

**KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN KRİYOJENİK İŞLEMİN
Ti-6Al-4V ALAŞIMININ DELİNEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Turgay KIVAK

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2012
ANKARA**

Turgay KIVAK tarafından hazırlanan “KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN KRIYOJENİK İŞLEMİN Ti-6Al-4V ALAŞIMININ DELİNEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliğiyle Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Muammer NALBANT
Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ferhat GÜL
Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. İhsan KORKUT
Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Tarih: 07/03/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Turgay KIVAK

**KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN KRIYOJENİK İŞLEMİN Ti-6Al-4V
ALAŞIMININ DELİNEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

(Doktora Tezi)

Turgay KIVAK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mart 2012

ÖZET

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V titanyum alaşımının delinmesinde kesme parametreleri, kesme şartları ve kesici takımlara uygulanan işlemlerin; kesme kuvvetleri, moment, yüzey pürüzlülüğü, delik çapı, dairesellik ve silindiriklikten sapma ile takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kesici takım olarak kaplamasız ve TiAlN/TiN kaplı M42 HSS ile tungsten karbür matkaplar kullanılmıştır. Her iki kesici takım malzemesinde de kaplamasız takımların bir kısmına -145 °C’de 24 saat bekletmek suretiyle kriyojenik işlem diğer bir kısmına ise kriyojenik işlem ardına 200 °C’de iki saat bekletmek suretiyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Dolayısıyla her kesici takım malzemesinden kaplamasız, TiAlN/TiN kaplı, kriyojenik işlem uygulanmış (Kİ) ve kriyojenik işlem ardına temperleme işlemi uygulanmış (KİT) olmak üzere dört farklı takım test edilmiştir. Delme deneylerinde kesme parametreleri olarak HSS ve tungsten karbür takımlar için ayrı ayrı belirlenen dört farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. 5 mm çapında matkaplarla kuru ve ıslak kesme şartları altında CNC dik işleme merkezinde 15 mm derinliğinde boydan boya delikler delinmiştir. Ayrıca kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına uygulanan temperleme işleminin işlemsiz takımlara

göre mikroyapıda meydana getirdiği değişimleri belirlemek amacıyla SEM analizleri yapılmıştır.

Mikroyapı incelemeleri, HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlemin, karbür boyutlarını küçülterek homojen karbür dağılımı sağladığını ve geleneksel ısıtma işlem sonrası yapıdaki kalıntı östeniti martensite dönüştürdüğünü göstermiştir. Ayrıca kriyojenik işlem sonrası yapılan temperleme işlemi ile küçük ikincil karbürlerin yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Tungsten karbür takımlarda ise kriyojenik işlem ve temperleme işlemi eta karbürlerinin yoğunluğunu artırmıştır. Mikroyapıdaki bu değişimler kesici takımların sertlik ve aşınma direncinin artmasında önemli bir rol oynamıştır.

Delme deneyleri sonucunda, soğutma sıvısı kullanımının kesme kuvvetleri ve moment dışındaki tüm deney çıktıları üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu görülmüştür. Özellikle her iki kesici takım malzemesinde de takım ömründe önemli artışlar sağlamıştır. Hem HSS hemde tungsten karbür takımlar için delik kalitesi ve takım ömrü açısından en iyi sonuçlar TiAlN/TiN kaplı takımlardan alınmıştır. Kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işleminin HSS ve tungsten karbür takımların işleme performansını arttırmada önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür. Islak kesme şartlarında KİT HSS ve tungsten karbür takımlar işlemsiz takımlara göre takım ömründe sırasıyla %87 ve %83 ömür artışı sağlamıştır. İşleme çıktıları üzerindeki etkileri göz önüne alındığında kriyojenik işlemin HSS takımlar üzerindeki etkisinin karbür takımlara göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Ti-6Al-4V, delme, kriyojenik işlem, delik kalitesi, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri, moment, takım aşınması, takım ömrü, mikroyapı, mikrosertlik
Sayfa Adedi : 205
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CRYOGENIC TREATMENT
APPLIED ON CUTTING TOOLS ON DRILLABILITY Ti-6Al-4V ALLOY**

(Ph.D. Thesis)

Turgay KIVAK

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
March 2012**

ABSTRACT

In this study, for the drilling of Ti-6Al-4V titanium alloy, the effects of cutting parameters, cutting conditions and of the processes (applied to the cutting tools) on the cutting forces, momentum, surface roughness, hole diameter, deviation from circularity and cylindricity, tool wear and tool life were investigated. As the cutting tool, uncoated and TiAlN/TiN coated M42 HSS and tungsten carbide drills were used. On both of the two cutting tool materials, part of the uncoated tools was cryogenically treated at -145 °C for 24h and the other part was tempered at 200 °C for 2h right after the cryogenic treatment. Hence, four different tools (uncoated, TiAlN/TiN coated, cryogenically treated, and tempered) from every cutting tool material were tested. In the drilling tests, for HSS and tungsten carbide tools, the cutting parameters of four different cutting speed and three different feed rate were used. At the CNC vertical machining center longitudinal holes of 15 mm depth were drilled with 5mm diameter drills under dry and wet cutting conditions. Additionally, SEM analyses were made in order to determine the changes in the microstructure caused by cryogenic treatment and tempering with respect to the uncoated tools.

Microstructure examinations showed that cryogenical and tempering treatments reduced the carbide sizes and provided homogeneous carbide

distribution and converted the retained austenite to martensite after the conventional heat treatment. Furthermore, it was observed that the intensity of secondary carbides increased with tempering which was made after the cryogenical treatment. Whereas in the tungsten carbide tools, cryogenical and tempering treatments increased the intensity of eta carbides. These changes in the microstructure played a significant role in the increase of hardness and wear resistance of cutting tools.

At the end of the drilling tests, it was observed that the use of cooling liquid had a positive effect on the test outputs except cutting forces and momentum. Especially, significant increases were obtained in tool life for both of the cutting tool materials. For both of HSS and tungsten carbide tools the best results from the aspect of hole quality and tool life were obtained with TiAlN/TiN coated tools. It was observed that cryogenical and tempering treatment had significant effects in increasing the machining performance of HSS and tungsten carbide tools. In wet cutting conditions cryogenically treated and tempered HSS and tungsten carbide tools provided 87% and 83% life increase with respect to the untreated tools. When taking into consideration the effects on the machining outputs, the effects of cryogenical treatment on HSS tools were much more than the effects on carbide tools.

Science Code	: 708.3.028
Key Words	: Ti-6Al-4V, drilling, cryogenic treatment, hole quality, surface roughness, cutting forces, torque, tool wear, tool life, microstructure, microhardness
Page Number	: 205
Adviser	: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca kıymetli tecrübelerinden faydalandığım, engin bilgisi, değerli yardım ve katkıları ile beni yönlendiren saygıdeğer hocam ve danışmanım Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımını esirgemeyen hocam Doç. Dr. Adem ÇİÇEK'e, çalışmalarımda emeği geçen arkadaşlarım Öğr. Gör. Harun GÜL, Öğr. Gör. Abdurrahman ÇETİN ve Arş. Gör. Gültekin UZUN'a, teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca 07/2010-38 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı'na da teşekkür ederim.

Son olarak maddi-manevi her konuda bana destek olan sevgili eşime ve çalışmalarımın yoğunluğu sebebiyle yeterince ilgilenemediğimi düşündüğüm sevgili kızıma sevgi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxi
1. GİRİŞ	1
2. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI.....	4
2.1. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	6
2.1.1. Saf titanyum	7
2.1.2. Alfa titanyum alaşımları.....	8
2.1.3. Yakın alfa (near α) titanyum alaşımları	9
2.1.4. Alfa-Beta titanyum alaşımları	10
2.1.5. Metastabil-beta titanyum alaşımları.....	12
2.1.6. Beta titanyum alaşımları	13
2.2. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Uygulama Alanları	14
3. DELİK DELME.....	16
3.1. Delik Delme İşleminin Diğer Talaşlı Kaldırma Yöntemleri Arasındaki Yeri	16
3.2. Delik Delme İşlemi.....	18

Sayfa

3.3. Temel Tanımlar.....	20
3.4. Talaş Oluşumu ve Kesme Sıvısı.....	22
3.4.1. Talaş oluşumu.....	22
3.4.2. Kesme sıvısı	27
3.5. Delme İşlemlerinde Kesme Kuvvetleri ve Güç.....	29
3.6. Kesici Uç Aşınması	31
3.7. Dairesellik	34
4. KRIYOJENİK İŞLEM	36
4.1. Kriyojenik İşlemin Gelişimi.....	36
4.2. Kriyojenik İşlemin Uygulanması	38
4.3. Kriyojenik İşlemin Etkileri	39
4.4. Kriyojenik İşlemin Endüstriyel Uygulamaları	39
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	40
5.1. Ti-6Al-4V ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği ile İlgili Yapılan Çalışmalar	40
5.2. Kriyojenik İşlem ile İlgili Yapılan Çalışmalar	53
5.3. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi	73
6. MALZEME VE METOT	76
6.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme	76
6.2. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı.....	76
6.3. Deneylerde Kullanılan Kesici Takımlar ve Kesme Parametreleri	77
6.4. Kesici Takım Kaplama Malzemeleri	78
6.5. Kriyojenik İşlem ve Temperleme	79

Sayfa

6.6. Islak Kesme Deneylerinde Kullanılan Soğutma Sıvısı.....	80
6.7. Bağlama Kalıbı Tasarımı ve İmalatı.....	81
6.8. Deney Sayısı ve Deliklerin Deney Numuneleri Üzerindeki Dağılımı	81
6.9. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi	83
6.10. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi.....	86
6.11. Delik Çap, Dairesellik ve Silindirikliğinin Kontrolü.....	88
6.12. Mikrosertlik Ölçümleri	90
6.13. Mikroyapı İncelemeleri.....	91
6.14. Takım Aşınmasının Belirlenmesi	91
6.15. Deneysel Çalışma Değerlendirme Esasları	92
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	94
7.1. Mikrosertliğin Değerlendirilmesi	94
7.2. Mikroyapı Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	96
7.2.1. HSS matkaplar	96
7.2.2. Tungsten karbür matkaplar.....	98
7.3. Takım Aşınması ve Takım Ömrünün Değerlendirilmesi	102
7.3.1. HSS matkaplar	102
7.3.2. Tungsten karbür matkaplar.....	107
7.3.3. Genel değerlendirme	114
7.4. HSS Matkaplar	114
7.4.1. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi	115
7.4.2. Momentlerin değerlendirilmesi	120
7.4.3. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi	125

Sayfa

7.4.4. Delik çaplarının değerlendirilmesi	131
7.4.5. Dairesellikten sapmanın değerlendirilmesi	136
7.4.6. Silindiriklikten sapmanın (Eksenel kaçıklık) değerlendirilmesi	141
7.5. Tungsten Karbür Matkaplar	145
7.5.1. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi	145
7.5.2. Momentlerin değerlendirilmesi	150
7.5.3. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi	155
7.5.4. Delik çaplarının değerlendirilmesi	160
7.5.5. Dairesellikten sapmanın değerlendirilmesi	164
7.5.6. Silindiriklikten sapmanın (Eksenel kaçıklık) değerlendirilmesi	168
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	173
8.1. Sonuçlar	173
8.2. Öneriler	177
KAYNAKLAR.....	179
EKLER.....	193
EK-1 Deneylerde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımına ait malzeme sertifikası	194
EK-2 Deney girdilerine bağlı olarak elde edilen deney ıktıları	195
ÖZGEçMİş.....	203

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Beta titanyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları	13
Çizelge 3.1. Takım aşınmaları, muhtemel sebepler ve çözümler	33
Çizelge 6.1. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)	76
Çizelge 6.2. Ti-6Al-4V alaşımının fiziksel özellikleri.....	76
Çizelge 6.3. Deneylerde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri.....	77
Çizelge 6.4. Kesici takım özellikleri ve kesme parametreleri	77
Çizelge 6.5. Kaplama özellikleri	78
Çizelge 6.6. Kriyojenik işlem uygulanmadan yapılan deney sayısı	82
Çizelge 6.7. Kriyojenik işlem uygulanarak yapılan deney sayısı.....	82
Çizelge 6.8. Kriyojenik işlem ardına temperleme uygulanarak yapılan deney sayısı.....	82
Çizelge 6.9. 9633 seri numaralı Mohr Perthometer M1 yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri	87
Çizelge 6.10. Ölçümlerin yapıldığı tezgâha ait teknik özellikler	89
Çizelge 6.11. Aşınma deneylerinde kullanılan kesici takımlar ve kesme parametreleri.....	92
Çizelge 6.12. Deney girdi parametrelerine bağlı olarak elde edilen çıktılar.....	93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yoğunluk bakımından titanyumun bazı metallerle karşılaştırılması	4
Şekil 2.2. Seçilen yapısal malzemelerle titanyum alaşımlarının sıcaklıkla özgül dayanımlarının karşılaştırılması	5
Şekil 2.3. HSP α ve HMK β fazlarının kristal yapısı.....	6
Şekil 2.4. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılmasında üç boyutlu faz diyagramı	7
Şekil 2.5. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması ve sınıflar arasında değişen özellikler	12
Şekil 2.6. Titanyum alaşımlarının bazı özelliklerine bağlı olarak değişen uygulama alanları	15
Şekil 3.1. İşlem sayısına göre delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması	16
Şekil 3.2. Talaş kaldırma süresine göre delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması.....	17
Şekil 3.3. Takımın dönmesi (v); ilerlemesi (u).....	17
Şekil 3.4. Çap uzunluk ilişkisi	19
Şekil 3.5. Delme işlemleri (1) Tek operasyonda delme işlemi, (2) Ön delik delme işleminden sonra yapılan delme işlemi.....	20
Şekil 3.6. Kesme hızı-ilerleme hızı.....	21
Şekil 3.7. Delme işlemlerinde temel tanımlar a) Talaş kesit alanı, b) Kesici kenar başına ilerleme	22
Şekil 3.8. Delik yüzeyi a) İyi bir talaş boşaltması yapılmış delik b) Talaş sıkışmasından etkilenmiş delik	23
Şekil 3.9. Kesme ve ilerleme hızına bağlı olarak talaş şeklindeki değişim	23
Şekil 3.10. Matkabin çevresinde aşırı kesme hızı	24

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. Talaş oluşumuna etki eden faktörler	25
Şekil 3.12. Kesici kenarın talaş kaldırması	26
Şekil 3.13. Çapa bağlı basınç ve debi ilişkisi a) basınç çap ilişkisi, b) debi çap ilişkisi	26
Şekil 3.14. Soğutma sıvısının kesme bölgesine doğru bir şekilde yönlendirilmesi.....	28
Şekil 3.15. Matkapla delmede kesme kuvvetleri.....	29
Şekil 3.16. Helisel matkaplarda oluşan aşınma mekanizmaları a) Köşelerin yuvarlanması, b) Serbest yüzey aşınması c) Zırh aşınması.....	31
Şekil 3.17. Serbest yüzeyde oluşan aşınmanın gösterimi	32
Şekil 3.18. Dairesellik a) dairesellikten sapma, b) delik merkezinin belirlenmesi	35
Şekil 4.1. Kriyojenik işlemin uygulandığı sistemin şeması	38
Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan HSS ve tungsten karbür matkapların boyutları	77
Şekil 6.2. TiAlN/TiN çok katlı kaplama yapısı.....	78
Şekil 6.3. Kaplamasız HSS ve sementit karbür takımlara uygulan kriyojenik işlem ve temperleme işleminin şematik gösterimi (R) Herhangi bir işlem uygulanmamış (Referans matkap) (Kİ) Kriyojenik işlem uygulanmış (KİT) Kriyojenik işlemin ardından temperleme işlemi uygulanmış	79
Şekil 6.4. Kriyojenik işlemin uygulandığı sistemin şeması	80
Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan bağlama kalıbı ve dinamometre üzerindeki gösterimi	81
Şekil 6.6. Deliklerin deney numunesi üzerindeki dağılımı	83
Şekil 6.7. 9257-A tipi dinamometrenin teknik özellikleri	85
Şekil 6.8. 5070A01100 tip amplifier'ın teknik özellikleri	85

Şekil	Sayfa
Şekil 6.9. Eksenel kuvvet ve momentin DynoWare programındaki grafik görüntüsü	86
Şekil 6.10. Dairesellik ölçümleri a) Dairesellikten sapma b) LSC (Least squares circle).....	90
Şekil 7.1. M42 HSS kesici takımlara uygulanan işlemlere bağlı olarak mikrosertlik değerlerindeki değişimler.....	94
Şekil 7.2. Tungsten karbür kesici takımlara uygulanan işlemlere bağlı olarak mikrosertlik değerlerindeki değişimler.....	95
Şekil 7.3. HSS takımlarda mikroyapı değişimi a) İşlem uygulanmamış, b) Kriyojenik işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem+temperleme işlemi uygulanmış (M ₆ C ve MC)	97
Şekil 7.4. Tungsten karbür takımlarda η-fazı değişimi a) İşlem uygulanmamış, b) Kriyojenik işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem+temperleme işlemi uygulanmış (600X)	100
Şekil 7.5. Tungsten karbür takımlarda α ve β fazı değişimi a) İşlem uygulanmamış, b) Kriyojenik işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem+temperleme işlemi uygulanmış (4000X)	101
Şekil 7.6. Kuru kesme şartlarında, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında test edilen dört farklı takımın SEM görüntüleri a) İşlemsiz, b) TiAlN/TiN kaplamalı, c) Kİ, d) KİT	103
Şekil 7.7. Islak kesme şartlarında, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında dört farklı takım arasında delik sayısı ile yanak aşınmasındaki değişim.....	104
Şekil 7.8. Islak kesme şartlarında, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında test edilen dört farklı takımın SEM görüntüleri a) Kaplamasız, b) TiAlN/TiN kaplamalı, c) Kİ, d) KİT	105
Şekil 7.9. 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında dört farklı takım arasında kesme şartlarına bağlı olarak takım ömründeki değişim	107
Şekil 7.10. Kuru kesme şartlarında 30 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında, dört farklı takım arasında, delik sayısına bağlı olarak yanak aşınmasındaki değişim	108

Şekil	Sayfa
Şekil 7.11. Islak kesme şartlarında 45 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında, dört farklı takım arasında, delik sayısına bağlı olarak yanak aşınmasındaki değişim	109
Şekil 7.12. Kuru kesme şartlarında, 30 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında test edilen dört farklı takımın SEM görüntüleri a) Kaplamasız, b) TiAlN/TiN kaplamalı, c) Kİ, d) KİT	110
Şekil 7.13. Kuru kesme şartlarında test edilen kaplamasız ve TiAlN/TiN kaplı takımlarda delik sayısı ile aşınmadaki değişim	111
Şekil 7.14. Islak kesme şartlarında, 45 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında test edilen dört farklı takımın SEM görüntüleri a) Kaplamasız, b) TiAlN/TiN kaplamalı, c) Kİ, d) KİT	112
Şekil 7.15. 0,06 mm/dev ilerleme hızında dört farklı takım arasında kesme hızı ve kesme şartlarına bağlı olarak takım ömründeki değişim	113
Şekil 7.16. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki kesme kuvveti değişimleri a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev	116
Şekil 7.17. Kaplamasız HSS matkapların 8 m/dak kesme hızında 0,05 mm/dev ilerlemede üç delik sonundaki makro fotoğrafları a) Kuru kesme şartlarında b) Islak kesme şartlarında	118
Şekil 7.18. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme	119
Şekil 7.19. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki moment değişimleri a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev	122
Şekil 7.20. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak momentteki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme	124
Şekil 7.21. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki yüzey pürüzlülüğü değişimleri a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev	127

Şekil	Sayfa
Şekil 7.22. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	130
Şekil 7.23. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki farklı takım ile delinen deliklerin çaplarındaki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev	133
Şekil 7.24. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak delik çaplarındaki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	135
Şekil 7.25. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki dairesellikten sapma değerlerindeki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev	137
Şekil 7.26. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak dairesellikten sapmadaki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	140
Şekil 7.27. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki silindiriklikten sapma değerlerindeki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev	142
Şekil 7.28. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak silindiriklikten sapmadaki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	144
Şekil 7.29. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki eksenel kuvvet değerlerindeki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev	146
Şekil 7.30. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	149
Şekil 7.31. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki moment değerlerindeki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev	151
Şekil 7.32. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak momentlerdeki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	154

Şekil	Sayfa
Şekil 7.33. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev	156
Şekil 7.34. Kaplamasız takımların 30 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında üç delik sonundaki makro görüntüleri a) kuru kesme şartları b) ıslak kesme şartları	157
Şekil 7.35. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	159
Şekil 7.36. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki delik çaplarındaki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev	161
Şekil 7.37. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak delik çaplarındaki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	163
Şekil 7.38. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki dairesellikten sapmadaki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev	165
Şekil 7.39. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak dairesellikten sapmadaki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	167
Şekil 7.40. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki silindiriklikten sapmadaki değişimler a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev	169
Şekil 7.41. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak silindiriklikten sapmadaki değişim I) Kuru kesme, II) Islak kesme.....	172

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Delik eksenine paralel kesilen deney numuneleri ve R_a ölçümleri.....	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Talaş kesit alanı, mm ²
a_p	Radyal talaş derinliği, mm
D	Takım çapı, mm
f	Devir başına ilerleme, mm/dev
F_a	Eksenel kuvvet, N
fcc	Yüzey merkezli kübik kafes
F_{rz}	Radyal kuvvet, N
F_{sz}	Kesme kuvveti, N
F_{vz}	İlerleme kuvveti, N
fz	Kenar başına ilerleme, mm/z
h₁	Deformasyona uğramış talaş kalınlığı, mm
h₂	Teorik talaş kalınlığı, mm
k_s	Düzeltilme faktörü, N/mm ²
L	İlerleme uzunluğu, mm
Mc	Burulma momenti (tork), Ncm
M_s	Toplam kesme momenti, Nm
n	Devir sayısı, dev/dak
p	Çevresel kesme hızı, m/dak
T	Efektif işleme zamanı, dak
u	Takımın ilerlemesi, mm/dev
v	Takımın dönmesi, dev/dak
V_c	Kesme hızı, m/dak
V_f	İlerleme hızı, mm/dak
z	Kesici kenar sayısı
Φ	Matkap uç açısı, derece

Kısaltmalar	Açıklama
AWJ	Abresive Water Jet (Aşındırıcı Su Jeti)
BCBN	Binderless Cubic Boron Nitride (Bağlayıcısız Kubik Bor Nitür)
BUE	Built-up Edge (Talaş yapışması ve sıvanması)
CBN	Cubic Bor Nitride (Kübik Bor Nitür)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic (Karbon Fiber Takviyeli Plastik)
CMM	Coordinate Measuring Machine (Koordinat ölçme cihazı)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı sayısal denetim)
CP	Commercial Pure (Ticari saflıkta)
CT	Cryogenic Treatment (Kriyojenik İşlem)
CTT	Cryogenic treatment and tempering (kriyojenik işlem+temper)
CVD	Chemical Vapour Deposition (Kimyasal buhar çökeltme)
FMS	Flexible Manufacturing System (Esnek üretim sistemi)
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HRc	Malzemenin Rockwell sertlik değeri, N/mm ³
HSP	Hekzoganal Sıkı Paket
HSS	High Speed Steel (Yüksek hız çeliği)
Kİ	Kriyojenik İşlem
KİT	Kriyojenik İşlem+Temperleme
MDF	Medium Density Fiberboard (Orta yoğunlukta lif levha)
MRS	Minimum Radyal Sapma
NC	Numerical Control (Nümerik kontrol)
PLC	Programmable Logic Controller (Programlanabilir mantıksal denetleyici)
PVD	Physical Vapour Deposition (Fiziksel buhar çökeltme)
RFWM	Reciprocatory Friction and Wear Monitor (Karşılıklı Sürtünme ve Aşınma Monitörü)
SEM	Scanning Electron Microscope (Tarama elektron mikroskobu)

Kısaltmalar	Açıklama
TIR	Toplam İbre Okuma
UT	Untreated (işlemsiz)
V_{BB}	Yanak aşınma alanı genişliği, mm
XRD	X-Ray Diffraction (X-ışını difraksiyon analizi)
YKDD	Yüksek Kromlu Dökme Demir

1. GİRİŞ

Son yıllarda, teknolojinin hızlı gelişmesi hem malzemeler hem de bu malzemelerin kullanılabilir ürün haline getirilmesinde uygulanan yöntemler üzerindeki beklentileri artırmaktadır. Özellikle elektronik, bilgisayar, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde mukavemetli ve hafif malzemelere olan ihtiyaçlar giderek artmaktadır. Titanyum ve alaşımları sahip oldukları, düşük yoğunluk, yüksek dayanım, ısı ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı, bu beklentilerin büyük bir kısmını karşılamaktadır. Titanyum alaşımları yüksek maliyetleri ile bilinseler de yukarıda bahsedilen özellikleri bir arada bulundurabilmeleri sayesinde diğer malzemelerden ayrılırlar [1-3].

