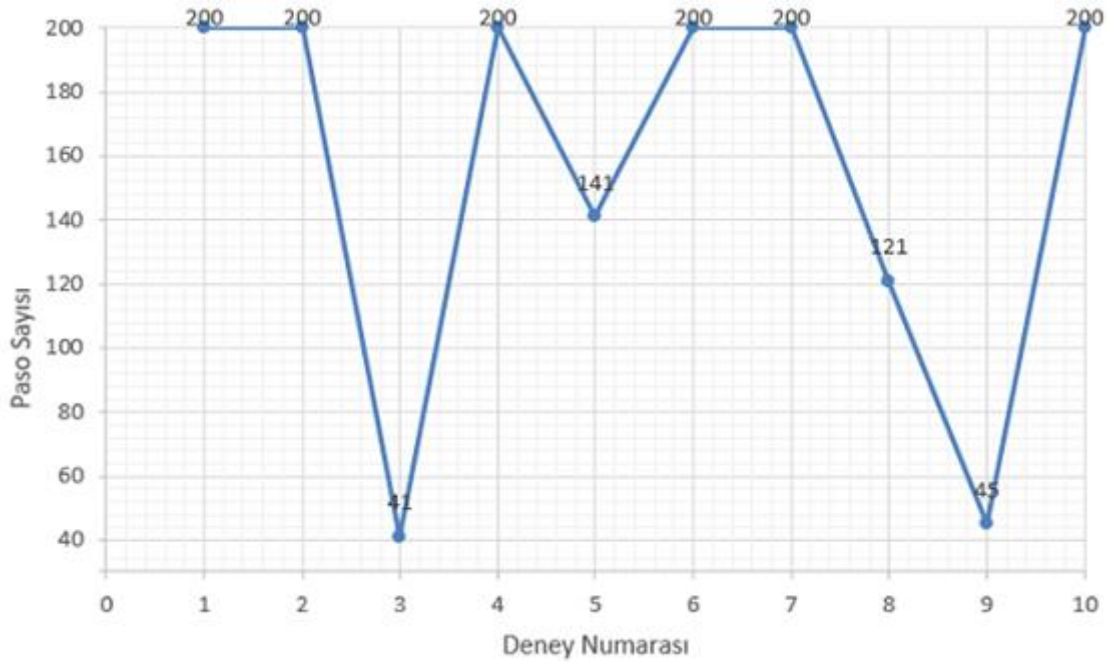
Aşağı yönlü paso negatif eğilme, aşağı yönlü paso pozitif eğilme, aşağı yönlü paso pozitif yatma olan deneylerde takımlar kırılmadı ve her bir takım 200 pasoyu tamamlarken, yukarı yönlü pozitif eğilme, yukarı yönlü negatif eğilme, yukarı yönlü pozitif yatma olan deneylerde takımların hepsi kırılmıştır. Bunun sebebi; aşağı yönlü kesim ile yukarı yönlü kesim arasındaki farkı açıkça ortaya koymuştur.

Bunların aksi durumda gerçekleşen 2 adet deney olan aşağı yönlü negatif yatma (8 numaralı deney) olan paso da, takım 121 pasoyu tamamlarken kırılmıştır. Yukarı yönlü negatif yatma olan pasoda ise takım kırılmadığı gibi, takımın kırıklık ve aşınma yönünden de iyi durumda olduğu mikroskop ile gözlemlenip ve raporlanmıştır.

Öztürk ve ark. Çalışmaların da; takım açısı ve kesme derinliğinin temas yüzeyi ile ilişkisi incelenmiş ve istenmeyen temastan kaçınmak için koşullar belirlenmiştir. Buna göre; takım ucunun paso esnasında temastan kaçınılması gerektiği düşüncesi öne çıkmıştır.