Farklı özelliklere sahip olan bu alaşımlar içerisinde, endüstriyel uygulamalardaki yaklaşık %60'lık kullanım alanıyla, en büyük payı Ti-6Al-4V alaşımı almaktadır. Bu alaşım yüksek yorulma ve korozyon direnci ile yüksek dayanım ve biyouyumluluk özelliğine sahip olması nedeniyle özellikle havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere daha birçok endüstri dalında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Tüm geleneksel talaş kaldırma yöntemlerinin uygulanabildiği Ti-6Al-4V alaşımı, kimyasal reaktifliğinin ve kesici takıma kaynak olma eğiliminin yüksek olması, ısı ile iletkenliğinin düşük olması, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruması ve sahip olduğu düşük elastikiyet modülü nedeniyle işlenmesi zor malzemeler grubuna girmektedir. Bununla beraber malzemenin üretim maliyeti yüksek olduğu için, işlenmesi esnasındaki hatalar ciddi maddi kayıplara neden olmaktadır [4-6].

Kriyojenik işlem, genellikle yüksek aşınmaya maruz kalan malzemelerde aşınma direncini artırma amacıyla uygulanan ısıl işlemi tamamlayıcı bir işlemdir. Sıfır altı işlem olarak da bilinmektedir. Kaplamaların aksine parçanın tüm bölümünü etkileyen, bir kereye mahsus yapılan ucuz ve kalıcı bir işlemdir. Kriyojenik işlem, malzeme üzerindeki uygulama sıcaklıklarına bağlı olarak sığ kriyojenik işlem (-50 ile -80 °C arasında) ve derin kriyojenik işlem (-125 °C'den daha düşük sıcaklıklar) olarak sınıflandırılmaktadır. Isıl işlem sonrası malzemeler sığ ya da derin kriyojenik işlem sıcaklıklarında belirlenen bir bekletme süresinde tutularak oda sıcaklığına

kadar kademeli olarak getirilmektedir. Bu yöntem ile geleneksel ısıtma işlemi uygulanmış malzeme içerisindeki kalıntı östenitin martensite dönüşmesi, ince karbür çökeltilerinin oluşumu ve homojen karbür dağılımı sağlanmaktadır. Böylece malzemelerin sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerinde ciddi iyileşmeler elde edilmektedir. Önceleri kalıp malzemelerine uygulanan kriyojenik işlem günümüzde işlenebilirlik çalışmalarında kesici takımlara uygulanarak, takım aşınması, takım ömrü ve kesme şartlarının iyileşmesi yönünde ciddi gelişmeler sağlanmıştır. Özellikle bazı takım malzemelerine uygulanan kriyojenik işlem ile takım ömründe %91'lerden %817'lere varan iyileşmelerin olduğu ifade edilmektedir [7-10].

Matkapla delme işlemi, diğer talaş kaldırma işlemleri içerisinde oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Literatürde, titanyum alaşımlarının işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların genellikle frezeleme ve tornalama üzerine yoğunlaştığı ve matkapla delme üzerine yapılan çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Matkapla delme işleminin, diğer talaşlı imalat usullerine göre daha zor şartlar altında meydana geldiği, özellikle havacılık ve uzay sanayinde diğer talaşlı imalat işlemlerinden daha geniş uygulama alanına sahip olduğu düşünülürse titanyum alaşımlarının delinebilirliği üzerine çalışma yapmanın bir gereklilik olduğu anlaşılmaktadır [11].

Ti-6Al-4V alaşımı üzerindeki delme işlemi ile ilgili işlenebilirlik çalışmalarında, işleme sürecindeki problemlerin giderilerek işleme maliyetlerinin düşürülmesi geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılan bu malzemeyi işlemek durumunda kalan işletmelere kullanabilecekleri teknolojik veri sağlaması açısından büyük önem arz etmektedir. Titanyum alaşımları içerisinde, işlenebilirliği en zor alaşımlardan birinin Ti-6Al-4V alaşımı olması ve üretim maliyetinin yüksek olması bunun önemini doğrular niteliktedir.

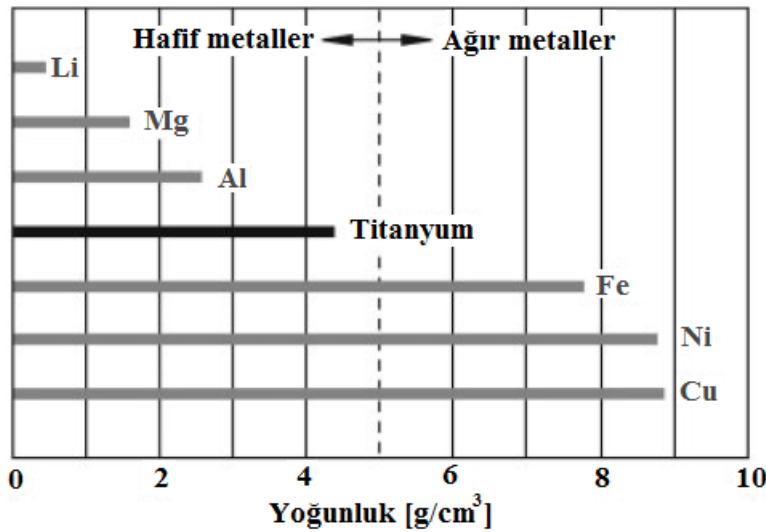
Kesici takım ömründe ciddi iyileşmelerin sağlandığı kriyojenik işlemin Ti-6Al-4V alaşımının işlenebilirliği üzerindeki etkileri araştırılmamıştır. Ayrıca delme işleminde, kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımlarla birlikte soğutma sıvısı

kullanımının kesme şartları üzerinde nasıl bir etki bırakacağı da bilinmemektedir. Kriyojenik işlem uygulanan kesici takımların, performansını arttırmaya yönelik çalışmaların sayısının çok az olması ve işlenmesi zor malzemeler üzerinde denenmemiş olması nedeniyle kriyojenik işlem uygulanan kesici takımlarla bu tür malzemelerin işlenebilirliği üzerine çalışma yapmanın önemli bir yer tutacağına inanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı bu çalışmada, kesme parametrelerinden kesme hızı ve ilerlemenin farklı kombinasyonlarının, Ti-6Al-4V alaşımının kuru ve ıslak kesme şartları altında kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış yüksek hız çeliği ve tungsten karbür matkaplarla delinmesinde; kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, delik kalitesi ve takım ömrü üzerindeki etkileri incelenerek optimum delme şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI

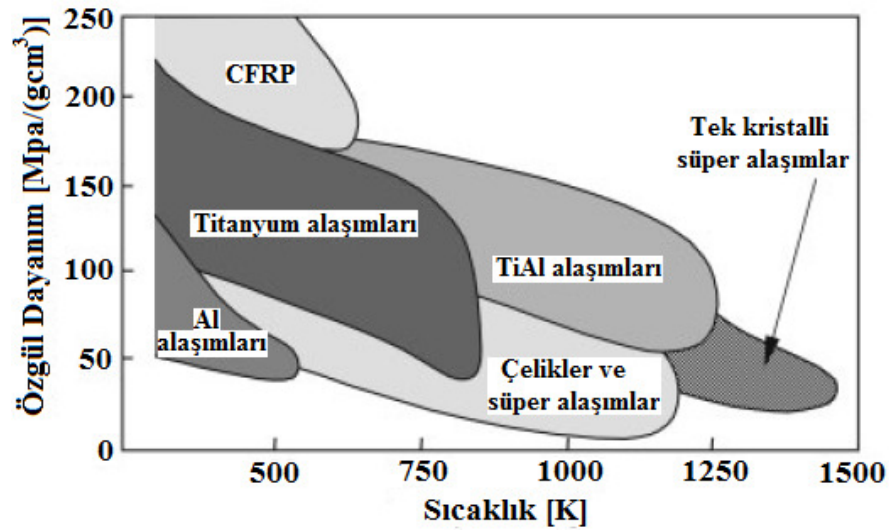
Titanyum, mükemmel korozyon direnci, yüksek dayanım-ağırlık oranı ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahip olan nispeten hafif bir metaldir. 1380 MPa'a kadar olan dayanım $4,505 \text{ gcm}^{-3}$ yoğunlukla kombine olarak mükemmel mekanik özellikler sağlarken $535 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında yapışkan, koruyucu TiO_2 filmi korozyona karşı mükemmel direnç ve birikinti sağlar. $585 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde ise oksit filmi kırılır ve karbon, oksijen, azot, hidrojen gibi küçük atomlar titanyumu kırılganlaştırır [12]. Şekil 2.1'de yoğunluk bakımından titanyumun çeşitli metallerle karşılaştırılması görülmektedir. 5 gcm^{-3} 'den daha yüksek yoğunluğa sahip olanlar ağır metaller, daha düşük yoğunluğa sahip olanlar ise hafif metaller olarak sınıflandırılmıştır. Şekilden $4,505 \text{ gcm}^{-3}$ yoğunluk değeriyle titanyumun en ağır hafif metal olduğu görülmektedir [13].



Şekil 2.1. Yoğunluk bakımından titanyumun bazı metallerle karşılaştırılması [13]

Titanyum, alüminyumdan %60 daha ağır olup alaşımlı çeliklerden ise %56 daha hafiftir. Alaşımlı çeliklerden daha hafif olmasına karşın dayanım özellikleri alüminyum ve çeliklerden daha yüksektir. Isıl iletkenliği $7,1 \text{ W/m }^{\circ}\text{K}$ 'dır ve bu değer demirinkinin yaklaşık beşte birine eşittir. Ergime sıcaklığı ise demirin ergime sıcaklığından yaklaşık $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ yüksek olup $1670 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir [14]. Titanyum alaşımlarının

öncelikli göze çarpan iki özelliği vardır. Bunlar yüksek özgül dayanım ve mükemmel korozyon direncidir. Bu özelliklerinden dolayı havacılık sektörü, kimya endüstrisi, medikal sanayi ve diğer sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de bazı yapısal malzemelerle titanyum alaşımlarının, sıcaklıkla özgül dayanımlarındaki değişimler karşılaştırılmıştır. Şekilden, titanyum alaşımlarının birçok alaşıma göre daha yüksek özgül dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda titanyum alaşımlarının özgül dayanımları dikkat çekicidir. Ancak maksimum uygulama sıcaklıkları onların oksidasyon davranışları ile sınırlıdır. Şekil 2.2’deki alaşımlar arasında 300 °C’nin altındaki sıcaklıklarda yalnızca karbon fiber takviyeli plastiklerin (CFRP) titanyum alaşımlarından daha yüksek özgül dayanıma sahip olduğu görülmektedir [13].

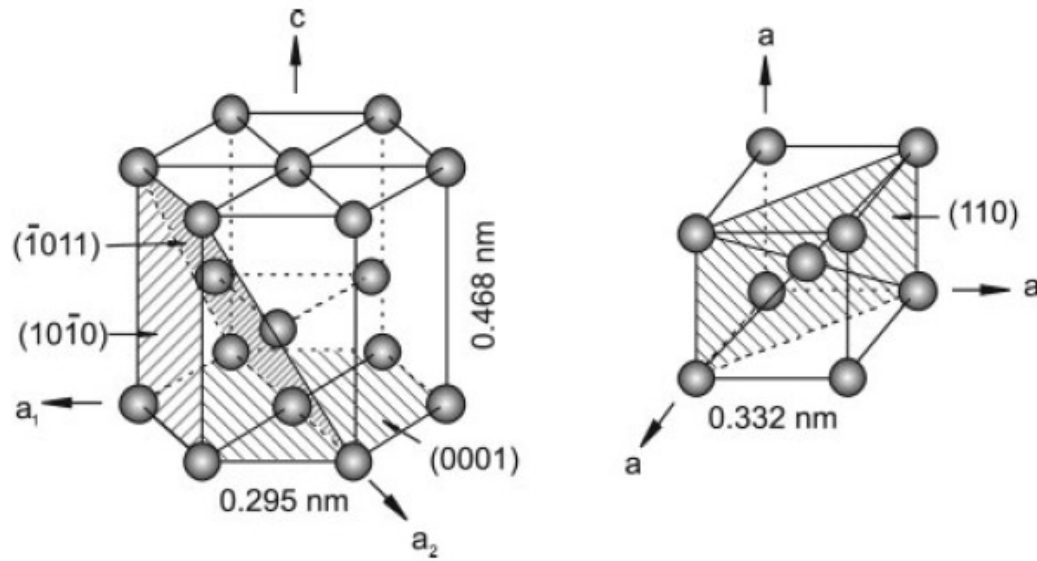


Şekil 2.2. Seçilen yapısal malzemelerle titanyum alaşımlarının sıcaklıkla özgül dayanımlarının karşılaştırılması [13]

Dünyadaki titanyum üretimi çelik üretimi ile karşılaştırıldığında çok düşüktür. Üretilen titanyumun %80’i havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır [15]. Titanyum ve alaşımlarının maliyetleri yaygın olarak kullanılan metallerden daha fazladır. Çünkü bunların cevherlerinde üretimleri çok zordur ve üretimlerinde çok gelişmiş ergitme ve uygulama teknikleri kullanılmalıdır. Titanyum alaşım fabrikasyonunun yüksek maliyeti, prensip olarak bu metalin yüksek reaktifliği ile oksijen, azot, hidrojen ve karbon için duyarlılığının bir sonucudur [12].

2.1. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

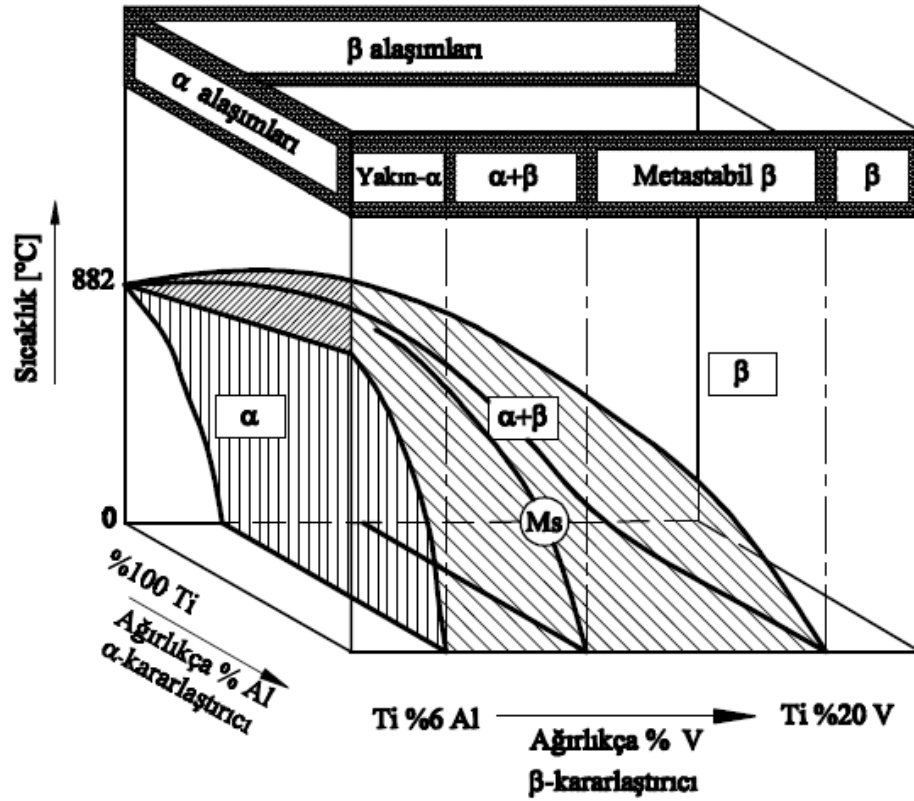
Titanyum alaşımları, saf (%99-100 Ti), alfa alaşımlar (%90-95 Ti), alfa-beta alaşımlar (%80-90 Ti) ve beta alaşımlar (%80<Ti) olmak üzere dört ana grup altında sınıflandırılabilir. Ayrıca bu alaşımlara yakın- α ve metastabil- β alaşımları da ilave edilebilir. Saf titanyum 882 °C'ye kadar alfa (α) olarak bilinen HSP (Hekzoganal Sıkı Paket) kristal kafes yapısına sahiptir. Bu sıcaklığın üstünde metal, allotropik dönüşüm sonucu beta (β) olarak adlandırılan HMK (Hacim Merkezli Kübik) kristal yapısına dönüşür. Şekil 2.3'te HSP kristal kafes yapısına sahip α ve HMK kristal yapısına sahip β alaşımlarının en yoğun paket düzlemleri ve yönleri belirtilmiştir. Bazen beta geçiş sıcaklığı olarak adlandırılan dönüşüm sıcaklığı, impüriteler varlığı ya da özelliklerini iyileştirmek için yapılan alaşımlamanın sonucu olarak etkilenir. [13,16].



Şekil 2.3. HSP α ve HMK β fazlarının kristal yapısı [13]

Şekil 2.4'te α ve β kararlaştırıcı elementlerine ait iki faz diyagramının birleşiminden oluşan üç boyutlu faz diyagramı, şematik olarak gösterilmiştir. Faz diyagramına göre α alaşımları, ticari saflıktaki titanyum ile yalnızca α kararlaştırıcı ve/veya doğal elementlerle alaşımlanmış alaşımları içermektedir. $\alpha+\beta$ alaşımları çok geniş kullanım alanına sahip alaşım grubu olup, bu alaşımlar oda sıcaklığında yaklaşık %5-40

arasında β içermektedir. Bir düzeye kadar β kararlaştırıcı elementlerinin miktarı artırıldığında, hızlı soğutma ile daha fazla β martensite dönüşmektedir.



Şekil 2.4. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılmasında üç boyutlu faz diyagramı [13]

Bir α alaşımı, yalnızca çok az miktarda β fazı içerebilir. Bir $\alpha+\beta$ alaşımı, α ve dönüşmüş β 'dan meydana gelir. Metastabil bir β alaşımı ise oda sıcaklığına soğutulduğunda kalıntı β fazı oluşumuna yönlenecek, fakat ısıtılma ile ince α fazı çökelecektir [1].

2.1.1. Saf titanyum

Ticari saflıktaki titanyum (CP) minimum %98,5-99,5 arasında değişen oranlarda titanyum içermektedir. Korozyon dirençleri yüksektir, ancak, mukavemetleri alaşımlı titanyumlara göre daha düşüktür. Soğuk çalışma ortamlarında tercih edilir. Aslında, saf titanyum, büyük oranda kullanıldığı çevrelerin gözüyle bakılırsa, çok değerli bir

malzeme değildir. Tercih edilmesini sağlayan, asıl özelliklerini düşük oranlarda eklenen alaşım elemanları ile kazanmasıdır. CP titanyum mükemmel korozyon direncine sahip olması nedeniyle tercih edilmekte ve özellikle yüksek dayanım gerektirmeyen yerlerde kullanılmaktadır [17,18].

CP titanyumun çeşitli kaliteleri vardır. Kaliteler arasındaki farkı ise genellikle oksijen içeriği belirlemektedir. CP titanyumun farklı kaliteleri (Kalite 1-4), akma mukavemetini artırmak için %0,18-0,40 arasında değişen oranlarda oksijen içermektedir. Dört önemli CP titanyum kalitesi (Kalite 1-4), yapılarında iki kristalin birleşim eğiliminin az olması sebebiyle şekillendirilebilirlik özellikleri düşüktür. Ayrıca bu kalitelerdeki titanyumlar 240-740 Mpa arasında çekme mukavemetine sahiptir.

Kalite 1 düşük dayanım, mükemmel soğuk şekillendirilebilirlik ve korozyon direncine sahiptir. Derin çekme uygulamalarında ve çelik reaktörlerinde kullanılmaktadır. Kalite 2, 390-540 Mpa çekme mukavemeti ile en popüler ticari saflıktaki titanyum kalitesidir. Kalite 3, yüksek dayanım gerektiren basınçlı kazan uygulamalarında kullanılmaktadır. Kalite 4 ise 740 Mpa'a kadar yüksek dayanıma sahip olup bağlantı parçaları ve elemanlarında kullanılmaktadır [13,19-20].

2.1.2. Alfa titanyum alaşımları

Alfa titanyum alaşımları tek fazlı alaşımlardır. Ti ve zirkonyum, alfa ve beta fazlarının her ikisinde de katı çözünebilirliğe sahip doğal elementlerdir. Alfa alaşımının temel alaşım elementlerinden Sn ve Zr katı eriyik mukavemetini artırmak için kullanılır. Alfa alaşımlarına en büyük mukavemet etkisi sağlayan element ise alüminyumdur. Yaklaşık %6'dan fazla alüminyum içeren alfa alaşımlarının sıcak işlenmesi zordur. Yüksek alüminyum içeren alfa alaşımlarının sıcak işlenebilirliğini iyileştirmek için yeterli miktarda β kararlaştırıcı alaşım elementleri ilave edilir. Alfa alaşımları yüksek kararlılığa sahip yüksek sıcaklık özellikleri iyi olan alaşımlardır fakat özelliklerinin iyileştirilebilmesi için ısıtılma işlemle mikroyapı değişiklikleri yapılamaz. Isıl işlemle mikroyapının değişmemesi alfa alaşımlarına mükemmel

kaynak edilebilirlik özelliği kazandırmıştır. Alfa alaşımlarının minimum akma mukavemeti 170-480 Mpa arasında olup ticari safliktaki titanyum ve Ti-5Al-2.5Sn bu tip alaşımların en önemlilerindendir. Alfa alaşımları başlıca korozyon direnci ve deformasyon özelliği gerektiren kimya ve işleme-mühendisliği endüstrilerinde kullanılmaktadır [16, 21, 22].

Alfa alaşımları, yüksek korozyon ve oksidasyon dayanımı ile iyi süneklik ve şekillendirilebilme özelliğine sahiptir. Alfa alaşımları, β bölgesindeki yüksek sıcaklıklarda tavlanarak daha sonra soğutma işlemine tabi tutulurlar. Hızlı soğutma işlemi çok ince iğnesel şekilli α yapısı oluştururken, fırında soğutma işlemi ise daha çok levha şeklinde yapı oluşturmaktadır [12].

2.1.3. Yakın alfa (near- α) titanyum alaşımları

Yakın α titanyum alaşımları, α -kararlaştırıcılarına (Al, Sn) ilave olarak düşük miktarda β -kararlaştırıcıları (Mo, V) içermektedir [16]. İşlenebilirliği ve dayanımı iyileştirmek için ilave edilen β -kararlaştırıcılarının miktarı %1-2 arasındadır [22]. Yakın α titanyum alaşımları, α alaşımlarının üstün sürünme dayanımı ve $\alpha+\beta$ alaşımlarının yüksek mukavemetini bir arada bulundurması sebebiyle kriyojenik ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. Günümüzde çalışma sıcaklıkları 500-550 °C'ye kadar çıkmıştır [13].

Ti-8-1-1 yüksek sıcaklıklar için geliştirilmiş ilk titanyum alaşımıdır. Yüksek alüminyum içeriği korozyon direncini düşürmektedir. Bu yüzden, günümüzde kullanılan bütün geleneksel titanyum alaşımları, en fazla %6'ya kadar alüminyum içermektedir. Bu sebepten ötürü Ti-8-1-1 alaşımını takiben Timet tarafından geliştirilen Ti-6-2-4-2 alaşımı daha düşük oranlarda alüminyum ihtiva etmektedir. 1970'li yıllarda Amerika'daki RMI titanyum şirketi tarafından yüksek sıcaklık titanyum alaşımlarının geliştirilmesi amacıyla yapılan bir araştırmada, düşük oranlarda (%0,1'e kadar) silisyum ilavesinin, Ti-6-2-4-2 alaşımının sürünme dayanımını büyük ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca silisyumun yüksek sıcaklıklarda dislokasyonlar üzerinde çökelti oluşturarak, dislokasyon tırmanmasını

ve benzer deformasyonları engellediği iddia edilmiştir. Bu çalışmadan sonra yeni üretilen yüksek sıcaklık titanyum alaşımlarının hemen hepsinde %0,5'e kadar değişen oranlarda silisyum bulunmaktadır [13].

Bugün en gelişmiş yüksek sıcaklık titanyum alaşımı, Amerikan TIMETAL 834 olarak bilinmektedir. Bu alaşımın kullanım sıcaklığı 600 °C'ye yakın olup, yüksek sıcaklıklarda uzun süre kararlı davranabilmekte ve oksidasyona karşı koruma sağlayabilmektedir [13].

2.1.4. Alfa-Beta titanyum alaşımları

İçeriğinde yüksek miktarda (%4-6) β -kararlaştırıcıları bulunduran alaşımlar $\alpha+\beta$ alaşımları olarak isimlendirilir [22]. α ve β kararlaştırıcılarının uygun dengesi ile oda sıcaklığında α ve β 'nin bir karışımı üretilir. Tavlama, yüksek süneklik, homojen özellikler ve iyi dayanım kombinasyonunu oluşturur. β dönüşüm sıcaklığının hemen altında alaşımın ısıtılması, küçük bir miktar α 'nın kalmasını ve tane büyümesini önlemeyi sağlar. Yavaş soğutma, küçük β faz adalarını kuşatan eş taneli α taneleri, hızlı soğutma ise iğne şeklinde bir α fazı oluşturur. Daha fazla alaşımlanmış $\alpha+\beta$ alaşımları yüksek dayanımlar elde etmek için ısıtım işlemi görebilir. Ayrıca alaşıma β dönüşüm sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta çözündürme uygulanabilir [12].

$\alpha+\beta$ alaşımları içerisinde en popüler alaşım Ti-6Al-4V alaşımıdır. Bu alaşım 1950'lerde geliştirilmiş olup, titanyum alaşımları arasında bilinen ilk alaşım olarak gösterilmektedir [13]. Ti-6Al-6V-2Sn ve Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si gibi $\alpha+\beta$ alaşımları yüksek dayanım amaçlı geliştirilmiş alaşımlardır. Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo alaşımı ise yüksek dayanım ve yüksek tokluğa sahip bir diğer alaşımdır [23]. Bu alaşımlar yakın α titanyum alaşımlarından daha yüksek dayanıma sahiptirler. Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-2Sn alaşımlarının daha çok havacılık uygulamalarında tercih edilmesinin başında, alüminyum alaşımları ve düşük alaşımlı çeliklerden daha yüksek korozyon direncine sahip olmaları gelmektedir [16].

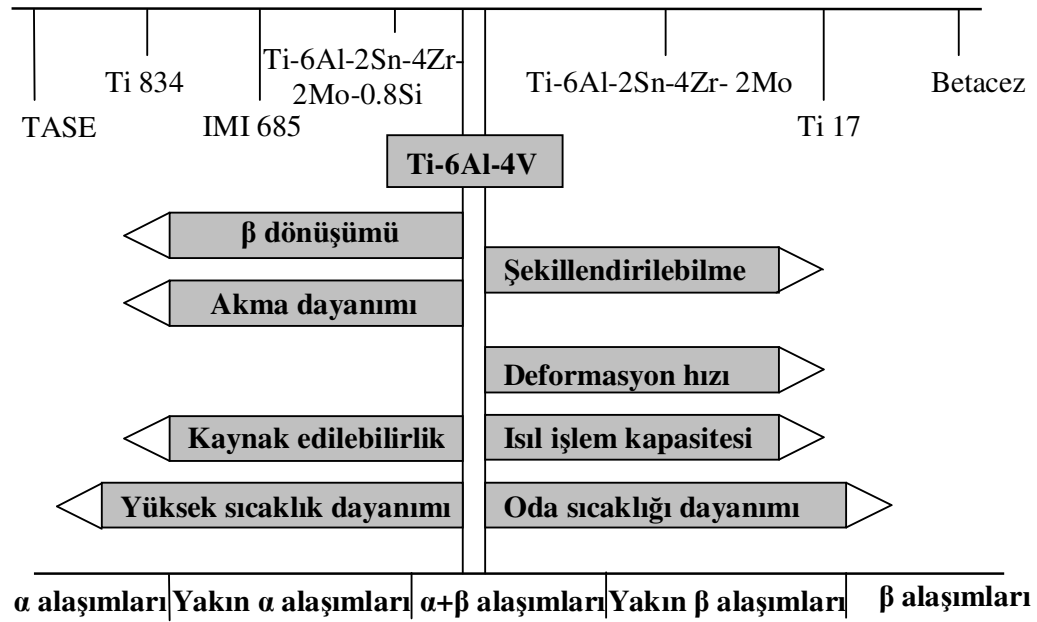
Ti-6Al-4V alaşımı toplam titanyum üretiminin %50'inden daha fazlasını oluşturmaktadır [13]. Bu alaşım kolaylıkla kaynaklanabilir ve işlenebilir, levha, ekstrüzyon, tel ve çubuk şeklinde çok çeşitli fabrika ürünleri bulunur. Bu alaşıma 1137 Mpa çekme dayanımı için ısııl işlem uygulanabilir ve 482 °C'ye kadar iyi bir metalurjik kararlılığa sahiptir. Düşük sertleşebilirliğe sahip olması nedeniyle sadece 25,4 mm'ye kadar olan kısmı sertleştirilebilmektedir. Bu tür aşlımlar β fazlı alaşımlar kadar yüksek mukavemete sahip değilseler de, yoğunluklarının düşük olması sebebiyle dayanım/yoğunluk oranı yüksek malzemelerdir. Ti-6Al-4V alaşımı başta uzay endüstrisi olmak üzere reaksiyon kazanları, ısı değiştircileri ve gaz kompresörleri gibi daha birçok alanda kullanılmaktadır [12].

Ti-6Al-4V alaşımı

En yaygın kullanım alanına sahip titanyum alaşımı olup, $\alpha + \beta$ alaşım grubu içerisinde yer almaktadır. Ti-6Al-4V alaşımı bünyesinde %6 alüminyum kararlaştırıcısı ile α fazını, %4 vanadyum kararlaştırıcısı ile de β fazını ihtiva etmektedir [22]. Bu alaşım daha fazla α kararlaştırıcısı (Al) içerdiiğinden faz diyagramında α 'ya yakın bölgede bulunmaktadır. α kararlaştırıcısı olan alüminyum katı çözelti mukavemetleşmesi sağlar. α_2 fazının oluşumundan kaçınmak amacıyla alüminyum içeriği genelde %6 civarında tutulur. Bu α_2 fazı, Ti-6Al-4V alaşımının süneklik, korozyon direnci ve tokluğunda azalmaya neden olur. Titanyumda her zaman mevcut olan oksijen, α fazı katı çözelti mukavemetlendiricisi olarak görev yapar [24].

Bu alaşım içerisinde β kararlaştırıcısı olan vanadyum (V), α fazında çözünmez ve bu fazdan dışarı atılır. Bu yüzden vanadyum, β fazının küçük bölgelerinde birikir. β fazı, α matris içerisinde üniform olarak dağılmıştır. α ve β fazlarının içerik olarak birbirinden farklı olması sebebiyle bu iki faz tane büyümesine karşı oldukça kararlıdır. Yani tane büyümesi için daha fazla difüzyona gerek duyulmaktadır. Sonuç olarak, Ti-6Al-4V gibi alaşımlar nispeten ince bir mikroyapıya sahip olup, genellikle dayanımlarını tane sınırı mukavemetleşmesinden sağlarlar [25, 26].

Şekil 2.5'te titanyum alaşımlarının sınıflandırılması ve Ti-6Al-4V alaşımının bu alaşımlar içerisindeki yeri görülmektedir. Ayrıca titanyum alaşım sınıfları arasında değişen özellikler Ti-6Al-4V alaşımı baz alınarak belirtilmiştir. Şekilden Ti-6Al-4V alaşımının $\alpha+\beta$ alaşımları içerisinde yer aldığı ve bahsedilen özelliklere belli oranlarda sahip olduğu görülmektedir [27].



Şekil 2.5. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması ve sınıflar arasında değişen özellikler [27]

2.1.5. Metastabil-beta titanyum alaşımları

Bu alaşımlar %10-15 β kararlaştırıcıları içeren ve oda sıcaklığındaki metastabil şartlarda β fazına sahip alaşımlardır. Bu metastabil β alaşımları, zenginleştirilmiş β matrisi ile çok ince biçimli α ile yaşlandırılabilir. Bu alaşımlar geniş sıcaklık aralıklarında yüksek dayanım, tokluk, mükemmel sertleştirilebilirlik ve dövülebilirlik özelliğine sahiptir. Metastabil β alaşımları, sertleştirme aracı olarak küçük miktarda α -kararlaştırıcı elementleri içerirler. Kırılma tokluğu dayanımları $\alpha+\beta$ alaşımlarının sahip olduğu dayanım seviyelerinden daha yüksektir. Havacılık sanayisindeki yapısal uygulamalarda kullanımları giderek artmaktadır [22].

2.1.6. Beta titanyum alaşımları

Vanadyum ve molibdenin büyük miktarda ilavesi oda sıcaklığında tamamen β yapısı üretmekle birlikte β olarak adlandırılan alaşımların hiçbiri gerçekten bu miktarlarda alaşımlanmaz. Bunun yerine, bu alaşımlar β dengeleyicilerle zenginleştirilir. Bu nedenle de hızlı soğutma işlemi, hepsi β 'dan oluşan dengesiz faz oluşturur. β alaşımlarının dayanımını, katı eriyik mukavemetleşmesinden kaynaklanır. Çözündürme işlemine tabi tutulmuş β alaşımları yüksek süneklik, tokluk ve mükemmel şekillendirilebilirliğe sahiptir. Ayrıca yüksek dayanım sağlamak için yaşlandırılabilir [12, 16].

β alaşımları, $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha az α -kararlaştırıcıları ve daha çok β -kararlaştırıcıları içermektedir. Bu alaşımlar, β fazı içerisinde ince ince dağılmış α parçacıklarının bir sonucu olarak $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha yüksek dayanıma sahiptir. Ayrıca bu alaşımlar $\alpha+\beta$ alaşımlarından nispeten daha yüksek yoğunluğa sahip olup sürünme dayanımları daha düşüktür [28]. Yüksek sertlikleri, mukavemetleri, soğuk şekillendirilebilirlikleri ve yüksek korozyon dirençleri bu alaşımların genel özellikleridir. β titanyum alaşımlarının sahip olduğu özelliklerin sağladığı avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu özelliklere sahip olan β alaşımları yüksek dayanım gerektiren uçak parçaları, yaylar, boru ve tüketici ürünlerinde kullanılmaktadır [16].

Çizelge 2.1. Beta titanyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları [13]

Avantajları	Dezavantajları
- Yüksek dayanım/ağırlık oranı	- Yüksek yoğunluk
- Yüksek dayanım/yüksek tokluk	- Düşük sıcaklık özelliklerinin zayıf olması
- Yüksek yorulma dayanımı	- Yüksek formülasyon maliyeti
- İyi derin sertleştirilebilirlik	- Mikroyapısal kararsızlık
- Düşük dövme sıcaklıkları	- Düşük korozyon direnci (bazı alaşımlar)
- Soğuk şekillendirilebilme	
- Kolay ısıtılma işlemi uygulayabilme	
- Mükemmel korozyon direnci (bazı alaşımlar)	
- Mükemmel yanma direnci (bazı alaşımlar)	

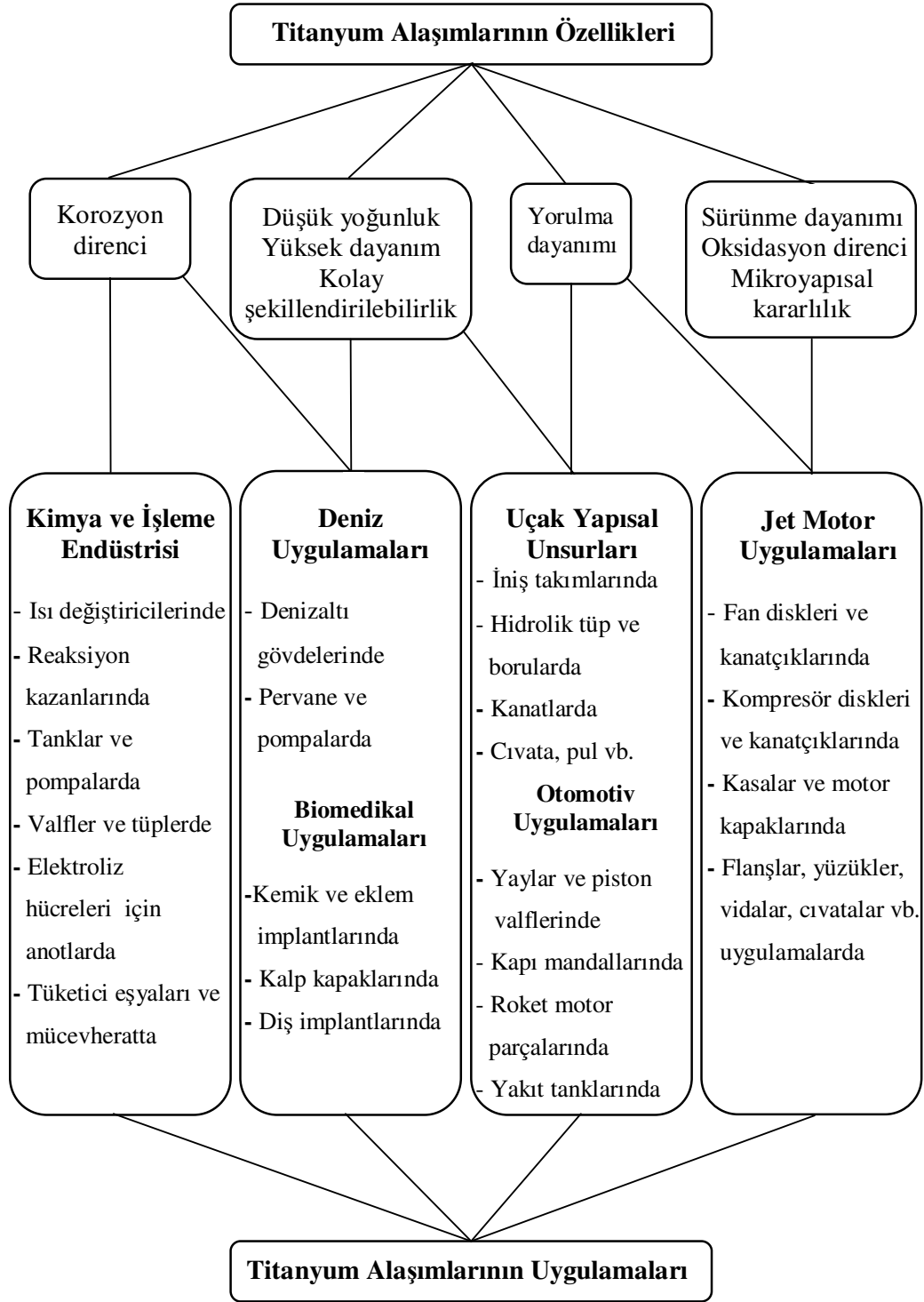
2.2. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Uygulama Alanları

Titanyum ve alaşımları üstün mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri nedeni ile otomotiv sektöründe, kimya ve petrokimya endüstrilerinde, askeri ve sivil havacılık alanında, dental, medikal uygulamalarda ve deniz sanayisinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu malzemeleri popüler yapan, oda sıcaklığındaki üstün mekanik özelliklerinin ve korozyon dirençlerinin yanı sıra yüksek sıcaklık dirençleri, düşük yoğunlukları ve yüksek biyo-uyumluluklarıdır. Bu alaşımların daha yaygın kullanımlarını sınırlayan en önemli faktör ise aşınma dirençlerinin düşük olmasıdır [27-29].

Titanyum alaşımlarının birçok endüstri dalında tercih edilmesinde etkin olan özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [30-32]

- Mükemmel korozyon direnci
- Yüksek dayanım ağırlık oranı
- Yüksek sıcaklık dayanımı
- Son derece düşük mıknatıslanma
- Mükemmel düşük sıcaklık dayanımı
- Yüksek kimyasal reaktivite
- Düşük ısı iletkenlik
- Isıl büzölmelere karşı yüksek direnç
- Hidrojen emme
- Yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek sürünme dayanımı
- Mikroyapısal kararlılık
- Yüksek biyo-uyumluluk
- İyi görüntü özelliği

Şekil 2.6’da titanyum alaşımlarının özelliklerine göre değişen kullanım alanları ve uygulamaları görülmektedir.



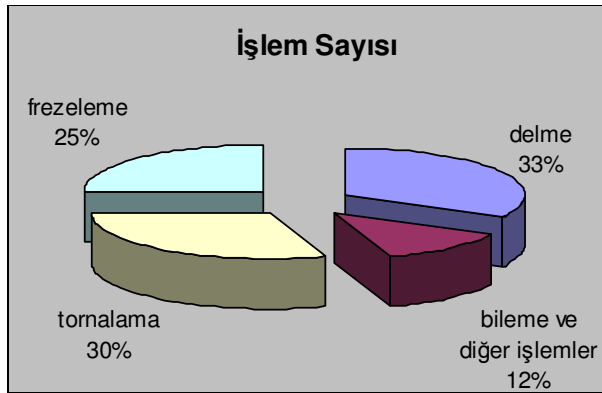
Şekil 2.6. Titanyum alaşımlarının bazı özelliklerine bağlı olarak değişen uygulama alanları [22]

3. DELİK DELME

3.1. Delik Delme İşlemlerinin Diğer Talaş Kaldırma Yöntemleri Arasındaki Yeri

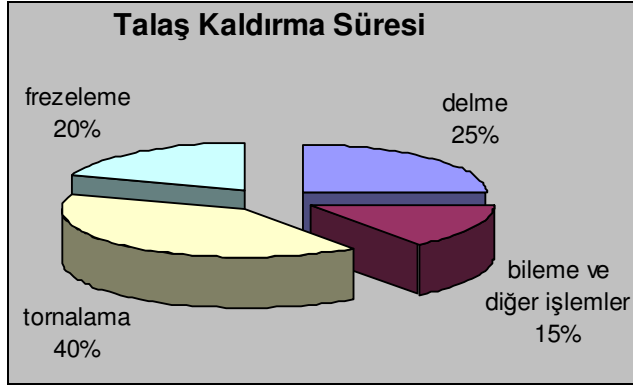
Delme işlemi en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biridir ve talaş kaldırma işlemlerinin %33'ünü içermektedir. Delme işlemi çoğunlukla talaş kaldırma işlemlerinin sonuncusudur. Tornalama ve frezeleme işlemleri ile delme işlemleri karşılaştırıldığında, işlemlerin kinematik ve dinamik yapısının benzer olup talaş akışı ve kesme sıcaklığı dağılımının aynı şekilde olduğu görülür. Diğer taraftan delme işleminde olumsuz durumlar da oluşmaktadır. Talaş oluşumu kapalı alanda oluşur ve görülemez. Talaş akışını sınırlandıran sadece matkapta oluşan talaş kalınlığıdır. Takım ve iş parçası arasındaki sürtünme önemlidir; yüzeyden akan sıcaklığın yetersiz olması ve dönme ekseninde kesici ağız boyunca kesme hızı değerinin sıfır olması ana problemidir. Bu yüzden matkap ve işlem spesifik olarak tezgâha ve iş parçasına adapte edilmeli, delik kalitesi sağlanmalı ve gerekli yöntem doğruluğu oluşturulmalıdır. Bu nedenlerden dolayı birçok takım geometrisi ve takım malzemesi geliştirilmiştir [11].

Bütün talaş kaldırma metotları kesici ağızla tanımlanır. Bu tanımlanan metotlar içerisinde delme işlemi, tüm işlem sayısının %33'üne sahiptir [33-34] (Şekil 3.1).



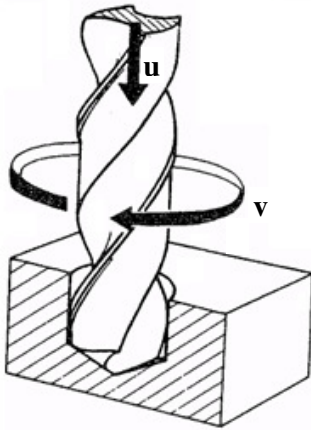
Şekil 3.1. İşlem sayısına göre delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması [11]

Yine çok kullanılan kesici takımlarla yapılan talaş kaldırma işlemlerinde harcanan zamanın %25'i delme işlemi olarak tezgâhta geçirilmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Talaş kaldırma süresine göre delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması [11]

Delik delme, iş parçasından talaş kaldıran bir takım ile silindirik delik açma metodlarının tamamına verilen bir addır. Delme terimi kısa veya derin delik delme işlemleri için olduğu kadar, bunların ardından yapılan broşlama, raybalama, havşa yuvası açma ve ovalama (veya parlatma) gibi çeşitli son işlemler için de kullanılır. Bütün bu işlemlerin ortak noktası, ana dönme hareketinin doğrusal bir ilerleme hareketiyle beraber yapılmasıdır [35].



Şekil 3.3. Takımın dönmesi (v), ilerlemesi (u) [36]

Delik delme işlemi matkap ve torna tezgâhında da yapılabilir. Bu işlem matkap tezgâhında yapılırsa, iş parçası sabit olup, kesici takım olarak kullanılan matkap ile kesme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemde, matkap hem döner hem de eksenî doğrultusunda ilerlerken kesme yapar [37].

Önceleri delikler klasik, dikey tezgâhlarda delinmiş ve delme işlemleri üretimde dar boğazlar oluşmasına neden olmuştur. Bugün bu tezgâhların birçoğu yerlerini daha modern FMS (Esnek Üretim Sistemleri) sistemlerine, işleme merkezlerine ve CNC tornalara bırakmışlardır.

Kısa delik delme işlemi için geliştirilen kesici takımlar sayesinde delme işlemi öncesindeki ve sonrasındaki işlemlere olan gereksinim önemli ölçüde azalmıştır. Modern takımlar, delme işlemini herhangi bir merkezleme deliğine veya kılavuz deliğe ihtiyaç olmaksızın tek pasoda gerçekleştirirler. Delinmiş olan delik gerek boyut, gerekse yüzey kalitesi açısından ek bir işlem gerektirmez.

3.2. Delik Delme İşlemi

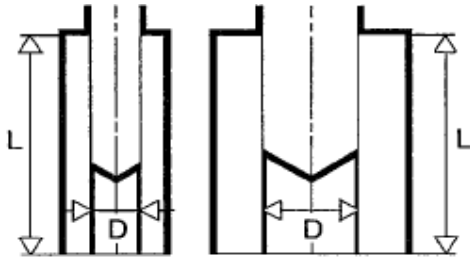
İlke olarak matkapla talaş kaldırma olayı ile tek ağızlı takım (tornalama, planyalama) talaş kaldırma olayı arasında bir fark yoktur. Ancak delik işlemede, talaşın tahliyesi ve kesme sıvısının verilmesi çok daha zor olduğu, talaş ile helis kanalların ve matkap ile işlenen yüzeyler arasında sürtünmenin çok daha büyük olduğu, talaş açısının ağız boyunca değişmesi ve bundan dolayı ağız boyunca farklı kesme şartlarının olduğu göz önünde tutulursa, matkapla talaş kaldırma, tek ağızlı takıma göre çok daha karışık ve ağır koşullarda meydana geldiği sonucuna varılır [36].

Matkaplar, delik delme ve genişletme için kullanılan takımlardır. Matkaplar dönel yapıya sahip bir veya birden fazla kesici ağız olan, talaş akışı için bir veya daha fazla helisel ya da düz kanala sahip talaş kaldırma takımlarıdır. Bu tip kesici takımlar birçok çeşitte, çeşitli formlarda, ölçülerde ve toleranslarda üretilmektedir.

Endüstriyel uygulamaların hemen hemen tamamında kullanılan matkaplar, helisel matkaplardır [11].