Bu doğrultuda oluşturulan model deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Öztürk ve ark., deneylerinde iki kesici uçlu 12 mm ve 16 mm çapa sahip küresel freze uçları kullanmışlardır. Buna karşın bu çalışmada, yine iki kesici uçlu 3 mm çapa sahip küresel freze ucu kullanılmıştır. Küresel freze uç çapları farklı olsa da; bu tip takımlarda takım ucu temasından kaçınılması gerektiği konusunda hemfikir olunmuştur. Çünkü küresel takımlarda, takım çapı değişmeksizin takım işlem parçasına dik bir konumda yaklaştığında takım ile iş parçası arasında yalnızca tek bir nokta temas etmektedir. Bu durum, hem takım açısından hem de iş parçası açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu neden küresel takımların, iş parçasına ön görülebilir bir eğim açısıyla yaklaşması daha verimli bir paso işlemi gerçekleşmesine imkân vermektedir.

Aşağıdaki tabloda her deney için kaçar adet kesim yapıldığını gösterir. Takımlar; 3, 5, 8 ve 9 numaralı deneylerde kırılma yapmıştır. Şekil 5.23'te her bir deneyde gerçekleşen paso sayıları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Deneylerde gerçekleşen kesme miktarları

Kırılmaya göre kıyaslama yapıldığında en az paso yapılan deney numaraları sırası ile 3, 9, 8 ve 5 şeklinde sıralanmaktadır. Toplamda 10 deneyin içerisinde en kötü takım performansını gösteren 3 numaralı deneydir. Diğer bir ifade ile malzemenin üzerinden en az talaş kaldırılabildir. Diğer; 1, 2, 4, 6, 7 ve 10 numaralı deneyler 200 pasoyu başarı ile tamamlayabilmiştir.

Bu deneyler de kendi arasında takım ömrü yönünden (kesme uçlarındaki kırıklık ve aşınmaya göre) kıyaslama yapıldı. Yapılan kıyaslamada takım ömrü en kısa olandan, takım ömrü en uzun olana göre sıralama şu şekildedir; 6, 2, 1, 7, 4 ve 10'dir.

Bu durumda, 200 pasoyu başarı ile tamamlayabilen deney numaraları arasında en erken kırılacak olan 6 numaralı deneyin takımı olduğu söylenebilir. En uzun takım ömrüne sahip olan deney numaraları ise 4 ve 10 olduğu söylenebilir. Aşağıdaki tabloda her deneyde paso sonucu malzeme üzerinden kaç mm³ hacim kaldırıldığı gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Deney değişkenleri ve kesilen malzeme miktarları

Deney numarası	Kesme yönü (Yukarı/Aşağı)	Eğilme (Pozitif/Negatif)	Yatma (Pozitif/Negatif)	Paso sayısı	Çıkan Talaş Hacim (mm ³)	Takım Kesici Ucu Kırıkları			
						Adeti	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
1	Yukarı	-	-	200	6256.24	1	0,06	-	-
2	Aşağı	-	-	200	6256.24	2	0,05	0,02	-
3	Yukarı	Negatif	-	41	1326.75	2	1,54	0,09	-
4	Aşağı	Negatif	-	200	6256.24	3	0,80	0,50	0,27
5	Yukarı	Pozitif	-	141	4427.06	1	0,02	-	-
6	Aşağı	Pozitif	-	200	6256.24	1	0,02	-	-
7	Yukarı	-	Negatif	200	6256.24	1	0,03	-	-
8	Aşağı	-	Negatif	121	3807	2	0,085	0,30	-
9	Yukarı	-	Pozitif	45	1450.76	3	0,33	0,18	0,5
10	Aşağı	-	Pozitif	200	6256.24	1	0,02	-	-

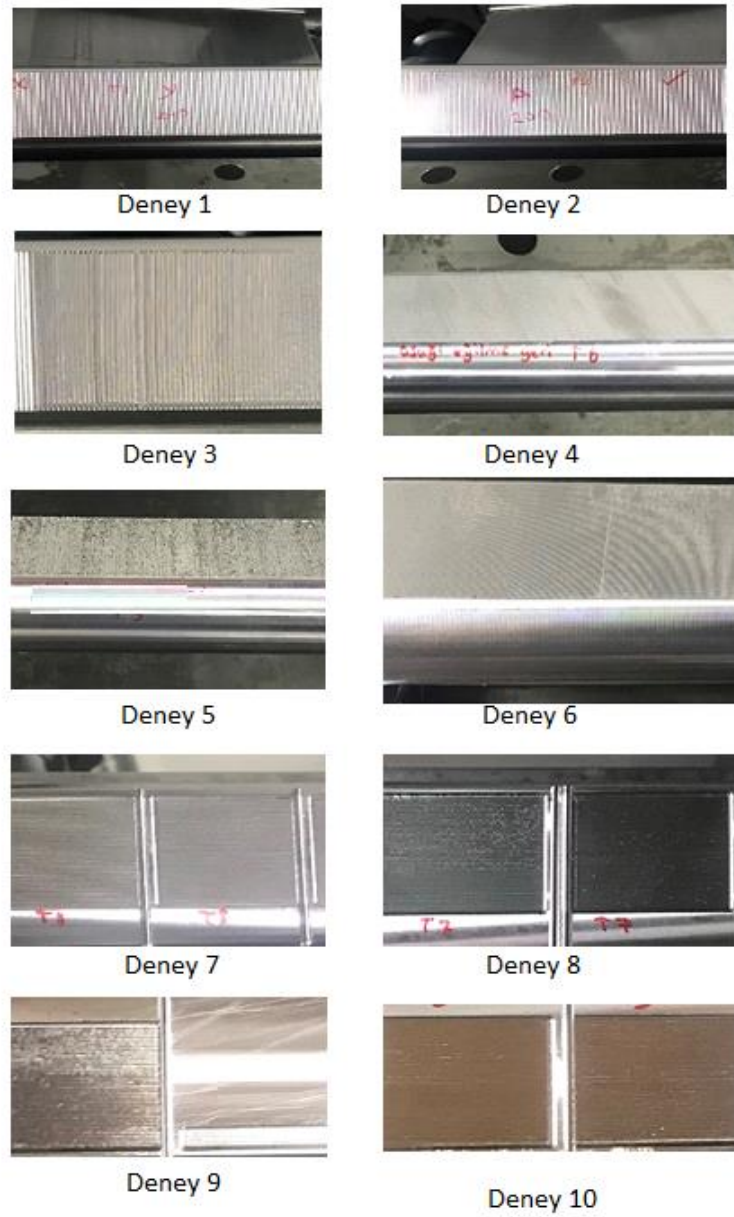
Eğilme ve yatma olmadan gerçekleşen aşağı ve yukarı yönlü deneylerde takımın uç ve orta kısımları aşınmıştır. Aşağı negatif eğilme olan deneyde takımın uç ve orta kısmı, aşağı pozitif eğilme olan deneyin takımın orta ve çap kısmı, yukarı negatif eğilme olan deneyde takımın uç ve orta olan kısımları, yukarı yönlü kesim pozitif yatma tarafa olan deneyde uç ve çap kısımlarındaki aşınmalar gözlenmektedir.

Takımlardaki aşınma ve kırıklıkların yaşandığı bölgeler sembolik olarak Şekil 5.24'te gösterilmiştir.

Ayrıca, yapılan deneyler sonucunda kesilen malzeme üzerindeki kesme bölgelerinin fotoğrafları Şekil 5.25'te verilmiştir.



Şekil 5.24. Takımın aşınma ve kırılma bölgelerinin sembolik olarak gösterimi



Şekil 5.25. Kesilen malzemenin kesme bölgelerinin fotoğraf görüntüleri

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında; aşağı frezeleme ve yukarı frezeleme olarak iki ayrı kapsamda birer adet 3 eksen ve dörder adet çok eksenli (pozitif eğilme ve yatma-negatif eğilme ve yatma) deneyler olmak üzere 10 farklı durum için (her bir takım için) 200'er adet paso kesim planlanmıştır. Bazı deneylerde takımlar kırılırken bazı deneylerde takımlar planlanan kesim miktarını başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir.

Divizörün önceden konumlandırılması ile negatif eğilme ve yatma olan tüm deneylerde efektif çapın küçük olmasından dolayı kesici takımın uç bölgeleri çalışmıştır. Divizörün önceden konumlandırılması ile pozitif eğilme ve yatma olan tüm deneylerde efektif çapın büyük olmasından dolayı kesici takımın çap bölgeleri çalışmıştır. Eğilme ve yatma olmadan yani 3 eksenli yapılan aşağı ve yukarı yönlü deneylerde takımın uç ve kesici kenarının orta bölgeleri çalışmıştır.