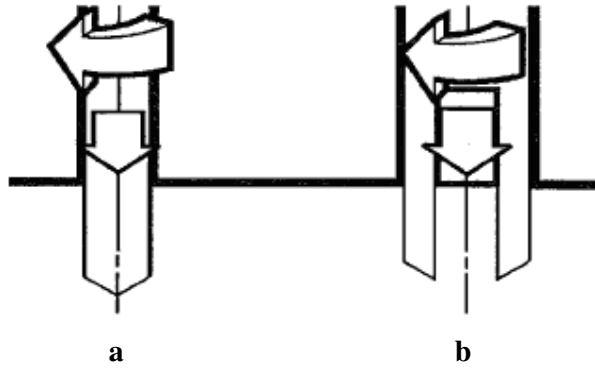
Delik derinleştikçe, işlemin kontrolü ve talaşın boşaltılması zorlaşır. Derin delik delme işleminde yüzey ve delik kalitesi daha büyük bir öneme sahip iken, kısa deliklerde daha ekonomik bir işlem için daha yüksek talaş debilerinde çalışma önem kazanmaktadır. Kısa delik delme işlemi ile derin delik delme işlemi arasındaki fark, sadece çap ve delik derinliği ilişkisiyle sınırlandırılmamıştır. Talaş boşaltma, kalite ve talaş debisi ile ilgili parametreler de derin delik delme ile kısa delik delme işlemlerini ayıran temel özelliklerdir.

Delik boyu, delik çapının 10 katından daha büyük ise bu delikler uzun delik olarak adlandırılır. Delik boyu çap oranı 4-10 arasında olan deliklere normal delik, delik boyu çap oranı 3 ve daha düşük olan delikler ise kısa delik olarak adlandırılır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Çap uzunluk ilişkisi [35]

En yaygın delik delme metodu, dolu bir malzemenin yekpare bir takım kullanılarak belirli bir çapta, tek operasyonda delinmesidir (Şekil 3.5.a). Hem içten hem de dıştan kesen bir takımın kullanıldığı çevreden kesme (Şekil 3.5.b) metodu bir önceki delik delme işlemindeki kadar güç gerektirmeyen ve prensipte büyük çaplı deliklerin delinmesi için kullanılan bir metottur. Bu metot, malzemenin tamamını talaş olarak kaldırmak yerine, merkezde silindir şeklinde bir çekirdek oluşturan ve yine tek operasyonda tamamlanan bir delme işlemidir [35].



Şekil 3.5. Delme işlemleri [35]

(a) tek operasyonda delme işlemi, (b) ön delik delme işleminden sonra yapılan delme işlemi

Bazı işlemlerde delinecek deliğin yüzey kalitesinin ve delik toleransının iyileştirilmesi istenirse, delme işlemini takiben bir delik büyütme işleminin uygulanması tavsiye edilir. Bu üçüncü delme metodu normal delik delme matkaplarıyla gerçekleştirilen ancak yeterli hassasiyet sağlanabilmesi için özen gerektiren bir metottur. Önceden delinmiş delikler, kullanılan takımın asimetrik takım olması durumunda takımın eğilmesine neden olurlar. Normal delik delme işleminde kullanılan matkapların birçoğu kendi kendine merkezleme özelliğine sahiptirler. Önceden delinmiş bir delikte, takım merkezi ararken kesici kenarlarda düzensiz yüklemeler oluşur. Bu, takımın eğri bir yol izlemesi ve oval bir delik delmesi demektir.

3.3. Temel Tanımlar

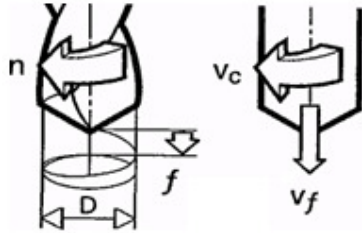
Delme işlemindeki çalışma koşulları için yapılacak temel tanımlar yekpare takım için de, değiştirilebilir uçlu takım için de aynıdır. Delme işleminde ana hareket takım veya iş parçası tarafından yapılan dönme hareketidir. Ana hareketi oluşturan ana mil hızı (n), dakikada yapılan devir sayısı olarak tanımlanır. Delme işlemi için kesme hızı (V_c), çevresel hızdan yararlanılarak belirlenir, bu hız dakikadaki devir sayısı bilindiği takdirde kolaylıkla hesaplanabilir. (D) takım çapı olmak kaydıyla matkap bir dönüşte, çevresi $\pi x D$ olan bir daire çizer (Şekil 3.6). Eğer çap mm cinsinden

verilmişse, kesme hızının m/dak cinsinden ifade edilebilmesi için sonuç 1000'e bölünür.

$$V_c = \pi \times D \times n / 1000 \text{ [m/dak]} \quad (3.1)$$

$$V_f = f \times n \text{ [mm/dak]} \quad (3.2)$$

İlerleme hızı veya parçaya nüfuziyet hızı (V_f - mm/dak) birim zamanda alınan yol olarak tanımlanır ve takımın iş parçasına göre veya alternatif olarak iş parçasının takıma göre ilerlemesidir. Bu aynı zamanda tezgâhın veya tablanın ilerleme hızı olarak da bilinir. Devir başına ilerleme (f - mm/dev) ilerleme hızını hesaplamak için kullanılan bir büyüklük olup, takım veya iş parçasının bir devirdeki ilerlemesidir.



Şekil 3.6. Kesme hızı-ilerleme hızı [35]

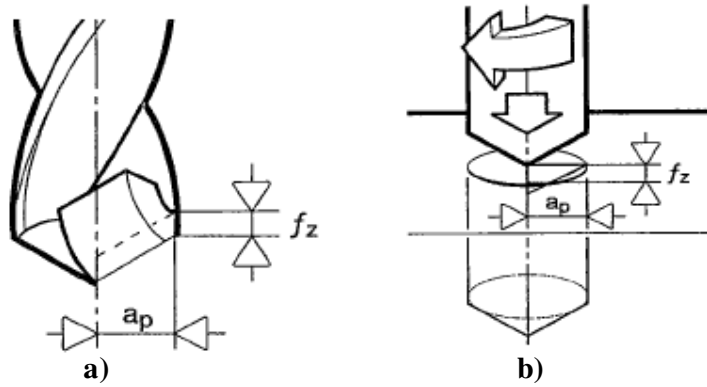
Talaş genişliği veya radyal talaş derinliği (a_p - mm), takımın temasta olduğu iş parçası yüzeyidir ve tornalamada olduğu gibi yarıçap cinsinden ifade edilir.

$$a_p = (D-d)/2 \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

Takımda birden fazla kesici kenar olduğundan (z kesici kenar-sayısı) talaş kesit alanının (A - mm²) tanımında kenar başına ilerleme (f_z -mm/z) değeri kullanılır. Bu alan bir kenar tarafından kaldırılan malzemenin alanıdır ve radyal talaş derinliği ile kesici kenar başına ilerlemenin çarpımına eşittir (Şekil 3.7).

Bu tanımlardan bazıları kullanılarak talaş debisi ($V\text{--mm}^3/\text{dak}$) veya birim zamanda kaldırılan talaş hacmi hesaplanabilir. Burada talaş hacmi, kesme hızı ile talaş kesit alanının çarpımıdır. Kesme hızı $[\text{m}/\text{dak}]$ cinsinden ifade edilirse, talaş debisinin $[\text{mm}^3/\text{dak}]$ cinsinden elde edilebilmesi için sonuç 1000 ile çarpılır.

$$V = A \times V_c \times 1000 \text{ [mm}^3/\text{dak}] \quad (3.4)$$



Şekil 3.7. Delme işlemlerinde temel tanımlar [35]
a) talaş kesit alanı, b) kesici kenar başına ilerleme

İlerleme uzunluğunun ($L+h\text{--mm}$) ilerleme hızına bölünmesi sonucunda ($T\text{--dak}$) efektif işleme zamanı elde edilir. Delinmiş olan veya başka bir ifade ile takımın ilerlediği uzunluk, delik derinliği ile matkap ucu yüksekliğinin toplamına eşittir [33].

$$h = (D/2) \times \cot(\phi/2) \text{ [mm]} \quad (3.5)$$

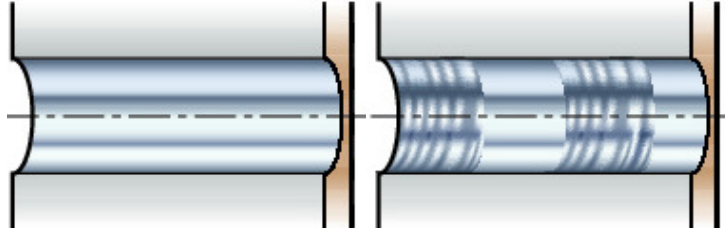
$$T = (L+h)/V_f \text{ [dak]} \quad (3.6)$$

3.4. Talaş Oluşumu ve Kesme Sıvısı

3.4.1. Talaş oluşumu

Normal delik delme işleminde kullanılan matkapların birçoğunda iki talaş kanalı ve iki kesici kenar vardır. Talaşlar, delik içerisinden helis kanalları yardımıyla boşaltılırlar. Bu, modern tezgâhlarda ve matkaplarda kesme sıvısının takım içerisinde

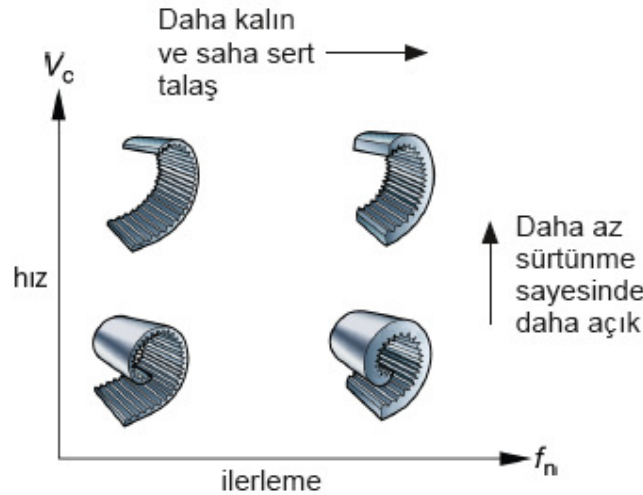
bulunan kanallar vasıtasıyla kesme bölgesine aktarılması sonucunda gerçekleştirilir. Talaş oluşumu iş parçası malzemesi, takım geometrisi, kesme hızı, ilerleme ve kesme sıvısı seçiminden etkilenir. Genellikle artan ilerleme ve/veya azalan kesme hızı değerleri kısa talaş oluşumuna neden olurlar. Talaşların matkabın kesici kenarlarından problemsiz uzaklaştırılması, elde edilen talaşın kabul edilebilir bir uzunlukta olduğunu gösterir. Talaş sıkışması matkabın yanal hareketine sebep olabilir ve delik kalitesini, matkap ömrünü ve emniyetini ya da matkap/kesici uç kırılmalarını etkiler [38]. Şekil 3.8’de talaş tahliyesinin iyi olduğu ve talaş sıkışmasının olduğu durumlardaki delik yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 3.8. Delik yüzeyi [38]

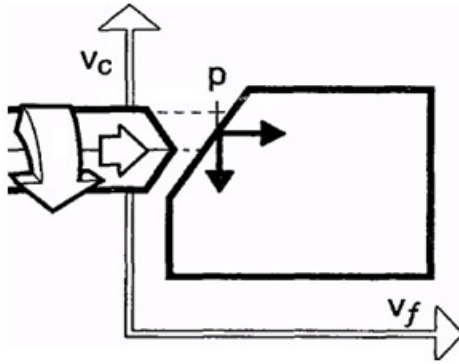
a) İyi bir talaş boşaltması yapılmış delik b) Talaş sıkışmasından etkilenmiş delik

Şekil 3.9’da kesme ve ilerleme hızındaki değişime göre talaş şekillerindeki değişim görülmektedir. Düşük kesme ve ilerleme hızlarında daha kapalı ve yumuşak talaş oluşurken yüksek kesme ve ilerleme hızlarında ise daha açık ve sert talaşlar oluşmaktadır.



Şekil 3.9. Kesme ve ilerleme hızına bağlı olarak talaş şeklindeki değişim [38]

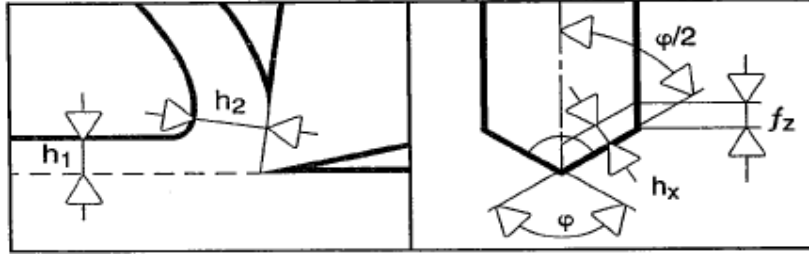
Talaş kırma aralığının etüdü sonrasında doğru kesme verilerinin saptanması mümkündür. Talaş kırma alanı, söz konusu malzeme üzerinde çeşitli kesme hızı-ilerleme değerlerinin denenmesi ve belirlenen değerlerden talaş kırma açısından tatmin edici sonuçlar veren değerlerin seçilmesiyle oluşturulur. Şekil 3.10'daki diyagramda, çevredeki kesme hızının (p) talaş kırma açısından çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu örnekte problem, ilerleme değerinin arttırılması ile çözülebilir. Tezgâhın gücünün veya rijitliğinin sınırlı olması halinde kesme hızının düşürülmesi daha uygundur.



Şekil 3.10. Matkabın çevresinde aşırı kesme hızı [35]

Kesme hızı, matkabın çevresinden merkeze yaklaştıkça azalır. Bu nedenle kesme hızının azalması sonucunda ortaya çıkabilecek yığılma kenar oluşumu riskinin göze alınması gerekir. Matkabın merkezine yakın bir yerde oluşacak belirli bir miktar yığılma kenar çoğu işlem için kabul edilebilir bir durumdur. Ancak kesme hızının düşürülmesi yığılma kenarın çevreye daha yakın bir bölgede oluşmasına neden olacaktır, dolayısıyla sakıncalıdır.

Talaş kaldırma işlemi esnasında talaşın plastik deformasyona uğraması nedeniyle, deformasyona uğramış talaş kalınlığı (h_2) teorik talaş kalınlığından (h_1) farklıdır. Delme işleminde teorik talaş kalınlığı artan kenar başına ilerleme ve uç açısı (ϕ) ile artar (Şekil 3.11).

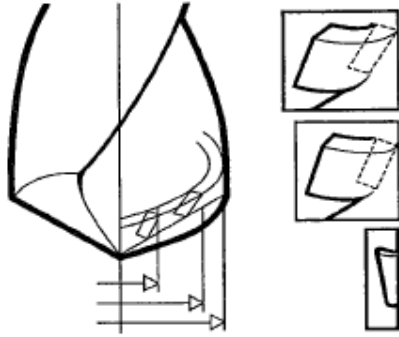


Şekil 3.11. Talaş oluşumuna etki eden faktörler [35]

Artan ilerleme değeri ile helis açısı artar ve boşluk açısı azalır. Azalma merkeze en yakın noktada en yüksek seviyeye ulaşır. Bu ise, takım ile delik yüzeyleri arasındaki aşınmanın önlenmesi için boşluk açısının çevreden merkeze doğru artırılmasını zorunlu kılar.

Talaş açısı, kesici kenar boyunca değişir ve matkabın çevresinden merkeze doğru azalır. Matkabın hızının da çevreden merkeze doğru azalması nedeniyle kesme hızının sıfır olduğu merkez noktasında matkabın ucu son derece verimsiz çalışacaktır. Matkap merkezdeki malzemeyi kesmek yerine bastırıp ezerken talaş açısının negatif olduğu ve kesme hızının sıfıra yaklaştığı noktada bir plastik deformasyon oluşur (Şekil 3.12). Bu basınç oldukça yüksek bir eksenel kuvvet bileşeninin ortaya çıkmasına neden olur. Tezgâhın gücü delinecek deliğin boyutlarına göre düşükse, ilerleme kuvvetinin büyük olmasından dolayı tezgâh ana milinin esnemesi söz konusu olacak ve bunun sonucunda oval delikler elde edilecektir.

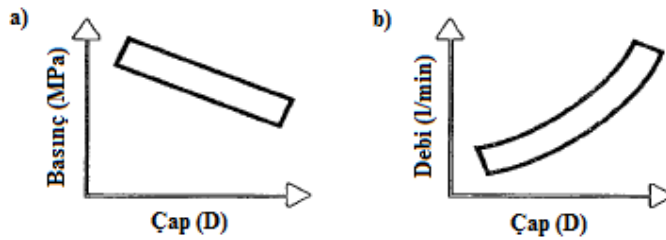
Radyal ağız nedeniyle ortaya çıkan elverişsiz çalışma koşullarının giderilmesi için takımlarda önemli değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Radyal ağız çok inceltilmiş veya tamamen ortadan kaldırılmış ve kesici kenara matkap merkezine doğru bir yarıçap verilmiştir.



Şekil 3.12. Kesici kenarın talaş kaldırması [35]

Klasik helisel matkaplarda çekirdek kısmının inceltilmesi işlemi, matkabın ucundaki helis kanalın taşlanması ile gerçekleştirilir. Bu sayede çapraz kesici kenarın uzunluğu azaltılır ve ana kesici kenar kırık bir hat oluşturur. Çekirdeğin inceltilmesini takiben kesici kenarlara doğrusal bir profil kazandırabilmek amacıyla bir son taşlama işlemi uygulanır. Son taşlama ana kesici kenarın tamamına veya bir kısmına uygulanır ve böylelikle işlem süresince sabit bir talaş açısının elde edilmesi sağlanır. Örneğin, kırılğan malzemelerin delinmesi işleminde, tüm kesici kenar boyunca küçük bir talaş açısına sahip bir matkabın kullanılması tavsiye edilir [35].

Modern sinterlenmiş karbür matkaplar ile yapılan delik delme işleminde yüksek talaş debileri elde edilir ve oluşan büyük miktarlardaki talaşlar matkabın içinden veya dışından kesme bölgesine gönderilen yüksek basınçlı kesme sıvısı yardımıyla delik dışına atılırlar. Gerekli basınç (Mpa) ve debi [l/dak] öncelikle delik çapına bağlıdır, ancak işleme koşullarının da basınç ve debi üzerinde etkisi vardır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Çapa bağlı basınç ve debi ilişkisi [35]
a) basınç çap ilişkisi, b) debi çap ilişkisi

3.4.2. Kesme Sıvısı

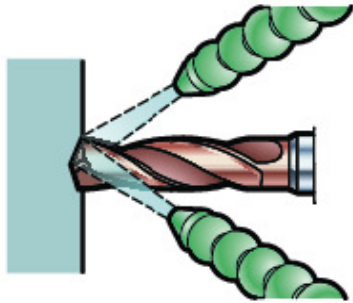
Kesme sıvısı; metallerde talaş kaldırma işleminde, öncelikle kesici ve iş parçasını soğutmak amacıyla kullanılan çeşitli kimyevi maddelerin bir karışımı olan sıvı olarak tanımlanabilir [39]. Talaş kaldırma sırasında kullanılan kesme sıvılarının başlıca amacı, soğutma ve yağlamadır. Soğutma ile kesme esnasında oluşan ısıyı çevreye ileterek ısı miktarını azaltmak; yağlama ile de takım-talaş ve takımla işlenen yüzey arasına nüfuz ederek sürtünmeyi azaltmak ve takım aşınmasını önlemek amaçlanmaktadır. Talaşlı imalatla kullanılan soğutucular ve yağlayıcılar takım aşınmasını azaltarak takım ömrünü arttırmakta ve dolayısıyla işleme verimliliğinin artmasını sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca yüzey kalitesinin artması, kesme kuvveti ve titreşimlerin azalması yönünde de önemli katkılar sağlamaktadır [40-41]. Talaşlı imalatla kullanılan kesme sıvılarından istenen özellikler şöyle sıralanabilir [39, 42]:

- İyi bir soğutma ve yağlama özelliğine sahip olmaları
- Kararlı olmaları ve özelliklerini uzun süre koruyabilmeleri
- Paslanmaya yol açmamaları
- İyi çöktürme özelliğine sahip olmaları
- İnsan sağlığına zarar vermemeleri
- Ateşleme tehlikesi taşımamaları
- İyi ısı transfer yeteneğine sahip olmaları
- Uçucu olmamaları
- Köpürmemeleri
- Kullanıldıktan sonra kolay tahliye edilmeleri ve arıtılmaları

Yukarıda sayılan özelliklerin yanı sıra kesme sıvısının talaş kesme bölgesinden uzaklaştırma özelliği de işleme şartlarının iyileşmesinde büyük öneme sahiptir. Bu durum özellikle düşey işleme merkezlerinde derin ve dar deliklerin işlenmesi ile tornada delik işleme operasyonlarında yüzey kalitesi, ölçü tamlığı ve takım aşınması açısından büyük önem arz etmektedir. Delme işlemi kapalı bir alanda gerçekleştiğinden kesme bölgesinden talaşın tahliye edilememesi takımın kırılmasına

varan ciddi problemlere sebep olmaktadır. Özellikle yüksek kesme hızları ve ilerleme oranları talaş hacminin artmasına sebep olmakta bu da talaş tahliyesini zorlaştırmaktadır [35, 43-44]. İşlenmiş yüzey, talaşlardan ve işleme esnasında serbest kalan diğer parçacıklardan zarar görmemelidir. Bu nedenle oluşan talaşı etkili bir biçimde uzaklaştırmak için kesme sıvısı kullanılır. Bu, özellikle derin delik delmede önemlidir; aksi takdirde talaş vb. parçalar destek elemanlarının oluşturduğu basınç ile işlenmiş yüzeye yapışırlar. Talaş oluşumu, belirli malzemelerde kesme sıvısı basıncı yüksek bir delme sistemi kullanılarak kolaylaştırılır. Benzer bir şekilde yüksek kesme sıvısı basıncı, büyük yığıntı talaş (BUE) oluşumunun önüne geçilmesi demektir [35, 39].

Genellikle delme işlemlerinde en uzun takım ömrü için yağ-su karışımının %5-15 arasında olmalıdır. Paslanmaz çelikte ve ısıya dayanımlı alaşımlı malzemelerde delik delmede yoğun karışım kullanılması daha uygundur. Kuru delik delme, tercihen yatay uygulamalarda, kısa talaş çıkaran ve delik derinliği çapın 3 katına kadar olan malzemelerde uygulanabilir ancak bu durum takım ömrünü bir miktar azaltmaktadır. Delik içi kesme sıvısı beslemesi talaş sıkışmasını önlemek için tercih edilmekte olup ve $3 \times D_c$ delik derinliğinde kullanılmalıdır. Dıştan kesme sıvısı beslemesi kısa talaş oluşturan malzemelerde kabul edilebilir ve talaş yığılmasının önlenmesine yardımcı olabilir [38]. Kesme sıvısı ağızlığı kesme bölgesine doğru bir şekilde yönlendirilmelidir (Şekil 3.14).



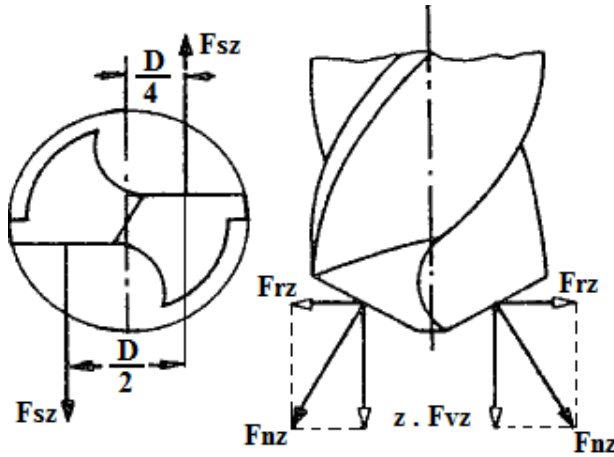
Şekil 3.14. Soğutma sıvısının kesme bölgesine doğru bir şekilde yönlendirilmesi [38]

Kesme sıvısının matkap içinden kesme bölgesine gönderilmesi halinde döner matkaplar, santrifüj kuvvetinin etkisiyle oluşan basınç düşüşü nedeniyle, sabit

matkaplara göre daha yüksek kesme sıvısı basıncına gereksinim gösterirler. Ancak kesme sıvısının matkap dışından kesme bölgesine gönderildiği sabit matkaplarda, sevk sisteminde oluşan belirli bir basınç düşüşünün de dikkate alınması zorunludur. Bu nedenle depoda bir miktar fazla sıvı bulundurulması ve basıncın en azından matkap için tavsiye edilen düzeyde olup olmadığının kontrol edilmesi son derece önemlidir [38].