Yapılan deneylerde takım üzerinde modellenen efektif çap bölgesinin aşınması beklenilmiştir. Buna bağlı olarak deney sonucunda takım üzerinde meydana gelen aşınmanın daha önce modellenen efektif çap bölgesi içerisinde olup olmadığı irdelenmiş ve aşınma efektif çap bölgesi içerisinde değil ise, buna neden olan etkenler sıralanmıştır. Buna göre;

- Aşağı ve yukarı yönde eğilme ve yatma olmadan 3 eksenli gerçekleştirilen 1 ve 2 numaralı deneylerde modellenen efektif çap kesici ucun uç ve orta bölgesi olarak tamamlanırken, gerçekleşen aşınma tipi de birbirini doğrulamıştır.
- Yukarı yönlü negatif eğilme (Deney 3), aşağı yönlü negatif eğilme (Deney 4) olan deneylere modellenen efektif çap takımın uç bölgesi olarak tanımlanırken, gerçekleşen aşınma da takımın uç bölgesinde meydana gelmiştir.
- Yukarı yönlü pozitif eğilme (Deney 5), aşağı yönlü pozitif eğilme (Deney 6), yukarı yönlü pozitif yatma (Deney 9) ve aşağı yönlü pozitif yatma (Deney 10) olan deneylerde modellenen efektif çap takımın çap bölgesi olarak tamamlanırken, gerçekleşen aşınma tipleri de birbirini doğrulamıştır.
- Yukarı yönlü negatif yatma (Deney 7) ve aşağı yönlü negatif yatma (Deney 8) olan deneylerde modellenen efektif çap takımın uç bölgesi olarak tanımlanırken, gerçekleşen aşınma kesici takımın uç ve orta bölgelerinde meydana gelmiştir.

Yapılan deneylerin 8 tanesinde teorik olarak belirlenen aşınma bölgeleri, gerçekleşen aşınma bölgeleri ile birebir uyumlu olduğu görülmüştür. 2 deneyde ise teorik aşınma ile gerçekleşen aşınmanın büyük oranda uyumlu olduğu görünmekle beraber gerçekleşen aşınma bölgelerine bazı küçük yan bölgeler dahil olmuştur. Bunun nedeni olarak kesim esnasında çıkan talaşların tekrar kesme bölgesinde birikmesi sonucunda takımların talaşlar nedeniyle kırıklık yaşamasına neden olmasıdır.

Farklı yönlerde eğilme veya yatma durumunda takımın parça üzerinde talaş kaldırma mekanizmasında frezeleme yönünün normal planlanan ve adlandırılardan farklılaştığı gözlenmiştir. Buna göre kırılan takımların talaş kaldırma mekanizması ayrı ayrı incelendiğinde, hepsinde de (her ne kadar teorik kesme tanımları farklı olsa da) yukarı frezelemenin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Ek olarak, frezeleme işlemleri başarılı bir şekilde biten takımlar incelendiğinde, frezeleme yönü ve açılar farklı olarak isimlendirilmiş olsa da, hepsinde de aşağı frezeleme mekanizmasının gerçekleştiği görülmektedir. Sadece 6 nolu takım kesmenin ilk başlangıcında aşağı frezeleme gibi davranırken devamında yukarı frezeleme gibi davranmaktadır.

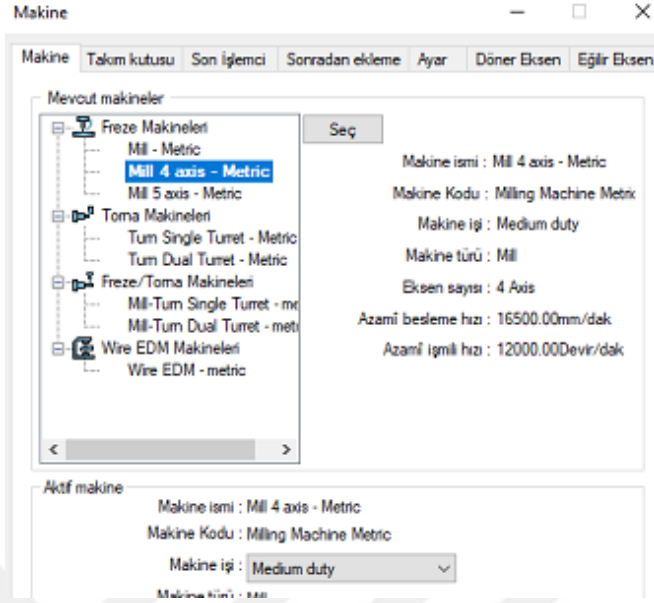
Buna göre, özellikle karmaşık parçalarda tercih edilecek ve 4. ve 5. eksen olarak adlandırılabilir eğilme ve yatma açılarının kullanılması söz konusu olduğunda aşağı negatif eğilme (Deney 4), yukarı negatif yatma (Deney 7) veya aşağı pozitif yatma (Deney 10) eksen pozisyonlarından geometriye, takıma ve tezgaha göre en uygun olanının kullanılması takım ömrü bakımından önerilir. Bu pozisyonların kullanılmadığı durumda aşağı pozitif eğilme (Deney 6) pozisyonu da kullanılabilir. Ancak bu sonuçlar 1mm kesme derinliği, 0,75mm paso genişliği ve 30°'lik eğilme/yatma açıları için geçerlidir. Bu parametrelerden herhangi biri değiştiğinde gerek takımın aşınma bölgesi ve gerekse efektif çap değiştiği için farklı sonuçlar elde edilmesi ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

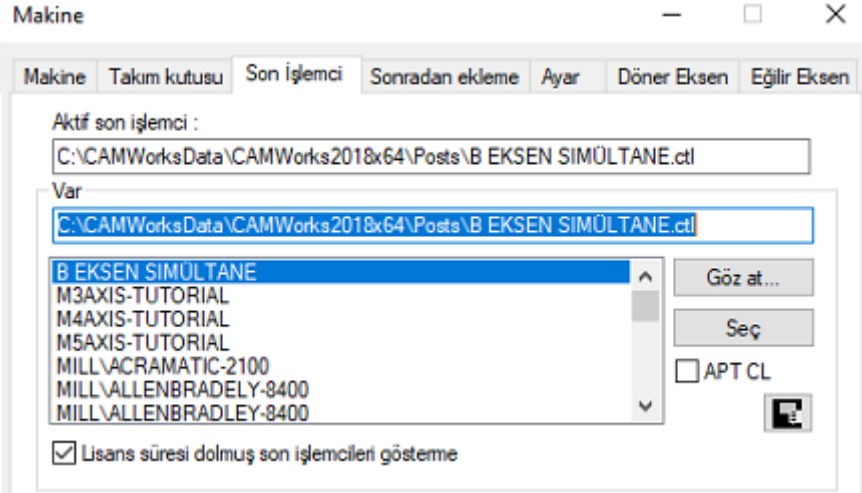
- Bilgen, S., (2016). Modelling and optimization of multi-axis machining process considering CNC motion limitations (Doctoral dissertation).
- Boz, Y., (2010). *Modeling of Cutting Forces for 5-axis Ball-end Milling of Free-form Surfaces*. Koç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul
- Boz, Y., Erdim, H., Lazoglu, I., (2011). *Modeling cutting forces for five axis milling of sculptured surfaces*. In Advanced materials research (Vol. 223, pp. 701-712). Trans Tech Publications Ltd.
- Cai, Z., Geng, J., Zhang, C., Du, Y., (2016). *Systematic solving of machining deformation and process optimization for complex thin-walled parts*. Procedia CIRP, 56, 167-172.
- Cao, Q., Zhao, J., Han, S., Chen, X., (2011). *Force coefficients identification considering inclination angle for ball-end finish milling*. Precision Engineering, 36(2), 252-260.
- Groover, M.P.,(2015) Modern imalatın prensipleri (Editörler: Yurdakul, M., İç, Y.T.,) Nobel yayımcılık.
- Gülmez T (2020), İmal Usulleri Ders Notları,
<https://web.itu.edu.tr/gulmezt/IMAL%20USULLERI.html> (Ziyaret tarihi:01.07.2020)
- Koca, S., Turkcadcam tasarım imalat teknojileri portalı (2008)
- Layegh, E.L.K., Lazoglu, I., Erdim, H., Effects of Lead and Tilt Angles on Cutting Forces, Torque and Cutting Power in Five-axis Sculptured Surface Milling.
- Lazoglu, I., Boz, Y., Erdim, H., (2011). *Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces*. CIRP annals, 60(1), 117-120.
- Li, Z. L., Tuysuz, O., Zhu, L. M., Altintas, Y., (2018). *Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled parts*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 128, 21-32.
- Li, Z. L., Zhu, L. M., (2019). *Compensation of deformation errors in five-axis flank milling of thin-walled parts via tool path optimization*. Precision Engineering, 55, 77-87.
- Ozturk, E., Tunc, L. T., Budak, E. (2009). *Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul,74s 49(14), 1053-1062.
- Özcan ve ark., (2003). *Küresel uçlu parmak frezelerde kesme kuvvetlerinin cad sistemi ile elde edilmesi*. Makine mühendisleri odası dergisi