3.5. Delme İşlemlerinde Kesme Kuvvetleri ve Güç

Delme sırasında bir ağza karşılık gelen talaş kaldırma kuvvetlerinin bileşenleri, yani kesme kuvveti (F_{sz}), ilerleme kuvveti (F_{vz}), radyal kuvvet (F_{rz}) ve bileşke kuvvet (F_{nz}) Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Ağzların konumu itibarıyla her ağızda oluşan radyal kuvvetler birbirini dengelemektedir. Dolayısıyla delme işleminde sadece F_s ve F_v kuvvetleri etki göstermektedir.



Şekil 3.15. Matkapla delmede kesme kuvvetleri [36]

Bir ağza karşılık gelen kesme kuvveti;

$$F_{sz} = A_{sz} \cdot k_s = \frac{ds_z}{2} k_s = \frac{ds}{4} k_s \quad (3.7)$$

ve toplam kesme kuvveti,

$$F_s = z F_{sz} = 2 F_{sz} = d s_z k_s = \frac{ds}{2} k_s \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada özgül kesme kuvveti,

$$k_s = 1,2 k_{s11} h^{-z} \quad (3.9)$$

veya $k_{sh} = k_{s11} h^{-z}$ değeri ile

$$k_s = 1,2 k_{sh} \quad (3.10)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

1,2 matkapla talaş kaldırma işleminin özelliklerini yansıtan düzeltme faktörüdür.

Kesme kuvvetine bağlı, bir ağza tekabül eden kesme momenti,

$$M_{sz} = F_{sz} d / 4 \quad (3.11)$$

ve iki ağza karşılık gelen toplam kesme momenti, $F_s = 2 F_{sz}$ ile

$$M_s = z F_{sz} \frac{d}{4} = 2 F_{sz} \frac{d}{4} = F_s \frac{d}{4} \quad (3.12)$$

veya yukarıdaki (3.2) bağıntısı dikkate alınırsa

$$M_s = \frac{d^2 s k_s}{8.10^3} [Nm] \quad (3.13)$$

şeklinde yazılır, burada d (mm), s (mm/dev); k_s (N/mm²) olarak konulur ve M_s (Nm) olarak bulunur. Bu bağıntıdan verilen bir M_s (Nm) değerine delinebilecek delik çapı

$$d = \sqrt{\frac{8.10^3 M_s}{s k_s}} [mm] \quad (3.14)$$

bulunur. İlerleme $s = z.s_z$ bağıntısı ile tayin edilir. Toplam ilerleme kuvveti

$$F_v = 2 F_{vz} = 2 F_{sz} \sin x = F_s \sin x \quad (3.15)$$

bağıntısı ile tayin edilir.

İlerleme kuvveti F_v , eksenel kuvvet niteliğindedir. Delik açmada, ana kesme ağızlarında meydana gelen bu kuvvetin yanı sıra, radyal kesme ağızında da, eksenel

nitelikte F_z ilerleme kuvveti oluşmaktadır. Şöyle ki, delik açma sırasında matkabı etkileyen ve yenilmesi gereken eksenel kuvvet,

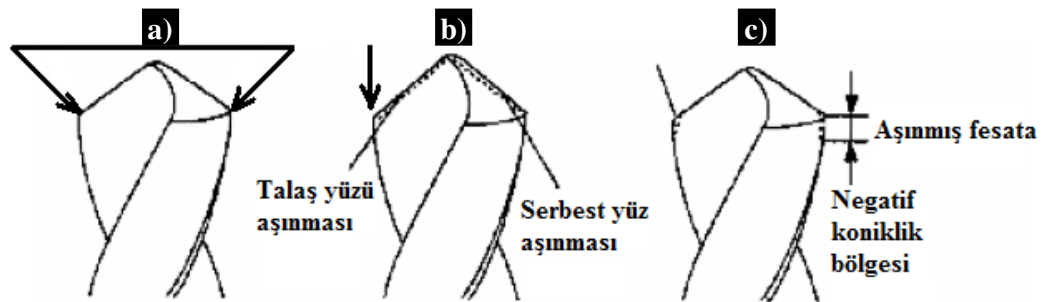
$$F_a = 2 F_{vz} + F_l = F_v + F_l \quad (3.16)$$

dir. Yapılan deneylere göre eksenel kuvvetinin %40'ı F_v ; %57'si F_l ve geri kalanı (%3) sürtünme kuvvetidir.

Eksenel kuvvet F_a , ilerlemeyi sağlayan elemanları ve özellikle yatakları (rulmanları) zorlamaktadır. Tezgâhın konstrüksiyonu sırasında bu elemanlar, belirli bir eksenel kuvvete (F_{amax}) göre hesaplanır. Çalışma sırasında $F_a > F_{amax}$ olursa, ilerlemeyi sağlayan elemanlar ve özellikle rulmanlar çabuk bozulur. Ayrıca F_a kuvveti takımı burkulmaya zorlar. F_{amax} 'ın değeri tezgâh katalogunda verilir [36].

3.6. Kesici Uç Aşınması

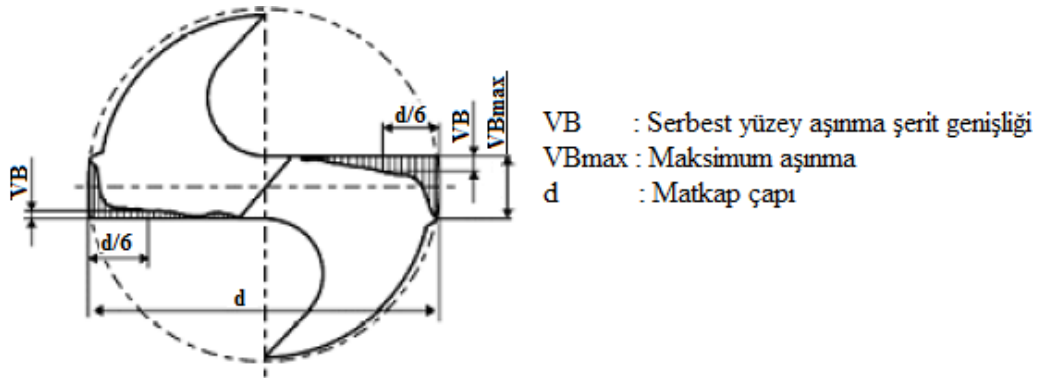
Delik delme işlemlerinde, kesme parametrelerinin optimize edilmesi oldukça önemlidir. Çünkü delme parametreleri efektif takım açılarını doğrudan etkilemektedir. Örneğin, ilerlemenin artması, helis açısını arttıracak ve boşluk açısını azaltacaktır. Boşluk açısının azalması, takımın ana serbest yüzeyinin, işlenen yüzeyle sürtünmesini arttırarak, serbest yüzey aşınmasını (flank wear) hızlandıracaktır [35, 45]. Matkap takımlarında aşınma, Şekil 3.16'da görüldüğü gibi serbest yüzeylerde serbest yüzey aşınması, köşelerin yuvarlanması, kesici kenarla zırhın birleştiği noktada zırhın aşınması, krater aşınması ve radyal ağız (enine kenar) aşınması şeklinde oluşur [46].



Şekil 3.16. Helisel matkaplarda oluşan aşınma mekanizmaları

a) Köşelerin yuvarlanması, b) Serbest yüzey aşınması, c) Zırh aşınması

Genelde aşınma, kesici kenarın zırh (fesata) ile birleştiği noktada başlar, kesici ağızlar ve serbest yüzeylerde gelişir (Şekil 3.17). Kesici ağızlarda aşınmanın artması, serbest yüzeylerde boşluk açısı kaybolmuş konik yüzey meydana getirir. Oluşan bu konik yüzey, serbest yüzeylerde aşınma şeritlerini (VB) temsil eder (Şekil 3.17). Serbest yüzeylerdeki aşınma, kesme işleminin yerini sürtünme ve zorlamalara bırakarak, ısı oluşumunu arttırır ve aşınma hızlanarak takımı köreltir [46].

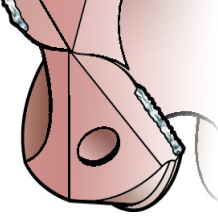
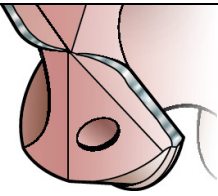
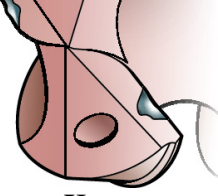


Şekil 3.17. Serbest yüzeyde oluşan aşınmanın gösterimi

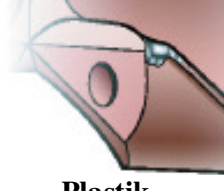
Oluşan aşınma değerleri kabul edilir sınırı aştığında, delme işlemlerinde oldukça önemli olan delik geometrisi (dairesellik), boyut ve yüzey kalitesinin bozulmasına neden olur. Delme işlemlerinde kullanılan matkaplar, kesme işlemi sırasında oluşan mekanik (tork, kesme kuvvetleri), ısı, kimyasal ve abraziv yükleri karşılayabilmesi için bazı özelliklere sahip olması gerekir [35]. İlk olarak, yeterli mukavemet ve kırılma direncine sahip olmalıdır. İkinci olarak, delme sırasında oluşan talaşın ve ısının transferinin daha kolay sağlanabilmesinin yanı sıra abraziv aşınmaya karşı direncinin yüksek ve kimyasal olarak kararlı olması gerekir. Bu özelliklerinin tümünün mevcut olduğu kesici takım malzemesi mevcut değildir. Ancak, kaplama tekniklerinin gelişmesiyle, ana malzemenin tokluk özelliği korunarak, mikron mertebesindeki sert seramik tabakalarla, aşınma ve ısı direnci yüksek ve kimyasal olarak kararlı kesici takım malzemesi kombinasyonu elde edilebilmektedir.

Çizelge 3.1’de takım aşınma çeşitleri muhtemel sebepler ve çözümleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Takım aşınmaları, muhtemel sebepler ve çözümler [38]

Aşınma Türü	Muhtemel Sebepler	Çözümler
 Talaş yığılması	• Çok düşük kesme hızı ve kenar sıcaklığı • Kaplama yok • Kesme sıvısında çok düşük yağ yüzdesi	• Kesme hızı artırılmalı ya da dış çap kesme sıvısı kullanılmalı • Daha keskin kesme kenarı kullanılmalı • Kenarda kaplama yapılmalı • Kesme sıvısındaki yağ yüzdesi artırılmalı
 Kesme kenarın köşesinde ufalanma	• Stabil olmayan fikstür • TIR (Toplam Gösterge Okuması) çok yüksek • Aralıklı kesme • Yetersiz kesme sıvısı (Termal çatlama) • Stabil olmayan takım tutucu	• Fikstür kontrol edilmeli • Radyal sapma kontrol edilmeli • İlerleme düşürülmeli • Kesme sıvısı beslemesi kontrol edilmeli • Takım tutucu kontrol edilmeli
 Kesme kenarında geniş aşınma	• Kesme hızı çok yüksek • İlerleme çok düşük • Kalite çok yumuşak • Kesme sıvısı yetersiz	• Kesme hızı azaltılmalı • İlerleme artırılmalı • Daha sert bir kalite kullanılmalı • Kesme sıvısı beslemesinin düzgün olduğu kontrol edilmeli
 Kesme kenarında ufalanma	• Stabil olmayan koşullar • İzin verilen maksimum aşınma aşılmış • Kalite çok sert	• Düzenek kontrol edilmeli • Matkap yakında değiştirilmeli • Daha yumuşak bir kalite kullanılmalı
 Dairesel alanda aşınma	• TIR (Toplam Gösterge Okuması) çok yüksek • Kesme sıvısı çok zayıf • Kesme hızı çok yüksek • Abrasif malzeme	• Radyal sapma kontrol edilmeli • Saf yağ ya da daha güçlü emülsiyon kullanılmalı • Kesme hızı azaltılmalı • Daha sert bir kalite kullanılmalı

Çizelge 3.1. (Devam) Takım aşınmaları, muhtemel sebepler ve çözümler

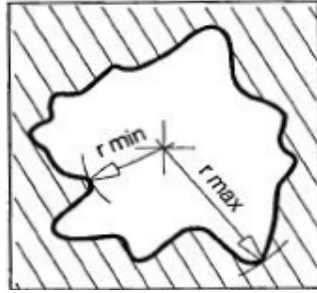
 Keski kenarında aşınma	• Kesme hızı çok düşük • İlerleme çok yüksek • Keski kenarı çok küçük	• Kesme hızı artırılmalı • İlerleme düşürülmeli • Ölçüler kontrol edilmeli
 Plastik deformasyona bağlı aşırı aşınma	• Kesme hızı ve/veya ilerleme çok yüksek • Kesme sıvısı beslemesi yeterli değil • Uygun olmayan matkap/kalite	• Kesme hızı ve/veya ilerleme azaltılmalı • Kesme sıvısı basıncını artırılmalı • Daha sert bir kalite kullanılmalı
 Termal çatlaklar (çentikler)	• Tutarsız kesme sıvısı	• Kesme sıvısı beslemesi kontrol edilmeli • Kesme sıvısı deposu doldurulmalı

3.7. Dairesellik

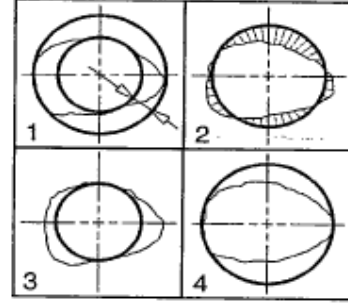
Deliğin dairesellikten sapması genellikle sehim, titreşim, yetersiz yağlama, aşınma gibi etkilerin bir sonucudur. Dairesellikten sapma yüzeyde dalgalanmaların olması demektir. Dairesellikten sapma belirli bir merkez noktadan ölçülen en büyük ve en küçük yarıçap arasındaki fark olarak tanımlanır (Şekil 3.18.a). Ancak, bir deliğin merkezinin belirlenmesinin çeşitli yolları vardır (Şekil 3.18.b):

- En çok kullanılan metot en küçük radyal sapmanın elde edildiği noktayı merkez olarak tanımlamaktır (Şekil 3.18.b (1)). Bu metot MRS (Minimum Radyal Sapma) veya TIR (Toplam İbre Okuma) olarak da bilinir.
- En küçük merkez daire (LSC) metodu (Şekil 3.18.b (2)). Bu metotta merkez nokta, radyal koordinatlarının kareleri toplamı en küçük olan dairenin merkezidir.

- İçeri çizilebilecek en büyük ember (MIC) (ekil 3.18.b (3)).
- Dışarı çizilebilecek en küçük ember (MLC) (ekil 3.18.b (4)).



a)



b)

Şekil 3.18. Dairesellik [35]

a) dairesellikten sapma, b) delik merkezinin belirlenmesi

4. KRIYOJENİK İŞLEM

4.1. Kriyojenik İşlemin Gelişimi

Kriyojenik işlem yaklaşık $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile mutlak sıfır değeri olan $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında tanımlanan sıcaklığa kadar bir parçayı kademeli olarak soğutma işlemidir. Malzeme belirlenen bir bekleme zamanı için bu sıcaklıkta tutulup daha sonra oda sıcaklığına kademeli olarak getirilmektedir. Amaç mekanik özelliklerde (genellikle sertlik ve aşınma direnci) iyileşme sağlamaktır. 1960'lı yılların sonuna kadar kriyojenik işlem parçanın doğrudan sıvı nitrojen içerisine daldırılması ile yapılmakta olup bu işlemin sonucu olarak parçada çatlaklar meydana gelmekteydi. 1960'lı yılların sonlarında geliştirilen soğutma ve ısıtma hızları üzerine sıcaklığın geri bildirimli kontrolü ile yapılan kriyojenik işlem sistemi çok düşük sıcaklıklara kadar etkin ve çatlaksız kriyojenik işlem gerçekleştirmeye izin vermiştir. Sertlik ve mukavemette gözle görülür bir artış sağlayan makine takımları üzerine kriyojenik işlem hakkında ilk araştırma sonuçları 1980'ler civarında doğrulanmıştır [47-50]. 1990'lardan itibaren kriyojenik işlem yarış motor parçaları, özellikle dişliler ve rulmanlar, petrol kuyusu açma ekipmanları, silah namlusu, cerrahi ve diş ekipmanları gibi birçok farklı ürüne uygulanmıştır [51-54].

Kriyojenik işlem bir kez yapılan kalıcı bir işlemdir ve genellikle konvansiyonel ısıtma işlemin sonunda fakat temperlemeden önce yapılan malzemenin tüm kesitini etkileyen bir işlemdir. Aynı zamanda ısıtma işlemin yerini alacak bir işlem olmayıp, konvansiyonel ısıtma işlemi tamamlayıcı bir işlemdir. İmalat sektöründe kriyojenik işlem, üretilen parçalar için düzenli ısıtma işlem çevrimlerine henüz eklenmemiştir. Bu da işlem hakkındaki bilgi eksikliği, açıklanmamış mekanizmalarının olması ve malzemeler üzerindeki faydalarının bilinmemesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte Amerika, Çin ve diğer gelişmiş ülkelerdeki birtakım uzay, otomotiv ve elektronik sanayiler, rakipleri üzerine üstünlük sağlamak ve parçaların aşınma direncini ve boyutsal kararlılığını iyileştirmek için üretim hattına bu işlemi entegre etmişlerdir [55].

Takım çeliklerinde konvansiyonel ısıtıl işleminden sonra kalıntı östenit adı verilen düşük yüzdeli östenit kalmaktadır. Çeliklerde yumuşak bir faz olarak bulunan kalıntı östenit mamul ömrünü azaltabildiğinden çalışma şartlarında martensite dönüştürülebilmektedir. Bu yeni martensit çalışan takımlarda bazı problemlere sebep olmaktadır. Bu yeni martensit çok gevrek ve takımlarda kullanılan temperlenmiş olanlardan farklılaşmaktadır. Üstelik bu martensit mikro çatlaklara sebep olabilmekte ve mamul ömrünü azaltmaktadır. Ayrıca kalıntı östenitin martensite dönüşmesi boyutsal kararsızlığa neden olmaktadır. Yukarıda bahsi geçen problemlerle ilgili olarak kalıntı östenitin martensite kontrollü dönüşümü çoğu parça türleri için esastır. Bu dönüşümü sağlamak için kriyojenik işlem kullanılmaktadır. Sonuç olarak kalıntı östenit azaltıldığında yüksek aşınma direnci elde edilmektedir [9, 56].

Genellikle kriyojenik işlemin iki türü kullanılmaktadır. Birincisi sıg kriyojenik işlem su vermeden sonra -50 °C ve -100 °C gerçekleştirilmektedir. Sıg kriyojenik işlemde kalıntı östenit azalmakta ve takım çeliklerinde yüksek aşınma direnci elde edilmektedir. Derin kriyojenik işlem ise -125 °C nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Bu işlem, kalıntı östeniti azaltmakta veya tamamen kaldırılmakta olup, daha yüksek oranda ve daha homojen bir şekilde karbürlerin dağılımını sağlamaktadır. Bu doğrultuda sıg kriyojenik işlem ile karşılaştırıldığında daha iyi aşınma direnci kazanıldığı gözlemlenmektedir. Derin kriyojenik işlem sıcaklıklarında östenit ve martensit kafesleri daralmakta bu daralmanın sonucu olarak karbon atomları difüze olmaya zorlanmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda bu karbon atomları yeni karbürler üretmekte ve böylece daha homojenize karbür dağılımına neden olmaktadır [9].

Özetle kriyojenik işlemin demir alaşımlarında sağladığı iyileşmelerin arkasındaki mekanizma tam olarak açıklanmamasına rağmen mikro yapı gözlemleri ile bağlantılı olarak literatürde farklı hipotezler ileri sürülmüştür.

Bu hipotezler;

- Kalıntı östenitin martensite tamamen dönüşmesi
- İyi dağılmış karbür çökeltisi

- Kalıntı gerilme durumunun değişmesi şeklinde sıralanmıştır [48, 57-59].

4.2. Kriyojenik İşlemin Uygulanması

Önceleri kriyojenik işlem, parçanın doğrudan sıvı nitrojen içerisine daldırılması suretiyle yapılmakta olup bu işlem, ani ısı değişiminden dolayı parçanın termal şoklara maruz kalmasına neden olmaktaydı. Ancak gelişen teknolojiyle birlikte sıcaklığın kademeli olarak düşürülmesine imkân tanıyan bilgisayar kontrollü fırınların gelişmesiyle birlikte kriyojenik işlem daha sorunsuz hale gelmiştir. Şekil 4.1’de kriyojenik işlemin uygulandığı bilgisayar kontrollü sistemin şeması görülmektedir.



Şekil 4.1. Kriyojenik işlemin uygulandığı sistemin şeması [60]

Sistemde tankta bulunan sıvı azot fırın içerisine girdiğine gaz fazına dönüşerek sıvı azotun kriyojenik işlem uygulanacak parça ile teması engellenmektedir. Böylece sıvı azotun parça ile teması sonucu olası çatlamların önüne geçilmektedir. Ayrıca kontrol ünitesi ile sıcaklık kademeli olarak istenilen değere getirilebilmekte ve bu sıcaklıkta belirlenen bir bekletme süresinde bekletilebilmektedir.

4.3. Kriyojenik İşlemin Etkileri

Kriyojenik işlem geniş bir malzeme yelpazesinde iyi sonuçlar verebilmektedir. Uygulandığı malzemelere bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle kriyojenik işlemle aşağıdaki iyileşmeleri elde etmek mümkündür [61].

Bunlar;

- Daha iyi aşınma direnci
- Yorulma ömründe artış
- Gerilim giderme ve boyutsal kararlılık
- İletkenlikte artış
- İşlenebilirlikte iyileşme
- Bir miktar sertlik artışı
- Daha iyi korozyon direnci

şeklinde sıralanabilir.

4.4. Kriyojenik İşlemin Endüstriyel Uygulamaları

Kriyojenik işlemin; talaşlı imalat, döküm, enjeksiyon kalıplama, demir dövme, kaynak, otomotiv, uzay, elektronik, çelik, kereste, madencilik, tarım gibi daha birçok endüstriyel sektörde uygulamasını bulmak mümkündür [61]. Kriyojenik işlem çeşitli parçaların performansını artırmak için uzay ve imalat sanayi, spor ve müzik aletleri, ateşli silahlar gibi alanlarda halen kullanılmaktadır. Son on yıl içerisinde kriyojenik işlem ile takım/sac kalıbı çeliklerinin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Sac kalıpları, zimbalar, matkap uçları, parmak freze çakıları, rulmanlar, kamalar, krank milleri, pistonlar vb. için servis ömürlerinde önemli artışlar kaydedilmiştir [62-63].

Ayrıca son yıllarda kriyojenik işlem metal ve alaşımlarının yanı sıra plastikler ve kompozitlere uygulanarak plastiklerin dayanım ve kompozitlerin ise sertlik, dayanım ve aşınma direncinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır [60].

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

5.1. Ti-6Al-4V ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Su ve arkadaşları, titanyum alaşımlarının yüksek hızda işlenmesi esnasında, kesme bölgesinde oluşan yüksek kesme sıcaklıklarının takım ömrünü hızla azalttığını ifade ederek takım ömrünün artırılmasını büyük ölçüde kesme bölgesine uygulanan soğutma ve yağlama sıvılarının etkinliğine bağlamışlardır. Bu amaçla çalışmalarında kaplamalı sementit karbür takımlarla Ti-6Al-4V alaşımının, yüksek hızda frezelenmesi esnasında uygulanan farklı soğutma ve yağlama şartlarının takım ömrü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada takım ömrünü arttırmak için optimum soğutma-yaglama şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla deneyler kuru, normal soğutma, nitrojen-yag buharı, 0-(-10) °C’de basınçlı soğuk nitrojen gazı gibi soğutma-yaglama koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçları, basınçlı soğuk nitrojen gazı-yag buharı kesme koşullarının en iyi takım ömrünü sağlayan kesme koşulları olduğunu göstermiştir. Aşınma mekanizmaları ve takım ömrünü belirlemek için aşınmış takımların SEM’de analizi yapılmıştır. Bütün kesme koşulları altında serbest yüzey aşınmasının, baskın aşınma tipi olduğu gözlemlenmiştir. Kaplamalı takımlar üzerinde difüzyon ve termal yorulma mekanizmalarının baskın aşınma mekanizmaları olduğu tespit edilmiştir [64].

Ginting ve Nouari, titanyum alaşımlarının, yüksek sıcaklıkta; yüksek direnç ve yüksek mekanik özelliklerin gerekli olduğu havacılık endüstrisinde, yaygın olarak kullanıldığına değinmişlerdir. Bu alaşımların akma mukavemetinin yüksek olmasının mikro yapıdaki dislokasyon hareketlerinin zorluğuna bağlı olduğunu belirterek, titanyum alaşımlarının işlenmesinde karşılaşılan ana problemlerin ise küçük talaş hacimleri ile işlenebilmesi ve takım ömrünün kısa olması şeklinde ifade etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, küresel parmak frezelerle Ti-6242S titanyum alaşımının frezelenmesinde, kaplamasız karbür takımların uygunluğu incelenmiştir. Deneyler kuru kesme şartları altında iki farklı kesme hızı (60-150 m/dak) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eksenel ve radyal kesme derinlikleri (2-8,8 mm) sabit tutularak,

0,1-0,15 mm/diş olmak üzere iki farklı ilerleme hızı denenmiştir. Aşınmış takımlar üzerinde yapılan SEM analizlerinde, yanak aşınması ve kesici kenar üzerindeki aşırı dökülmelerin takım bozulması üzerinde ana etkiye sahip olduğu görülmüştür. Deneyde kullanılan her iki ilerleme hızında da yüksek kesme hızlarında işleme ile yüzey kalitesinin arttığı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile talaş oluşumu modellenmesinin, titanyum alaşımlarının kuru kesme şartlarında işlenmesindeki, kesme parametrelerinin hesaplanması ve takım aşınma mekanizmalarının anlaşılmasına yardımcı olduğu ve iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [65].

Wang ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, yeni takım malzemesi olan BCBN (Binderless Cubic Boron Nitride) takım, Ti-6Al-4V titanyum alaşımı üzerinde kanal frezeleme işleminde kullanılarak kesici takım performansı; kesme kuvvetleri, takım ömrü ve aşınma mekanizmaları açısından değerlendirilmiştir. Sabit kesme derinliği ile yüksek ilerleme hızında, kesme hızındaki artışla takım ömrünün azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek kesme hızı ile düşük ilerleme hızı kombinasyonlarının optimum kesme şartları olduğu ifade edilmiştir. SEM ve EDX’de yapılan gözlemler sonucunda, Ti-6Al-4V titanyum alaşımının BCBN takımlarla yüksek hızda frezelenmesinde, adhezyon aşınma mekanizmasının, baskın aşınma mekanizması olduğu görülmüştür [66].

Lacalle ve arkadaşları, uzay endüstrisinde sıkça kullanılan iki alaşım; nikel esaslı alaşım Inconel 718 ve Ti-6Al-4V’in frezelenmesinde işleme verimliliğini arttırmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Her iki alaşımında, sahip oldukları yüksek sıcaklık direnci ve mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı çeşitli turbo-motor parçalarının imalatında yaygın bir şekilde kullanıldığını vurgulamışlardır. Yapılan çalışmada, bu alaşımların frezelenmesinin zor olmasına etki eden faktörler analiz edilmiştir. Frezeleme işleminin verimliliğini arttırmak için takım geometrisi ve kaplama malzemesi ile işleme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı ve radyal kesme derinliği) etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda frezeleme işleminin verimliliğini arttırmaya yönelik başarılı sonuçlar elde edilmiştir [14].

Nouari ve Ginting, havacılıkta yaygın olarak kullanılan Ti-6242S titanyum alaşımının kuru kesme şartları altında işlenmesinde kullanılan karbür takımların performansını araştırmışlardır. Deneylerde kaplamasız ve çok katlı (CVD) kaplamalı takımlar kullanılmıştır. Kesici takımların bozulmasına neden olan aşınma mekanizmaları çeşitli kesme koşullarında gözlemlenmiş ve her iki takım da baskın aşınma tipinin yanak aşınması olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kesici takım üzerinde difüzyon ve yapışma aşınma mekanizmalarının yanında plastik deformasyon oluşumu görülmüştür. Çok katlı kaplamalı (CVD) kesici takım da aşınmanın başlangıcından birkaç saniye sonra kaplama tabakasının kalktığı ifade edilmiştir. Kaplamasız ve çok katlı (CVD) kaplamalı takımların performansı takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü açısından analiz edilmiştir [67].

Xu ve Geng, Ti Beta 21S titanyum alaşımlarının sahip oldukları yüksek sertlik, yüksek sıcaklıkta yüksek direnç, takım malzemeleri ile reaksiyona girme eğilimleri ve düşük termal iletkenlikleri gibi özelliklerinden dolayı işlenebilirlikleri zor malzemeler olduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları çalışmada, Ti Beta 21S titanyum alaşımının farklı kesici takımlar kullanarak frezelemesinde kesme kuvvetleri ve takım aşınması incelenerek işleme parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak titanyum alaşımlarının işlenmesinde, keskin kenarlı takımların düşük kesme parametrelerinde kullanılması gerektiği ve kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklardan dolayı soğutma sıvısının kullanılması önerilmiştir. Kesici takım malzeme ve geometrisinin, kesme kuvvetleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir [68].

Jawaid ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, Ti-6Al-4V titanyum alaşımı üzerindeki yüzey frezeleme işleminde kullanılan kaplamalı karbür takımların performansları ve aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Deneylerde PVD-TiN ve CVD-TiCN+Al₂O₃ kaplı iki takım kullanılmıştır. Değişik kesme şartları için takım ömrü, takım bozukluk durumu ve aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Her iki takım da en uzun takım ömrü, 55 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/diş ilerleme hızında elde edilmiştir. Kaldırılan malzeme hacmi ve takım ömrü dikkate alındığında CVD kaplı takımlar PVD kaplı takımlara göre daha iyi performans sergilemiştir. Birçok

kesme şartlarında, kesme kenarındaki aşırı dökülmeler ve talaş yüzeyindeki uflanmalar ve/veya dökülmelerin kesici takımların bozulmasında etkili olduğu görülmüştür. SEM analizleri sonucunda kaplamalı kesici takımlar üzerinde yapışma, aşınma, difüzyon, plastik deformasyon ve termal çatlakların olduğu, kaplama tabakasının kalktığı görülmüştür [69].

Mantle ve Aspinwall'ın çalışmasında, Ti-45Al-2Nb-2Mn-0,8 %hacim, TiB₂XDTM alaşımının küresel parmak frezele ile işlenmesi sonucu oluşan yüzey tamlığı incelenmiştir. Gama titanyum alüminyum alaşımının ticari olarak uzay ve otomotiv endüstrisinde kullanıldığını ifade etmişlerdir. Deneylerde kaplamalı tungsten karbür küresel parmak freze kullanılmış ve kesme parametrelerinin tayini bitiş işleme dikkate alınarak seçilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin çoğunlukla 1,5 µm'nun altında olduğu kaydedilmiştir. Artık gerilme analizleri sonucunda yüzeyde 500 MPa'dan daha yüksek gerilmelerin olduğu tespit edilmiştir. Taguchi düşey dizini kullanılarak yüksek hızda frezelemede kesme hızı, yanak aşınması gibi parametrelerin, artık gerilmeler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Analiz sonucunda en büyük etkiye kesme hızı ve yanak aşınmasının sahip olduğu görülmüştür [70].

Ensaroğlu ve Çakır, titanyumun işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalardan yola çıkarak, kesici takım, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve soğutucu/yağlayıcıların bu alaşımların işlenebilirliği üzerine etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca talaş oluşumu, aşınma mekanizmaları, yüzey pürüzlülüğü gibi konulara da etüt içerisinde değinmişlerdir. Titanyumun işlenebilirliği üzerine yapılan bazı deneylerden ve sonuçlarından kısaca bahsetmişlerdir. Yapılan çalışma sonunda, verimliliği ve yüzey kalitesini arttırsa da kesme hızının takım ömrünü en çok etkileyen kesme parametresi olduğu ifade edilmiştir. İlerlemenin titanyumun işlenmesinde takım ömrünü diğer malzemelerde olduğundan daha fazla etkilese ve yüzey pürüzlülüğünü arttırsa da verimliliğin artırılmasında kesme hızına tercih edilmesinin gerekliliğine dikkat çekilmiştir [71].

Sun ve Guo, Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde frezeleme işleminin uzay, biyomedikal ve kimya endüstrisinde yaygın olarak uygulandığını ancak yapılan çalışmalarda, frezeleme işlemindeki yüzey tamlığının çok fazla dikkate alınmadığını tespit etmişlerdir. Bu amaçla farklı frezeleme şartlarında ki yüzey tamlığını karşılaştırmak için bir dizi frezeleme deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarında, frezelenmiş yüzeylerdeki yüzey pürüzlülük değerlerinin 0,6-1,0 μm arasında olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerleri ilerleme ve radyal kesme derinliği ile artmış ancak kesme hızı ile çok fazla değişim göstermemiştir. Kesme hızı ve ilerleme artık gerilmeler üzerinde oldukça fazla etkiye sahip olurken, kesme ve ilerleme yönlerinin her ikisinde de sıkıştırılmış artık gerilmeler oluşmuştur. Mikroyapı analizlerinde ise yüzeye yakın bölgelerde çok küçük ve ciddi şekilde deforme olmuş β fazının olduğu ancak faz dönüşümünün gerçekleşmediği görülmüştür. Frezelenmiş yüzeylerdeki mikro sertliklerin alt yüzeydeki mikro sertliklerden yaklaşık %70-90 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [72].

Akyol, titanyum alaşımları arasında en geniş kullanım alanına sahip Ti-6Al-4V alaşımının işlenebilirliğinin, değişik ısı işlemler kullanılarak artırılmasını hedeflemiştir. Bu alaşıma ait 16 mm çapındaki çubuk şeklindeki malzemeler tavlama, su verme ve yaşlandırma olmak üzere üç değişik ısı işleme tabi tutulmuş ve böylece üç farklı mikroyapı elde edilmiştir. Bu üç farklı mikroyapının her biri tornalama yöntemi ile aynı kesme parametreleri kullanılarak kuru kesme şartlarında işlenmiş ve işlenebilirliğin belirleyicisi olan kesme kuvvetleri, talaş formu, takım ömrü ve yüzey kalitesi parametreleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler literatürle karşılaştırılmış ve sonuç olarak tavllanmış numuneye ait işlenebilirlik kriterleri ile yaşlandırılmış numuneye ait işlenebilirlik kriterlerinin, içyapılarının tamamen farklı olmasına rağmen, birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür [73].

Cantero ve arkadaşları, kuru kesme şartlarında Ti-6Al-4V'nin delinmesinde takım aşınması, delik kalitesi ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Takım aşınması optik mikroskop ve SEM-EDS teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Deliklerin kalitesi geometrik doğruluk ve çapak oluşumu bakımından yorumlanmıştır. Ölçümler, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliği bakımından değerlendirildiğinde,

takım ömrü kriterine yakın bir ana kadar yüksek delik kalitesi gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, iş parçasının mikro sertlik ölçümleri ve SEM-EDS analizleri sonucunda, mekanik özelliklerin kaybolması ile ilgili önemli mikro yapı değişimleri görülmüştür [74].

Dursun, yaptığı çalışmada, kesme parametrelerinin, kuru kesme şartlarında ve eş yönlü işleme tekniğiyle, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Araştırma sürecinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, kesici takım olarak; 3 mikron kalınlığında TiAlN kaplı, iki farklı geometriye sahip yekpare karbür parmak frezeler ve iş parçası olarak; ısıl dirençli alaşımlar olan Inconel 718 ve Titanyum malzemeleri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda ölçülen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması verilerinin istatistiksel analizleri yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması hakkında çıkarılabilecek sonuçlar; çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri, kesme parametreleri ve kesme işleminde kullanılan takımların geometrik özellikleri dikkate alınarak açıklanmıştır. Her iki malzeme ve takım ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda kesme parametreleri; kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin küçük değerlerinde, düşük yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde takım bozukluk durumlarının incelenmesi sonucunda, en fazla kesici takım aşınmasının köşe radyüsü sıfır olan takımda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [75].

Hong ve Ding, işlenebilirliği çok zor olan fakat havacılık endüstrisinde geniş kullanım alanına sahip olan Ti-6Al-4V'yi işleme de sıvı azot (LN2) uygulamışlardır. Kriyojenik işleme kullanılarak en etkin ve ekonomik soğutma yaklaşımını belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada, çeşitli soğutma şartlarında elde edilen kesme sıcaklıkları değerlendirilmiştir. Önceki kriyojenik işleme literatürlerinde bildirilen soğutma yaklaşımlarına ilaveten, bu çalışmada mikrojetler aracılığıyla LN2'yi kesici takımın yan yüzeyine, eğimli yüzeyine ve her iki kesme kenarına yönlendiren yeni ve ekonomik dağıtma metodu uygulanmıştır. Kesme sıcaklıkları teorik olarak sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin edilerek kesme hızının etkisi analiz edilmiştir. Karbür uçların içine yerleştirilmiş ısıl çiftler sayesinde kesme sıcaklıkları ve kesme hızının

etkisi deneysel olarak doğrulanmıştır. Kriyojenik işlemedeki sıcaklıklar klasik kuru kesme ve emülsiyon soğutma ile karşılaştırılmıştır. Bulgular kesme kenarına lokal olarak uygulanan küçük bir miktar likit nitrojenin kesme sıcaklığını düşürmede emülsiyon kesmeye göre daha üstün olduğunu göstermiştir [76].

Yalçın, toz metalürjisi yöntemiyle imal edilen titanyum alaşımı implantların temel özelliklerini araştırmıştır. Çalışma sonunda, Ti-6Al-4V-4Ta alaşımında diğer alaşımlara nispeten yüksek eğilme dayanımı ve buna karşılık gelen sehim miktarı ve kemiğe en yakın elastisite modül ile birlikte kabul edilebilir çekme dayanımı, kuru sürtünme ve hank sıvısı ortamında (sıvı sürtünme) yüksek aşınma performansı saptanmıştır. Ti-6Al-4V alaşımında Ti-6Al-4V-4Ta alaşımı ile benzer aşınma performansına karşılık bu alaşımda eğme durumunda daha kırılğan bir yapı ve çekme deneylerinde daha yüksek tokluk, yüksek elastisite modül değeri elde edilmiştir. Ti-5Al-2.5Fe alaşımında ise, yüksek süneklik, eğme-çekme dayanımı ve tokluğa karşı düşük aşınma performansı, yüksek elastisite modül ve yüksek yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Ti-6Al-7Nb alaşımında ise düşük eğme dayanımı ve düşük aşınma performansı ile birlikte düşük süneklik, kabul edilebilir çekme dayanımı ve yüksek elastisite modülü tespit edilmiştir. Metalografik çalışmalarda, özellikle Ti-5Al-2.5Fe alaşımında, yüksek sinter difüzyonu ile daha yoğun gelişmiş sinter boyun mekanizması ve düşük poroziteli bir karakteristik göstermiş ve buna paralel olarak mekanik özelliklerin daha iyi olduğu görülmüştür. Genel kapsamda, Ti-6Al-4V-4Ta alaşımı diğer alaşımlara nispeten kabul edilebilir çekme dayanımı ile birlikte daha iyi mekanik, tribolojik ve metalografik özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır [77].

Sharif ve Rahim, kaplamasız WC/Co ile TiAlN-PVD kaplamalı karbür matkapların titanyum alaşımlarının delinebilirliği üzerindeki performansını araştırmışlardır. Soğutma sıvısı kullanılarak yapılan delme işleminde, kesme hızının takım aşınması, takım ömrü ve deliğin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi incelenmiştir. Hem kaplamalı hem de kaplamasız matkaplarda, takımın bozulmasına yol açan uniform olmayan yanak aşınmasının, baskın aşınma tipi olduğunu tespit etmişlerdir. Takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü bakımından TiAlN kaplamalı matkaplar, kaplamasız

matkaplara göre daha iyi performans sergilemiştir. En düşük kesme hızında (25 m/dak) ve ilerlemede (0,06mm/dev) yirmi beşinci delik delindikten sonra, TiAlN kaplamalı matkap için kaydedilen en yüksek takım ömrü 7,8 dakika olarak bulunmuştur. Kaplamasız karbür matkabın kesici kenarın hızlı aşınmasından dolayı 25 m/dak ve üzeri kesme hızlarında Ti-6Al-4V delinmesi için kullanımının uygun olmadığı tespit edilmiştir [78].

Güven ve arkadaşları, titanyum alaşımlarının yüksek dayanım/ağırlık oranı, yüksek sıcaklıklara dayanımı, güçlü korozyon dirençlerine sahip olmaları gibi özelliklerinin yanında çeliklere kıyasla %60 daha hafif olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca bu özellikleri sayesinde titanyum alaşımlarının özellikle havacılık, uzay ve medikal endüstrisinde sıkça kullanıldığı ifade edilmiştir. Çalışmalarında, Ti-6Al-4V alaşımlarında çentiklerde süperpozisyon etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla titanyum levhalardan kesilen dikdörtgen kesitli deney numunelerine yan taraflarından (tek taraflı) yarım daireler şeklinde çentikler açılmıştır. Farklı gerilme yığılma kat sayılarına sahip bu çentiklerin NASTRAN paket programı kullanılarak 2,65 ile 1,70 arasında gerilme yığılma katsayılarına sahip oldukları analiz edilmiştir. Aynı zamanda yarım daireler şeklindeki çentiklerin hemen ucuna farklı yarıçaplarda yine yarım daire şeklinde ilave çentikler açılarak çentiklerde süperpozisyon etkisi olarak isimlendirilen teorinin sonlu elemanlar analizleri ile incelenmesi yapılmıştır. Hazırlanan deney numuneleri universal çekme cihazında çekilerek elde edilen gerçek değerler ile teorik modellemeler arasındaki ilişki ve teorik modelin güvenilirliği sorgulanmıştır. Çalışma sonunda, deneysel yöntemler ile elde edilen verilerin göstermiş olduğu eğilim, hem teorik hem de sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen verilerde de mevcut iken sayısal değerlerde farklılıklar görülmüştür [79].

Heinmann ve diğerleri, helisel matkaplar kullanarak derin ve küçük çaplı deliklerin delinmesinin en zor metal kesme operasyonlarından biri olarak düşünüldüğünü ifade etmişlerdir. Böyle düşünülmesi için birçok neden olmakla beraber bunlardan birisinin de soğutma sıvısının kesme bölgesine dışarıdan uygulanma zorunluluğu olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, soğutma sıvısı tipi ve uygulama usulünün 1,5 mm çapında kaplanmış ve kaplanmamış HSS matkapların takım ömrü

üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sade karbonlu çelik üzerinde ve matkap çapının 10 katı kadar derinlikte derin delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda soğutma sıvısına uygun bir alternatif olarak kuru işlemenin uygulanabilirliği de araştırılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde, soğutma sıvısının sürekli uygulanması ile kesikli uygulaması karşılaştırıldığında, kesikli uygulamanın özellikle ısıya duyarlı matkaplarda takım ömründe önemli bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. Yüksek soğutma kapasiteli düşük viskoziteli soğutma sıvısının takım ömrünün artmasında oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir. Kuru kesme şartlarında yapılan deneylerde kullanılan matkapların çoğunda, hızlı bir takım aşınması olduğu ve buna bağlı olarak takım ömründe önemli bir azalma olduğu gözlemlenmiştir [80].

Palanisamy ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımının tornalanması esnasında uygulanan yüksek basınçlı soğutucunun talaş şekli üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İşleme esnasında uygulanan yüksek basınçlı soğutucu ile daha uzun takım ömrü ve işlenen malzeme üzerinde daha iyi bitirme yüzeyi elde edilmiştir. Ayrıca basınçlı bir şekilde uygulanan soğutucunun talaş morfolojisi üzerindeki etkisi incelenerek farklı basınçlarda uygulanan soğutucunun işleme esnasında oluşan talaşın şeklini, kalınlığını ve mikro yapısını önemli bir şekilde değiştirdiği görülmüştür [81].

Nady ve arkadaşları tarafından mühendislik ve biyo-medikal uygulamalarda titanyum alaşımlarının kullanımının giderek arttığı ancak onların işlenebilirliğinin her zaman çözülmesi gereken bir problem olduğu belirtilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımını işlemede yüksek verimlik elde etmek için, sahip olduğu özelliklerin ortaya çıkardığı hızlı takım aşınmasının engellenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Geleneksel ya da düşük basınçlı soğutma yöntemlerinin kesme bölgesinde oluşan ısıyı etkili bir şekilde uzaklaştırmada yetersiz olduğu bunun da takım ömrünün kısa olmasına sebep olduğu ifade edilmiştir. Bu amaçla çalışmalarında, Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasında saf ve suda çözülebilen yağ kullanarak yüksek basınçlı soğutmanın, talaş formu, talaş kırılabilirliği, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü gibi işlenebilirlik parametreleri üzerindeki etkilerini, geleneksel soğutma yöntemi ile karşılaştırarak incelemiştir. Çalışma sonunda, yeterli oranda soğutucu basıncı kullanıldığında takım ömrü ve diğer parametrelerde önemli iyileşmeler sağlandığını tespit etmişlerdir [82].

Arrazola ve arkadaşları, havacılıkta kullanılan Ti555.3 gibi beta titanyum alaşımlarının, bazı özel uygulamalarda, yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının giderek yerini aldığını belirtmişlerdir. Düşük işlenebilirliğe sahip bu beta titanyum alaşımlarının işlenebilirlik verimliliğinin en azından Ti-6Al-4V alaşımının işlenebilirlik düzeyine getirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu amaçla çalışmalarında, Ti555.3 alaşımı ile yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının işlenebilirliğini karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada, Ti555.3 alaşımının işlenmesi esnasında takım üzerinde meydana gelen aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Kesme kuvvetleri, talaş geometrisi ve takım aşınması gibi değişkenler incelendiğinde: (I) 90 m/dak'dan daha yüksek kesme hızlarında işlemede Ti-6Al-4V alaşımı ile karşılaştırıldığında, Ti555.3 alaşımının işlenmesinin daha güç olduğu (II) iş parçası malzemesinin mekanik özellikleri ile takım aşınması ve bileşen kuvvetler arasında bir bağıntı olduğu; (III) her iki titanyum alaşımı için de takım ucu üzerine TiC ve Ti'dan oluşan bir malzeme tabakasının yapışmasına neden olan difüzyonun olduğu görülmüştür [83].

Ezugwu ve arkadaşları, kübik bor nitrür (CBN) takımların, genellikle titanyum, nikel alaşımları ve sertleştirilmiş yüksek kromlu çelikler gibi sert alaşımların işlenmesinde kullanıldığını ve bu takımların, sahip oldukları yüksek erime noktası ve sertliklerinden dolayı yüksek hızda işlemeyle ortaya çıkan ısı ve basınca dayanmaları gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında farklı kalitelerdeki CBN takımların, çeşitli soğutma uygulamaları altında Ti-6Al-4V alaşımının 150, 200 ve 250 m/dak kesme hızlarında tornalanmasındaki performanslarını araştırmışlardır. Kesici takımların performansını belirlemek için takım aşınması, takım ömrü, kesme ve ilerleme kuvveti ile yüzey pürüzlülüğü dikkate alınmıştır. Ayrıca, 150 m/dak kesme hızında CBN takımlar ile kaplamasız sementit karbür takımlar karşılaştırılmıştır. Takım ömrü açısından, aynı kesme şartlarında kaplamasız sementit karbür takımlar, CBN takımlara göre daha iyi performans sergilemiştir. Difüzyon aşınma mekanizmasıyla ilişkili olarak kesici kenarlarda aşırı dökülmeler ve çentiklenmeler görülmüştür [84].