- Özkırıklı, Ö. M., (2011). *Mechanical and dynamical process model for general milling tools in multi-axis machining (Doctoral dissertation)*. Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul
- Öztürk, E., (2005) *Modeling of 5- axis miling forces and form errors*. Master of sience. Sabancı University. School of Engineering and Natural Siences. 55s
- Öztürk, E., (2010). *Mechanics and dynamics of multi-axis machining operations (Doctoral dissertation)*. Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul
- Poyraz, Ö., Seçer, O., Songüler, C., Pilatin, S., (2014). Blisk Parçalarının 5 Eksen Kaba Frezeleme Süreçlerinde Çevrimdışı Benzetim, Takım Durumu İzleme ve Kontrol Sistemlerinin Kullanımı.
- Ren, S., Long, X., Meng, G., (2017). *Dynamics and stability of milling thin walled pocket structure*. Journal of Sound and Vibration, 429, 325-347.
- Sai, L., Belguith, R., Baili, M., Dessen, G., Bouzid, W., (2018). *An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling*. Journal of Manufacturing Processes, 34, 7-17.
- Scippa, A., Grossi, N., Campatelli, G., (2014). FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining. Procedia Cirp, 14(HPC), 287-292.
- Shan, C., Lv, X., Duan, W., (2016). Effect of tool inclination angle on the elastic deformation of thin-walled parts in multi-axis ball-end milling. Procedia CIRP, 56, 311-315.
- Sun, C., Altintas, Y., (2016). *Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 106, 89-97.
- Tunç, T. L., (2006). *Geometrical Analysis and Optimization of 5-Axis Milling Processes (Doctoral dissertation)*. Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul,74s
- Tunç, T. L., Budak, E., (2006) *5 Eksen frezeleme süreçlerinin modelleme yoluyla benzetimi ve eniylenmesi*. Timak Tasarım İmalat Analiz Merkezi Balıkesir, 26(28)
- Tuysuz, O., Altintas, Y., Feng, H. Y., (2012). *Prediction of cutting forces in three and five-axis ball-end milling with tool indentation effect*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 66, 66-81.
- Hepyaşar, B., Ensarioğlu, C., Çakır, C., (2012) *Delik delme işlemlerinde ıslah çeliklerinin işlenebilirliğinin incelenmesi*. 3. Ulusal İmalat Talaşlı Sempozyumu, 123-130
- Çakır, M.C.,(2006) Modern talaşlı imalatın esasları Nobel yayın dağıtım.
- <http://www.istanbulkalipmerkezi.com> (Erişim tarihi:20.03.2020)