Wang ve arkadaşları, titanyum alaşımlarının işlenmesi zor malzemeler olduğu ve onların işlenmesinde kullanılan geleneksel takımların performanslarının düşük

olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle çalışmalarında Ti-6Al-4V alaşımının yeni takım malzemesi olan BCBN (Binderless Cubic Boron Nitride) takımlarla, yüksek hızda frezelenmesinde kesici takım üzerinde meydana gelen aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Takım performansı ve aşınma mekanizmalarını belirlemek için Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde kanal frezeleme işlemi yapılmıştır. Bu tip takımların, yüksek kesme hızlarında uzun takım ömrü sergilediği ifade edilmiştir. SEM ve EDX'e dayanarak yapılan analizlerde, Ti-6Al-4V alaşımının yüksek hızda frezelenmesinde kullanılan BCBN takım üzerinde baskın aşınma mekanizmasının difüzyon ve adhezyon olduğu görülmüştür [85].

Erdem ve arkadaşları, uçak motorlarında kullanılan titanyum alaşımlarına genel bir bakış yaparak bu malzemelerin gelecekteki kullanımlarını araştırmışlardır. Uçak motorlarında kullanılan titanyumun bazı özellikleri gözler önüne serilmiştir. Uçak motorlarının maruz olduğu sıcaklık ve gerilme değerleri, kalite açısından çok yüksek dayanımlı ve emniyetli malzemelerin belirlenerek kullanılmasını gerekli kıldığı ifade edilmiştir. Çalışmada, titanyumun tercih edilme nedenleri üzerinde durulduktan sonra, mevcut ve yeni imalat yöntemleri üzerinde açıklamalarda bulunulmuştur. Titanyumun düşük yoğunluğu ve bu yoğunluğa rağmen gösterdiği yüksek sıcaklık performansı ile uçak motorlarında daha yıllarca güvenle kullanılacağı sonucuna varmışlardır [86].

Venugopal ve arkadaşları titanyum alaşımlarının işlenmesinde karşılaşılan hızlı takım aşınmasının üstesinden gelinmesi gereken bir sorun olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca soğutucu olarak sıvı nitrojen kullanarak kriyojenik işlemenin, kesme bölgesi sıcaklıklarını azaltmak ve takım ömrünü artırmak için araştırmacılar tarafından incelendiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, 70–100 m/dak kesme hızı aralığında kuru, ıslak ve kriyojenik kesme şartları altında mikro kristalli kaplamasız karbür uçlarla, Ti-6Al-4V çubuk malzemeler tornalanırken, kriyojenik soğutmanın takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sıvı nitrojen enjektörleri ile kriyojenik soğutma sayesinde, kesme bölgesinde istenilen sıcaklığın elde edilmesiyle adhezyon-bozunma-difüzyon takım aşınmalarında azalma olmuş ve takım ömründe önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Sıvı nitrojen püskürtülerek

kriyojenik soğutma ile Ti-6Al-4V alaşımlarının tornalanmasında hem krater hem de yan yüzeylerdeki takım aşınmasında önemli derecede azalmanın olduğu tespit edilmiştir [87].

Hong ve arkadaşları çalışmalarında sıcaklığın, Ti-6Al-4V alaşımının özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmış ve farklı kriyojenik soğutma uygulamalarını karşılaştırmışlardır. Elde edilen bulgular değerlendirilerek yeni ve ekonomik bir kriyojenik soğutma yaklaşımı uygulanmıştır. Sıvı nitrojenden (LN2) minimum miktarda kullanabilmek için yeni bir mikro enjektör tasarlanmıştır. Tasarlanan enjektörün, en yüksek sıcaklık noktasında takım-talaş ara yüzeyine LN2'yi odaklayarak sıvı nitrojeni püskürttüğü ifade edilmiştir. Nitrojen buharlaştığında, buharlaşan nitrojen tarafından oluşturulan nitrojen tamponu, takım ve talaş arasında oluşan sürtünme katsayısının düşmesini sağlamıştır. Kesme kenarının yan tarafına yerleştirilen ve LN2'yi püskürten yardımcı bir mini enjektör kesme sıcaklıklarını daha fazla düşürmüştür. Çalışmada en etkin soğutma, bu iki mikro enjektör kombinasyonunun en düşük LN2 akış hızında kullanarak elde edilmiştir. Enjektör/talaş kırıncının pozisyonu iyileştirildiğinde daha iyi performans elde edilmiştir. Kriyojenik soğutma ile işleme deneyleri, takım ömrünün emülsiyon soğutmaya göre beş kat arttığını ve diğer işleme yaklaşımlarına göre üstünlük sağlandığını göstermiştir [88].

Hasçalık ve arkadaşları Ti-6Al-4V alaşımının geleneksel işleme yöntemleriyle işlenmesinin zor olduğu ifade ederek, Ti-6Al-4V alaşımının 60, 80, 120, 150, 200 ve 250 m/dak dönme hızları altında aşındırıcı su jeti (AWJ) ile işlenebilirliğini araştırmışlardır. İşlemeden sonra tarama elektron mikroskobu (SEM) ve profilometre kullanarak yüzey pürüzlülüğü, kerf geometrisi ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda su jeti dönüş hızının yüzey morfolojisi üzerinde önemli bir parametre olduğu ve dönüş hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü ve giriş açısı konikliğinin arttığı görülmüştür [89].

Hong ve arkadaşları, konvansiyonel soğutma sıvılarının hem soğutucu hem de yağlayıcı olarak görev yaptığına ancak kriyojenik işlemede, sıvı nitrojenin (LN2),

düşük sıcaklıklarından dolayı etkin bir soğutucu olarak bilinmekle birlikte, yağlayıcı özelliğinin bilinmediğine dikkat çekmişlerdir. Bu nedenle, Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde takım ile talaş arasındaki sürtünmenin kesme noktasına LN2 püskürtüldüğünde nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Kesme kuvveti ölçüm sonuçları, titanyum malzemesinin işlenmesinde kriyojenik soğutmanın kesme kuvvetini artırdığını fakat düşük sürtünmeden dolayı ilerleme kuvvetini azalttığını göstermiştir. Eğik kesmede ölçülen üç boyutlu kuvvetleri, takım talaş yüzeyi üzerindeki normal ve sürtünme kuvveti elemanlarına dönüştürmek ve daha sonra etkin bir sürtünme katsayısı elde etmek için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Takım-talaş ara yüzündeki sürtünme katsayısının kriyojenik işlemede oldukça küçüldüğü görülmüştür. Talaş mikro yapı çalışmasından elde edilen bulgular ışığında, ikinci deformasyon bölgesinin artan kayma açısı ve azalan kalınlığı, sürtünmenin azaldığına dair iyi bir kanıt olmuştur [90].

Zhu ve arkadaşları titanyum alaşımlarının sahip olduğu özelliklerinden dolayı işlenebilirliğinin zor olduğunu belirterek çeşitli sementit karbür kesici takımlar kullanarak titanyum alaşımlarının işlenebilirliğini araştırmışlardır. Farklı geometrilerde matkaplar kullanarak derin delik delme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının analizi ile titanyum alaşımları üzerinde derin delik delme deneylerinde kullanılan kesici takımlardan, uygun kesici takım malzemesine ve optimum kesme geometrisine sahip olanlar belirlenmiştir. Eğim açısı 7° , talaş açısı 12° , yan kesici kenar açısı 15° , eksen kaçıklığı 3,5 mm olan kesici takımın optimum geometriye sahip olduğu tespit edilmiştir [91].

Zeilmann ve Weingaertner Ti-6Al-4V titanyum alaşımının, TiAlN, CrCN veya TiCN sert kaplamalarla kaplanmış ve kaplanmamış K10 kalitesinde karbür matkaplarla delinmesi sırasında oluşan sıcaklıkları analiz etmişlerdir. Çalışmanın temel amacı, minimum yağlayıcı kullanmak suretiyle farklı kaplamalarla kaplanmış ve kaplanmamış takımlardaki sıcaklığın değerlendirilmesi olmuştur. Delme esnasında harici bir nozulla ve matkap içerisinden uygulanan minimum yağlama miktarının etkileri incelenmiştir. Takım içerisinden uygulanan minimum yağlayıcı ile yapılan delme işlemindeki sıcaklık ölçümlerinin, harici bir nozuldan uygulanan minimum

yağlayıcı ile yapılan delme işlemdeki sıcaklık ölçümlerinden %50 daha fazla olduğu tespit edilmiştir [92].

Li ve Shih, çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının 9,92 mm çapında, 384 mm³/s talaş kaldırma oranıyla delinmesi sırasındaki sıcaklık ve gerilim dağılımlarını araştırmışlardır. Ters ısı transferi metodunu kullanan bir sonlu elemanlar ısıl modeli uygulanarak takım-talaş temas alanındaki ısı dağılımını ve kesme sıvısının konveksiyon ısı iletim katsayısı bulunmaya çalışılmıştır. Deneysel olarak ölçülen matkap sıcaklığı ile sayısal olarak tahmin edilen matkap sıcaklığını karşılaştırmak suretiyle, oldukça yüksek bir uyumla ısıl modelin gerçekliliğini ortaya koymuşlardır. Matkap gerilim dağılımını çözümlmek için Termo-mekanik sonlu elemanlar analizi uygulamışlardır. Model sonuçları, kesme sıvısı uygulamanın, matkabin kesici ve kanal kenarları çevresindeki sıcaklığı düşürmede önemli olduğunu göstermiştir. 183 m/dak'lık bir çevresel hızla, 0,05 mm/dev ilerleme hızı ile 10,2 mm derinliğindeki bir deliğin kuru şartlarda delinmesinde 1210 °C' ye çıkan sıcaklık, kesme sıvısı uygulamasıyla 651 °C' ye kadar düşmüştür [93].

Ünal ve arkadaşları ticari olarak temin edilmiş Ti-6Al-4V alaşımını dik işlem merkezli bir CNC tezgâhında farklı işleme koşulları altında işlemişlerdir. Deneylerde, kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği gibi parametreler değiştirilerek; parametrelerin yüzey pürüzlülüğü, talaş tipi ve yüzey mikrosertliğine olan etkileri incelenmiştir. Deneyler neticesinde, kesme hızı ve ilerleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de arttığı tespit edilmiştir. İşlem neticesinde, yüzey sertliğinin esas malzemedan daha yüksek, yüzey altı bazı bölgelerde ise aşırı yaşlanma nedeniyle daha yumuşak bölgelerin varlığı gözlemlenmiştir. Genel olarak sürekli sıvanmalı ve testere diş kesitli talaşların oluştuğu belirlenmiştir [94].

5.2. Kriyojenik İşlem ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Firouzdor ve arkadaşları, karbonlu çeliklerin yüksek hızlarda ve kuru kesme şartlarında M2 HSS matkaplarla delinmesinde kriyojenik işlemin aşınma direnci ve takım ömrü üzerine etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, kriyojenik işlem ve

ısı prosesi uygulanmış matkap ömürlerinde sırasıyla %77 ve %126 iyileşme göstermiştir. Talaşların kimyasal analizi ve SEM analiz gözlemleri sonucunda, difüzyon aşınması baskın aşınma mekanizması olarak saptanmıştır. Aşınma direncinin iyileşmesini, başlıca kriyojenik işlem uygulanması ile homojen karbür partiküllerinin şekillenmesi ve buna bağlı olarak difüzyon aşınma mekanizmasına karşı matkapların direncinin artması ile ifade etmişlerdir. İlave olarak sahip olunan östenitin, martensite dönüşmesi de aşınma direncinin artmasında etkin rol oynamıştır [95].

Gill ve arkadaşları, kriyojenik işlemin tungsten karbür uçların takım ömrünü uzattığını belirterek literatürde tornalama işleminde kriyojenik işlem uygulanmış tungsten karbür uçların performansı üzerine soğutma sıvısının etkisini içeren bir çalışma olmadığına dikkat çekmişlerdir. Ortogonal tornalamada, soğutma sıvısının etkisini anlamak için kuru ve ıslak kesme şartları altında, kriyojenik işlem uygulanmış tungsten karbür uçların aşınma davranışlarını karşılaştırmışlardır. Talaş kırıcılı kare biçimli tungsten karbür uçlar temin edilmiş ve -196 °C’de kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Kesme deneyleri sürekli ve kesikli işleme şartlarında ISO 3685-1993’e uygun olarak yapılmıştır. Takım ömrünü belirlemek için seçilen kriter maksimum yanak aşınması (0,6 mm) olarak alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, hem sürekli hem de kesikli işleme şartları altında özellikle yüksek kesme hızlarında kriyojenik işlem uygulanan tungsten karbür uçların ıslak tornalama şartlarındaki kesici takımlara göre daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Aynı zamanda, sürekli işleme ile karşılaştırıldığında kesikli işleme şartlarında takım ömründe fark edilir bir artış kaydedilmiştir [96].

Sreeramareddy ve arkadaşları yaptıkları araştırmada, kaplanmış tungsten karbür ISO P-30 tornalama uçları kriyojenik işleme (-176 °C) tabi tutmuşlardır. İşleme çalışmaları, hem kriyojenik işlem uygulanmış hem de uygulanmamış tungsten karbür kesici takım uçlar kullanılarak C45 iş parçası üzerinde yapılmıştır. C45 çelik iş parçasının işlenebilirliği kesici takım ucunun yanak aşınması, asıl kesme kuvveti ve işlenen parçanın yüzey pürüzlülüğü bakımından değerlendirilmiştir. C45 çeliğin

işlenmesinde kriyojenik işlem uygulanmış karbür takımların yanak aşınması, kriyojenik işlem uygulanmamış karbür takımlarından daha düşük olmuştur. C45 çeliğinin işlenmesi sırasındaki kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, kriyojenik işlem uygulanmamış karbür takımlarla karşılaştırıldığında kriyojenik işlem uygulanmış karbür takımlarda daha düşük olduğu tespit edilmiştir [97].

Akhbarizadeh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada D6 takım çeliğinin aşınma direnci üzerine kriyojenik işlemin etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, sığ kriyojenik sıcaklık olarak $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve derin kriyojenik sıcaklık olarak ise $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmak üzere iki sıcaklık derecesi kullanılmıştır. D6 takım çeliğinin aşınma davranışı üzerine kriyojenik sıcaklığın (sığ ve derin), kriyojenik işlem zamanının (20 ve 40 saat için kriyojenik sıcaklıkta bekletme) ve stabilizasyonun (1 hafta oda sıcaklığında bekletme) etkileri araştırılmıştır. Aşınma deneyleri iki farklı yük (120 ve 180 N) ve üç farklı hız (0,05; 0,1 ve 0,2 m/s) uygulanarak pin-on-disk aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulgular, kriyojenik işlemin kalıntı östeniti azalttığını ve aynı zamanda aşınma direncini ve sertliği iyileştirdiğini göstermiştir. Kalıntı östenitin eliminasyonu ile birlikte daha iyi homojenize olmuş karbür dağılımından dolayı derin kriyojenik işlem, sığ kriyojenik işlem ile karşılaştırıldığında aşınma direnci ve sertlikte daha fazla iyileşme göstermiştir. Kriyojenik sıcaklıklarda bekletme süresi arttıkça, daha fazla kalıntı östenit martensite dönüşmüş bundan dolayı da aşınma direnci ve sertliğin daha fazla arttığı gözlenmiştir. Stabilizasyondan sonra oda sıcaklığında 1 haftalık periyot için numuneler bekletildiğinde, daha fazla kalıntı östenit martensite dönüşerek daha yüksek aşınma direnci ve sertlik elde edilmiştir [98].

Yong ve arkadaşları, kriyojenik işlemin çoğu kesici takımın ömrünü uzattığının bilindiğini ancak bu zamana kadar kriyojenik işleme ait detaylı çalışmaların sadece takım çelikleri üzerine yapıldığını belirterek kriyojenik işlemin tungsten karbür kesici takımlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çeliklerin ortogonal tornalanması sırasında kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış kesici takım uçları arasındaki takım performanslarını analiz etmişlerdir. Kesikli işleme

operasyonlarında kriyojenik işlem uygulanmış takımların daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir [99].

Da Silva ve arkadaşları, kriyojenik işlem uygulanmış yüksek hız çeliği kesici takımlar üzerinde yapılan çalışmaların, önemli derecede takım ömrünü ve verimliliğini etkileyen mikro yapı değişiklikleri gösterdiğini tespit etmişlerdir. Literatürde yapılan çalışmalarda, endüstride kriyojenik işleme tabi tutulmuş HSS takımlar kullanıldığında takım ömrünün %91 den %817'ye kadar iyileşme gösterdiğini vurgulamışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, M2 yüksek hız çeliği takımlar üzerine kriyojenik işlem uygulanmasının etkisini doğrulamayı amaçlamışlardır. Mikroyapı analizi ile birlikte aşındırma ve sertlik testleri yapılmış ve bu testlerin bazılarında kriyojenik işlem uygulanmış takımların avantajlı olduğu görülmüştür. M2 HSS numunelerinin sertliği ve mikro sertliği kriyojenik işlemle önemli derecede değişmemiştir. Kriyojenik işlem uygulanmamış numunede gözlemlenen östenitin %25'i kriyojenik işlem ile martensite dönüşmüştür. Aynı kesme şartlarında kriyojenik işlem uygulanmış takım uygulanmamış takıma göre %44 avantaj sağlamıştır. Sonuç olarak kriyojenik işlem M2 HSS matkapların performansını artırmıştır. Takım ömrü bakımından, kullanılan kesme şartlarına bağlı olarak %65 ila %343 arasında değişen değerlerde performans artışı sağlanmıştır [10].

Mohan Lal ve arkadaşları, kriyojenik işlemin çeliklerde klasik ısı davranışı işlemini tamamlayıcı bir işlem olduğunu vurgulamışlardır. Kaplamaların aksine parçanın tüm bölümünü etkileyen, bir kereye mahsus yapılan ucuz ve kalıcı bir işlem olduğu ifade edilmiştir. Farklı malzemelerde kriyojenik işlem parametrelerinin önemi ve takım aşınmasını azaltma üzerine bir çalışma yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, kriyojenik işlemin takım ömründe yaklaşık olarak %110'a varan bir iyileşme sağladığı tespit edilmiş hatta TiN kaplamalara da üstünlük sağladığı görülmüştür [56].

Huang ve arkadaşları, kriyojenik işlemin takım ömrünü arttırdığının teyit edilmesine rağmen, bunun altında yatan mekanizmaların açık bir şekilde ifade edilmediğine dikkat çekmişlerdir. Çalışmalarında, M2 takım çeliğinin kriyojenik işlem

uygulanmadan önceki ve sonraki mikroyapı değişikliklerini araştırmışlardır. Araştırma sonucu kriyojenik işlemin karbon kümelenme oluşumunu kolaylaştırabileceği ve sonraki ısıtma işlemiyle de karbür yoğunluğunu artırabileceği tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak da çeliklerin aşınma direncinin arttığı ifade edilmiştir. Kriyojenik işlem martensit matristeki karbür oluşumunu kolaylaştırmanın, karbür popülasyonunu ve hacmini artırmanın yanı sıra daha homojen karbür dağılımı ortaya çıkarmıştır. Elde edilen sonuçların, aşınma direncinde iyileşme için gerekli olan karbür yoğunluğunda ve hacim oranındaki artmaları gösteren önceki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür [7].

Yong ve arkadaşları, tungsten karbür takımlara uygulanan kriyojenik işlemin etkilerini araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin, çoğu kesici takım malzemelerinde takım ömrünü uzattığının bilindiğine, ancak takım ömrünü uzatmasının arkasındaki mekanizma hakkında çok az bilgi olduğuna işaret etmişlerdir. Şimdiye kadar, takım çeliklerine uygulanan kriyojenik işlemle ilgili çok az çalışma olduğu bununla birlikte, sanayide tungsten karbür kesici takımların yaygın olarak kullanıldığı ifade edilmiştir. Çalışmada, orta karbonlu çeliğin yüksek hızda frezelenmesi sırasında kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış tungsten karbür kesici takım uçlarının performansları karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Kuru kesmeye ilave olarak aynı zamanda soğutma sıvısı yardımıyla işleme de test edilmiştir. Sonuçlar, kriyojenik işlem uygulanmış takımların uygulanmamış takımlardan daha iyi bir takım aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda kesme esnasında soğutma sıvısı uygulaması, kriyojenik işlem uygulanmış takımlar tarafından denenmiş ve takım aşınmasını azaltmaya yardımcı olduğu görülmüştür. İlaveten bir takım özel kesme şartları altında yapılan deneylerde, en iyi performansı kriyojenik işlem uygulanmış takımlar sergilemiştir [100].

Gisip ve arkadaşları, kuru ağaç ve ağaç kompozitlerinin işlenmesinde, kesici takımların soğutma sıvıları ve yağlarla soğutulmasının uygun olmadığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, takım aşınmasını azaltmada kesici takımlar için soğutulmuş hava kullanmanın ve kriyojenik işlemin kesici takım üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çift kanallı, katı, tungsten karbür freze (router) uçları olmak üzere

toplam dört çeşit uç, CNC frezede orta yoğunluklu odun lifi levhasını (MDF-Medium Density Fiberboard) işlemek için kullanılmıştır. Bu dört takım -149 °C altında kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Kesme esnasında, iki takım oda sıcaklığında kullanılırken, diğer iki takıma soğutulmuş hava uygulanmıştır. Kesici takımların, takım aşınmasını ölçmek için stereo ışık mikroskobu kullanılarak aşınma fotoğrafları çekilmiştir. Kesme işlemi tamamlandıktan sonra takımların boşluk yüzeylerinde bulunan spesifik elemanların yüzdesini saptamak için tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak element analizi yapılmıştır. Soğutulmuş hava ve kriyojenik işlem kullanıldığında daha az takım aşınması ortaya çıkmış buna bağlı olarak ta MDF kesmede kullanılan takımın ömrü artmıştır [101].

Seah ve arkadaşları, çeşitli sıfır altı ısıtma işlemlerin kobalt bağlayıcılı tungsten karbür kesici takım uçlarının takım ömürleri ve aşınma karakteristikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Kesici takım uçları altı farklı ısıtma işleme maruz bırakılmıştır. (a) olduğu gibi bırakma, (b) su verme işlemi, (c) kriyojenik işlem, (d) kriyojenik işlemden sonra temperleme, (e) soğuk işlem ve (f) soğuk işlem sonrası temperleme. Son söylenen dört ısıtma işlemin uygulandığı kesici uçların, çatlama karşı dirençlerinin arttığı, bunun yanında yüksek kesme hızlarında önemli derecede takım ömrü ve aşınma direncinde artışların olduğu gözlenmiştir. Kesici takım üzerinde meydana gelen değişimleri açıklamak için mikro yapı analizleri kullanılmıştır [102].

Darwin ve arkadaşları, derin kriyojenik işlemin bir kez yapılan kalıcı bir işlem olduğunu belirterek başlıca avantajının aşınma direncini artırması olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında maksimum aşınma direnci elde etmek için %18 Cr içeren martensitik paslanmaz çelikten (SR34) yapılmış ticari bir piston segmanına uygulanan derin kriyojenik işlem parametrelerini optimize etmek için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Optimizasyon için kullanılan kriyojenik işlem parametreleri şu şekilde sıralanmıştır: soğutma hızı, bekletme sıcaklığı, bekletme zamanı, temperleme sıcaklığı ve temperleme zamanı. Optimum derin kriyojenik işlem parametrelerine ulaşmak için iki iterasyonlu Taguchi metodu kullanılmıştır. İlk iterasyon esnasında, bu faktörlerin önemini ve muhtemel iki faktörlü etkileşimlerin etkisini anlamak için $L_{16}2^{15}$ ortogonal dizisi Taguchi deneyini yapmak için de

kullanılmıştır. İkinci iterasyonda L_93^4 ortogonal dizisi optimal seviyelere çıkmak için Taguchi deneyini yapmada kullanılmıştır. Aşınma testleri, G-181 ve G-133 ASTM standartları doğrultusunda ağırlık kaybı metoduyla karşılıklı sürtünme ve aşınma monitörü (RFWM-Reciprocatory Friction and Wear Monitor) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma direncini artırmak için yapılan derin kriyojenik deneyi ve kontrol parametrelerinin bağıl önemi, varyans analizi (ANOVA- Analysis of Variance) kullanılarak yüzde katkıları bakımından değerlendirilmiştir. SR34 piston segmanı malzemesinin aşınma direnci üzerinde en önemli etkiye bekletme sıcaklığının sahip olduğu, bekletme süresinin ise aşınma direncini arttırma üzerindeki maksimum katkı oranının %72 olduğu tespit edilmiştir. En iyi bekletme sıcaklığının ise -184 °C olduğu tahmin edilmiştir. Doğrulanen deney sonuçları %95 güvenirlilik aralığında bulunmuştur. Ulaşılan optimum şartlar itibariyle kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin aşınma direncinde %43,8 artış görülmüştür [103].