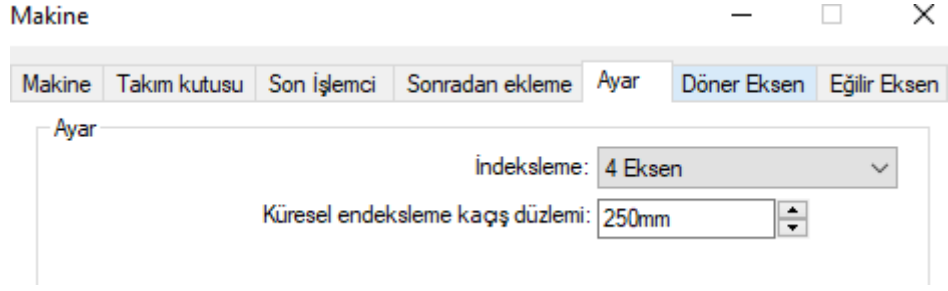
EKLER



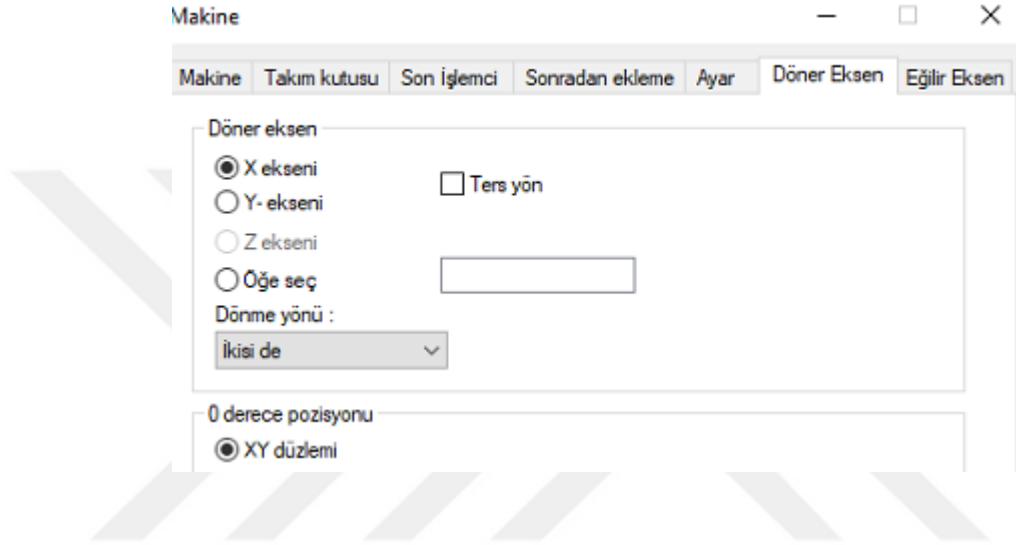
Ek 1. Makine tanıtım sekmesi



Ek 2. Post seçim sekmesi



Ek 3. İşlemin 4 eksen olarak belirlenmesi



Ek 4. Divizörün hangi eksen üzerinde dönüş yapacağını konumlandırılması

İşlem Parametreleri

Takım F/S Profil NC Özellik Seçenekleri Giriş Gelişmiş Sonradan ekleme En

Freze Takımı Freze Tutucu Takım kutusu İstasyon

Takım kullanımı : 15

Takım tipi : Küre Ağzılı

Alt-tip : Kaba & İnce İşle

Kesme çapı (D1) : 3mm

Ara parça çapı (D2) : 3mm

Uc Yarçapı (R) : 1.5mm

Ağız uzunluğu (L2) : 14mm

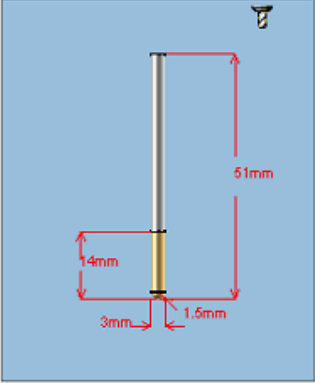
Omuz Uzunluğu (L4) : 14mm

Toplam Uzunluk (L1) : 51mm

Ağız adedi : 2

Takım malzemesi : Carbide

Önizleme



Kesme parametreleri... Kesme yönü

Ek 5. Takım arayüz sayfası

Takım F/S Profil NC Özellik Seçenekleri Giriş Gelişmiş Sonradan ekleme Eniyi

Tanımlayan: İşlem

Kütüphane Sıfırla

İşlem ilişkilendir

İş Mili

SMM : 94.25

Yön: CW CCW

İş mili devri: 10000.00Devir/dak

İş mili hızını sabitle

Besleme Hızları

Dış bağna ilerleme: 0.1mm

XY besleme hızı: 2000.00mm/dak

Z besleme hızı: 500.00mm/dak % : 25

Giriş besleme hızı: 1500.00mm/dak % : 75

Ek 6. Devir arayüz sayfası

İşlem Parametreleri

Takım F/S Profil NC Özellik Seçenekleri Giriş Gelişmiş Sonradan ekleme Eniyile

Yan Parametreler
Pay: 0mm
Ayarlar ... Köşeler ...

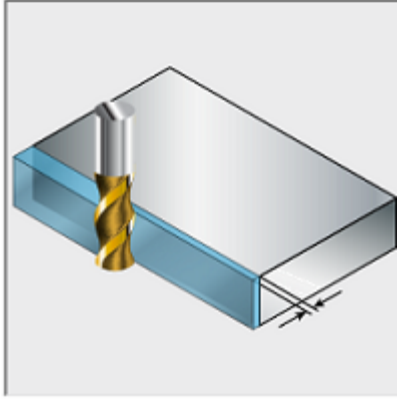
Pah
 Pah İşleme
Açı: 90deg
Uzunluk: 0mm
Açıklık: 1mm
Boyutlandırılmış Şekil Kenarı: Tepe

Kesme Yöntemi
 Eş Yönlü Kesme
 Zıt Yönlü Kesme

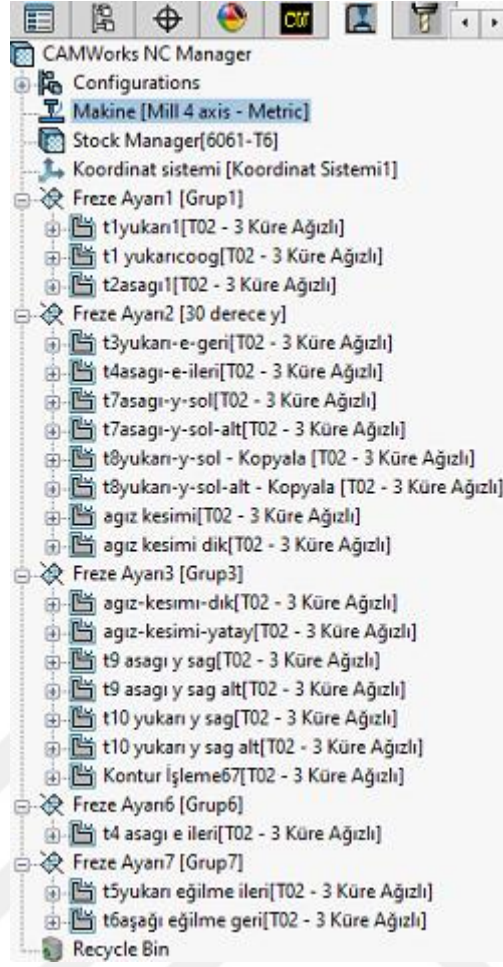
Derinlik İşleme
 Katman bazında
 Katman bazında derinliğe
 Zikzak

Kalan malzemeyi işleme
Yöntem: Hiçbiri
Takım tipi: Düz Uç

Derinlik parametreleri
Yöntem: Eğit
Rampa: Kapalı
Pay: 0mm
% İlk kesim miktarı: 1mm
% Maks. kesim miktarı: 1mm
Son kesim miktarı: 0mm
Açı: 3deg



Ek 7. Kesim parametresi



Ek 8. Yapılan programlar

ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Burak ŞEKER
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 17.06.1991 K.Maraş
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (537) 037 03 75
e-posta : b_seker46@hotmailcom

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gediz/ Endüstri Mühendisliği Bölümü	2014
Lise	Kahramankent Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-2020	Şekermaksan Makine	Endüstri Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TOOL ANGLES AND MILLING DIRECTION RELATIONSHIP IN MULTI-AXIS MILLING

Hobiler

Ata binmek, Kick Boks, Yüzme