Thakur ve arkadaşları çalışmalarında, farklı son işlemlere maruz bırakılan sementit tungsten karbür (WC) kesici takımların bazı mekanik özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Tungsten karbür-kobalt (WC-Co) uçlara uygulanan farklı son işlemler şunlardır: a) kontrollü kriyojenik işlem, b) ısıtma ve basınçlı hava ile soğutma, c) ısıtma ve yağ banyosunda su verme. Yukarıda belirtilen farklı son işlemlere maruz bırakılan WC-Co uçlar, tarama elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla mikro yapı değişimleri ve mikro sertlik açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca XRD cihazında X ışınları kırınımı aracılığıyla Co metalik faz değişimleri incelenmiştir. Deney sonuçları, yukarıda bahsedilen son işlemlerin uygulanmasıyla dikkate değer değişimlerin olduğunu göstermiştir. Kontrollü kriyojenik işlem aşınma direncini iyileştirmiştir. Bu da karbür partiküllerini sıkıca tutan kobalt metal bağlayıcının fiziksel değişimlerine ve yoğunlaşmasına bağlanmıştır. Mikro yapıda yapılan incelemelerde sonraki iki işlem uygulandığında tungsten karbür partiküllerinin uniform dağılım gösterdiği tespit edilmiştir [104].

Harish ve arkadaşları, En 31 rulman çeliğinin mikro yapısı üzerinde sıg ve derin kriyojenik işlemin etkilerini araştırmışlardır. En 31 rulman çeliği, çeliklere sertlik kazandırmak için yapılan konvansiyonel ısıt işleminden daha çok sertlik kazandıran

kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Tarama elektron mikroskobu kullanılarak kriyojenik işleme tabi tutulmuş çeliğin kırılma fotoğrafı analizi, sıg kriyojenik işlem uygulanmış numunede eş eksenli çukurların ve düz yüzeylerin varlığını göstermiştir. Derin kriyojenik işlem uygulanan numune de ise geniş alana yayılmış mikro çatlaklar görülmüştür. Kriyojenik işlem uygulanmış En 31 çeliği üzerine yapılan temperlemenin etkisini ortaya koymak için yapılan mikro yapı analizleri optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı analizi, temperlemenin sonucu olarak martensit matristeki ince karbür partiküllerinin oluşumunu ortaya çıkarmıştır. Bundan dolayı, kriyojenik işleminden sonra, ikinci karbür çökmesi ile sertlik artışı ve aşınma direncinde iyileşmenin sağlanması için temperleme yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Sertlik, klasik ısıtıl işlem uygulanmış numuneye göre sıg kriyojenik ve derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde sırasıyla %13 ve %14 artmıştır [105].

Preciado ve arkadaşları çalışmalarında, dişlilerde kullanılan karbürizasyon çeliklerinin sertliği ve aşınma direnci üzerine derin kriyojenik işlemin etkilerini araştırmışlardır. Derin kriyojenik işlem (-190 °C'de 22 saat) su verme işleminden sonra temperleme işlemine tabi tutulmuş çeliklerde aşınma direncini arttırmış, fakat sertlik artışı, sadece 200 °C'de temperlenen çeliklerde görülmüştür. Kalıntı östenitin etkisini azaltmak ve dişliler üzerine uygulanan kriyojenik işlemin etkisini arttırmak için malzemeler kriyojenik işleme tabi tutulmadan önce stabilize edilmiştir. Karbon ve alaşım elemanlarının, oluşan yeni konsantrasyonda, sertlikte artma meydana getiren kriyojenik işlem ile bir araya toplandığı ve 200 °C'de temperleme sırasında çekirdek bölgeleri oluşturduğu ihtimali ileri sürülmüştür. Aşınma direnci için en iyi ısıtıl işlemin kriyojenik işlemin takip eden 160 °C'de temperleme işleme olduğu tespit edilmiştir [106].

Wang ve arkadaşları çalışmalarında destabilizasyon işlemine maruz bırakılan 16Cr1Mo1Cu dökme demirin mikro yapı, sertlik ve aşınma direnci üzerine derin kriyojenik işlemin etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonuçları, destabilizasyon ısıtıl işleminden sonra, kriyojenik işlemin kalıntı östeniti etkin bir şekilde azalttığını fakat kalıntı östeniti tamamen martensite dönüştüremediğini göstermiştir. Kriyojenik

işlemin yüksek kromlu dökme demirin döküm sertliğini ve aşınma direncini önemli derecede iyileştirebildiğini belirtmişlerdir. Destabilizasyon ve daha sonra kriyojenik işlem uygulandığında, ikinci karbür çökmesi ($M_{23}C_6$) miktarının hava ile soğutmadakinden daha fazla olduğu görülmüştür. Döküm sertliğinin ve aşınma direncinin artmasının asıl nedeninin, destabilizasyon ısı işleminden sonra kriyojenik işlem esnasında oluşan ikinci karbür çökmesinin olduğu tespit edilmiştir [107].

Zhirafar ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışmada, AISI 4340 çeliğin mekanik özellikleri ve mikro yapıları üzerine kriyojenik işlemin etkileri araştırılmıştır. Yorulma, darbe ve sertlik deneylerini içeren mekanik deneyler çeşitli ısı işlem şartlarında yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda, numunelerin kırılma özellikleri mukayese edilmiştir. Genellikle konvansiyonel olarak ısı işlem uygulanan çeliklerle karşılaştırıldığında kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin tokluğunun daha düşük, sertlik ve yorulma dayanımının ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Nötron kırılımı, kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin, temperleme sırasında muhtemel karbür oluşumu ile sertlik ve yorulma direncinin artmasındaki temel faktörün, kalıntı östenitin martensite dönüşümü olduğunu göstermiştir. Çalışma sonuçları, yorulma yüklerine maruz kalan AISI 4340 çelik parçalarında derin kriyojenik işlemin bazı yararlı etkilerinin olduğunu göstermiştir [58].

Leskovšek ve arkadaşları, vakum ısı işlem uygulanan ESR AISI M2 yüksek hız çeliği ile $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de derin kriyojenik işlemle birlikte vakum ısı işlem uygulanan aynı çeliğin aşınma davranışlarını karşılaştırmışlardır. Aynı östenitleme sıcaklığında östenitlenen numuneler için dört farklı temperleme sıcaklığı, K_{Ic} kırılma tokluğu ve Rockwell-C sertliğinin önceden saptanan değerlerini elde etmek için özenle seçilmiştir. Bundan dolayı, sekiz numunenin her biri bu iki malzeme özelliği bakımından karakterize edilmiştir. Daha sonra malzemelerin aşınma davranışları karşılaştırılmış ve bu iki malzeme özelliğinin (sertlik ve kırılma tokluğu) mikro yapı ile olan ilişkisi ortaya konulmuştur. Derin kriyojenik işlem ile elde edilmesi mümkün olan sertlik ve kırılma tokluğunun her ikisinin de daha fazla uniform ve orta dereceli (fakat yeterince yüksek) değerlerinin, yüksek hız çeliğinin aşınma direncini

arttırmada etkili olduğu görülmüştür. Genelde derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin kırılma tokluğu ve sertliklerinin vakum ısıtma işlemine tabi tutulan numunelerden daha yüksek olduğu görülmüş ve aşınma direncinin temperleme sıcaklığı ile arttığı tespit edilmiştir. Ortalama fakat yeterince yüksek sertlik ve kırılma tokluğu değerlerinin, bu parametrelerden sadece birisinin oldukça yüksek olduğu durumdan daha iyi aşınma direnci sağladığı görülmüştür [108].

Das ve arkadaşları, -196 °C sıcaklıkta kriyojenik işlem uygulanan AISI D2 çeliğinin aşınma özellikleri, sertlik değerleri, mikro yapı karakteristikleri ve aşınma direncinin maksimizasyonu üzerinde, kriyojenik işlemin uygulandığı 0–132 saat arasındaki farklı bekletme sürelerinin etkilerini araştırarak optimum bekletme süresinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Farklı kriyojenik işlemlere tabi tutulmuş numunelerin yapı-özellik ilişkilerinin araştırılması sonucu en iyi aşınma direncinin 36 saat kriyojenik işleme tabi tutulan numunelerde elde edildiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, mikro yapı özellikleri, sertlik değerleri ve aşınan yüzeylerin topografisi incelenerek doğrulanmıştır [109].

Baldissera ve Delprete kriyojenik işlemi yaklaşık -83 °C (sığ kriyojenik işlem) ve yaklaşık 193 °C (derin kriyojenik işlem) aralığında belirlenen sıcaklığa kadar bir parçayı kademeli soğutma işlemi olarak tanımlamışlardır. Malzemelerin belirlenen bir bekletme zamanı için bu sıcaklıklarda tutulup daha sonra oda sıcaklığına kademeli olarak getirildiğini buradaki amacın ise mekanik özelliklerde (genellikle sertlik ve aşınma direnci) iyileşme sağlanması olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada malzemeler üzerine derin kriyojenik işlem uygulamalarına artan ilgiyi dikkate alarak, ticari sementasyon dişli çeliğinin (18NiCrMo5) statik-mekanik özellikleri üzerine derin kriyojenik işlemin etkisini, optik kırılma fotoğrafı gözlemleri ile sertlik ve çekme deneyleri aracılığıyla araştırmışlardır. Çalışmada konvansiyonel sementasyondan sonra gerçekleştirilen derin kriyojenik işlem ve temperlemenin sertlik ve çekme dayanımı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. İlave olarak, bekletme zamanı etkisi, ön temperleme ve derin kriyojenik işlem durumları analiz edilmiştir. Yanlış çözümlerden kaçınmak için deneysel verilerin istatistikî analizine özel önem verilmiştir. Sonuçlar, tüm kriyojenik işlem uygulanmış

numuneler için önemli sertlik artışları (+0,6 HRC'den +2,4 HRC'ye kadar) ve dikkate değer çekme dayanımı artışı (+%11) göstermiştir. Derin kriyojenik işlem parametrelerinin uygulama gereksinimlerine bağlı olarak dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir. Çekme deneyleri esnasında elastikiyet modülünde küçük ama önemli artışlar ölçülmüştür. Mikroyapısal mekanizmalardaki iyileşmeler açısından deneysel sonuçlar, literatürdeki benzer çelikler üzerine uygulanan derin kriyojenik işlem sonuçları ile benzerlik göstermiştir [48].

Baron'un yaptığı çalışmada, -84 °C ve -196 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta uygulanan kriyojenik işlemin abrasif aşınma direncini iyileştirmedeki etkisini ortaya koymak için 12 takım çeliği, 3 paslanmaz çelik ve 4 diğer çeliklerden oluşan 19 malzeme kriyojenik işleme maruz bırakılmıştır. -196 °C sıcaklıkta bekletilen takım çeliklerinin aşınma dirençlerinde önemli bir artış olurken -84 °C sıcaklıkta bekletmede ise aşınma dirençlerindeki artış daha az olmuştur. Benzer şekilde paslanmaz çelikler için de kriyojenik işlemten sonra aşınma direncinde bir artış gözlenmiştir. Fakat bu iki bekletme sıcaklığının aşınma direnci üzerinde oluşturduğu fark %10'dan daha az olmuştur. Sade karbonlu çelik ve dökme demir, her iki bekletme sıcaklığında da uygulanan kriyojenik işlemle bir iyileşme göstermemiştir [50].

Dhokey ve Nirbhavne, D-3 takım çeliklerinin kriyojenik işleme tabi tutulduktan sonra çoklu temperlemenin aşınma üzerindeki etkisini araştırmak için Pin-on-disk test cihazı kullanarak aşınma deneyleri yapmışlardır. Konvansiyonel su verme (950 °C) ve temperleme (150 °C), orta derece kriyojenik işlemle (-185 °C) birlikte yapılmıştır. Pin-on disk cihazında numunelerin aşınma deneyleri 5,5 kg yükte 6000 m kayma mesafesi için 3,0 m/s kayma hızında, kuru kayma durumunda yapılmıştır. D-3 takım çeliğinin iyileşen aşınma direncinden sorumlu metalurjik mekanizmanın altında yatan gerçek, aşınan yüzeyin sertlik verileri, mikro yapıları, aşınma hasarı ve SEM analizleri incelenerek açıklanmıştır. D3 takım çeliğine uygulanan işlem çeşitleri ST; sertleştirme (950 °C) ve temperleme (2 saat için 275 °C), SK; sertleştirme (950 °C) ve kriyojenik işlem uygulama (8 saat için -186 °C),

SKT; sertleştirme (950 °C) ve kriyojenik işlem uygulama (8 saat için -186 °C) ve tek temperlemekten (2 saat için 150 °C) oluşmuştur.

Mevcut çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- ST ve SKT’de sertlikler aynı kalırken, kriyojenik işlem uygulanmış D3 takım çeliklerinin tek aşamalı temperlemekten üç aşamalı temperlemeye kadar sertliklerinde azalma görülmüştür.
- Tek temperlemeli D3 takım çeliğinin aşınma oranının en düşük olduğu görülmüştür. Yaklaşık ST’nin aşınma oranından %93 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir. Sonraki temperlemeler, yani çift ve üç temperleme D3 çeliğinin aşınma direncini olumsuz etkilemiştir.
- ST ve SKT’nin aynı sertliği için aşınma direncindeki değişim, karbür boyutu ve dağılımından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Karbür boyutunun büyümesi çift ve üç temperleme şartlarında görülmüş olup bu da aşınma direncini düşürmesine sebep olmuştur [110].

Surberg ve arkadaşları boyutsal kararlılığın takım çeliklerinin imalatında en önemli faktörlerden biri olduğunu belirterek AISI D2’nin sahip olduğu üstün özellikleri ve düşük maliyeti ile yıllardır sac metal kalıpları için en çok kullanılan çeliklerden biri olduğunu vurgulamışlardır. AISI D2 takım çeliğinin genellikle vakum sertleştirmeyi takip eden çoklu temperleme çevrimleri ile işleme tabi tutulduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca sertleştirme ve temperleme işlemleri arasında derin kriyojenik işlemin, boyutsal kararlılığı ve son işleme özelliklerini iyileştirerek işleme zamanını azaltabileceği ileri sürülmüştür. Çalışmada, sertleştirilmiş bloklar, tekli ve çoklu temperleme basamakları (520 ve 540 °C) ve derin kriyojenik işlem uygulamalarının (-90, -120 ve -150 °C) çeşitli kombinasyonlarına maruz bırakılmıştır. En iyi boyutsal kararlılık, en düşük sıcaklıkta derin kriyojenik işlemle (-150 °C) elde edilmiştir. Boyutsal kararlılığın derin kriyojenik işlem zamanından bağımsız olduğu ifade edilmiştir [111].

Liu ve arkadaşları, çalışmalarında alt kritik ısı işleme maruz kalmış 14Cr2Mn2V yüksek kromlu dökme demirin (YKDD) mikro yapı, sertlik ve abrasyon aşınma direnci üzerine kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, kalıntı östenitin martensite dönüşerek ikinci karbür çökmesinin $[(Fe, Cr)_{23}C_6]$ oluştuğunu, alt kritik ısı işleminden sonra kriyojenik işlemin, YKDD'nin sertlik ve abrasyon direncini net bir şekilde arttırdığını göstermiştir. Alt kritik ısı işlem ve sonra kriyojenik işlem uygulanan YKDD'deki martensit ve ikinci karbür çökeltisi miktarının, alt kritik ısı işleminden sonra havada soğutulan YKDD'den daha fazla olduğu görülmüştür. YKDD'nin abrasyon direnci maksimuma ulaştığında, mikro yapıda yaklaşık %15 kalıntı östenitin varlığı tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem östenit miktarını önemli derecede azaltsa da, kalıntı östeniti tamamen martensite dönüştürememiştir. Sonuç olarak kriyojenik işlem, daha çok ikinci karbür çökmesini sağlamada ve YKDD'nin aşınma direncini arttırmada önemli bir rol oynamıştır [112].

Indumathi ve arkadaşları, poliamid (PI), politetrafloroetilen (PTFE), polikarbonat (PC), polieterimid (PEI) ve poliüretan (PU) gibi bir grup termoplastik mühendislik polimerlerinin aşınma performansı üzerine kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Aynı zamanda, kısa fiberglas ve solid yağ miktarının artması ile elde edilen PI, PEI'nin kompozitler ve kopolimerler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Seçilen malzemeler 24 saat boyunca sıvı nitrojen sıcaklığında kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Abrasif aşınma performansı, silisyum karbür (SiC) zımpara kullanılarak pin-on-disk test cihazında ve oda sıcaklığında tek bir paso için değerlendirilmiştir. Çeşitli yükler altında kriyojenik işleme tabi tutulmuş ve tutulmamış numunelerin aşınma oranları karşılaştırıldığında uygulanan bu tekniğin, bazı polimerler ve kompozitlerin aşınma direncini arttırmada belli bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte, pin-on-disk test cihazında %20'den daha fazla yükleme yapıldığında, aşınmada lif bozulması görülmüştür. Aşınma direnci üzerine kriyojenik işlemin etkisinin büyüklüğü, temel matris ve niteliğinin tipi, lif veya parçacık dolgu malzemesinin miktarına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Kristal yapı ve sertlikteki değişimler araştırılmış ve gözlenen aşınma davranışı ile ilişkilendirilmiştir. Kriyojenik işlemin morfolojide meydana getirdiği değişimleri araştırmak için tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır [113].

Bramipour ve arkadaşları, Flex-R ve Hedstrom eğelerinin aşınma direnci üzerine kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Bu aletler, Instron test cihazına bağlanmış ve 1,5 mm kalınlığında dentin plakasına karşı 300 kere ileri geri harekete (6 mm hareket aralığı, 600 mm/dak hız, 1 N yük) maruz bırakılmıştır. Aşınmalar, dentin işlemeden önceki ve sonraki (1,5 mm kalın) akrilik numunelerdeki kanalların kesme derinliğinin (eğenin konumunu değiştirmeksizin) karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Eğeler için verimli kesmedeki nispi değişimin ortalama ve standart sapması ($n = 20$) tayin edilmiştir. Varyans analizi, bütün eğelerin kesme verimliliğinin dentin üzerindeki aşınmadan ($p < 0,0001$) sonra önemli derecede azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, eğelerin ön ve son kesme verimliliği oranları karşılaştırıldığında, kriyojenik işlemin eğelerin aşınma direncini etkilemediği görülmüştür [114].

Bensely ve arkadaşları, kayma ve yuvarlanma temasına maruz kalan tüm makine parçalarının bir miktar aşınma ile karşı karşıya kaldığını bundan dolayı da parça başarısızlığına yol açan aşınmanın, önemli bir tribolojik olay olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında, aşınma ve çatlaklardan dolayı ayna ve pinyon dişlinin sık gözlenen başarısızlığı nedeniyle kriyojenik işlemin, sementasyon çeliğinin (En 353) aşınma direnci üzerine etkisini araştırmışlardır. Aşınma deneyleri ASTM standardına göre yağlama olmadan pin-on-disk test cihazında yapılmıştır. Konvansiyonel ısıtma işlemi, ısıtma kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem olmak üzere üç farklı ısıtma işlemi maruz kalan numuneler üzerindeki aşınma deneyleri, üç farklı yüklemde ve yedi kayma hızında yapılmıştır. Aşınma direnci ısıtma kriyojenik işleminden dolayı, dikkate değer bir şekilde artmış ve konvansiyonel ısıtma işlemiyle karşılaştırıldığında, derin kriyojenik işlem, aşınma direncinde daha çok iyileşme sağlamıştır. Konvansiyonel ısıtma işlemi üzerine ısıtma kriyojenik işlem %85, derin kriyojenik işlem ise %372 daha fazla aşınma direnci sağlamıştır. Sonuç olarak üç ısıtma işlemi arasında tavsiye edilen derin kriyojenik işlem olmuştur. Aşınma direnci ve sertlikteki iyileşme kriyojenik işlemle kalıntı östenitin martensite dönüşmesine atfedilmiştir. ısıtma ve derin kriyojenik işlem uygulanmış numuneler arasındaki sertlik değeri aynı olmasına rağmen ısıtma kriyojenik işlem uygulanmış numunelerle karşılaştırıldığında derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin aşınma direnci

daha yüksek olması ikinci karbür çökmesinin olması ve karbürlerin daha iyi dağılım göstermesine bağlanmıştır [55].

Bensely ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada X ışını kırınımı tekniği kullanılarak sementasyon çeliklerinde (En 353) kalıntı gerilmelerinin dağılımı üzerine kriyojenik işlemin etkisi araştırılmıştır. Konvansiyonel ısıtılma işlemi ilave olarak sıg kriyojenik işlem (-80 °C) ve derin kriyojenik işlem (-196 °C) olmak üzere iki tip kriyojenik işlem uygulanmıştır. Konvansiyonel ısıtılma işlemi, sıg kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işleme tabi tutulan numunelerde kalıntı östenit miktarları sırasıyla %28, %22 ve %14 olarak bulunmuştur. Temperlenmemiş şartlardaki konvansiyonel ısıtılma işlemi, sıg kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işleme tabi tutulan numuneler, sırasıyla -125 MPa, -115 MPa ve -235 MPa yüzey kalıntı gerilmelerine sahip olmuştur. Temperlemeden sonra konvansiyonel ısıtılma işlemi, sıg kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işleme tabi tutulan numuneler, sırasıyla -150 MPa, -80 MPa ve -80 MPa, yüzey kalıntı gerilmelerine sahip olmuştur. Üç işlemin karşılaştırmalı sonuçları, temperlemeden önce kriyojenik işleme tabi tutulan çelikte basınçlı yüzey gerilmelerinde bir artış olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlar, derin kriyojenik işleme tabi tutulan çeliğin, temperlemeye maruz kaldığında basınçlı kalıntı gerilmelerinde bir azalma olduğunu göstermiştir. Gerilim giderme işlemleri, temperlemeli derin kriyojenik işleme maruz kalan numunelerde ikinci karbür çökmesini oluşturmuştur [59].

Bensely ve arkadaşları, otomotiv, hava araçları, yarış motorları ve ateşli silahlar gibi uygulamalarda parça ömrünü ve performansını iyileştirmek için çeşitli çalışmalar yaptığını ve son on yıldır çeliklerin performansı üzerine kriyojenik işlemin etkisinin araştırmaların ilgi odağı olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında, 815M17 sementasyon çeliğinin çekme davranışı üzerine kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, çekme veya yorulma yüklerine maruz kalan dişlilerde, dişli malzemesi olarak kullanılan çeliklerin kullanım sürelerini uzatmak ve 815M17 çeliğinin dayanımını artırarak yeterli bir çekme mukavemetine sahip olmasını sağlamak amaçlanmıştır. Numuneler üzerinde ASTM standardına göre çekme deneyleri yapılarak, konvansiyonel ısıtılma işlemi, sıg kriyojenik işlem ve derin

kriyojenik işlemin etkileri karşılaştırmalı bir şekilde ortaya konulmuştur. Mevcut sonuçlar, konvansiyonel ısıtım işlemi ile karşılaştırıldığında, 815M17 için çekme dayanımının kriyojenik işlemde (yani, hem sıg kriyojenik işlem hem de derin kriyojenik işlem) sonra düşük miktarda azaldığını teyit etmiştir. Kırık yüzeylerin tarama elektron mikroskobu analizi, sıg kriyojenik işleme maruz kalan malzemede çukur ve düz kırıkların, derin kriyojenik işlem ve konvansiyonel ısıtım işleme maruz kalan malzemelerinkinden daha yaygın olduğunu göstermiştir [115].

Xuan ve arkadaşları 30Cr2Ni4MoV rotor çeliğine uygulanan farklı işlemlerin, korozyon direnci üzerine etkilerini karşılaştırmışlardır. Isıtım işlemi, derin kriyojenik işlem ve lazerle yüzey yumuşatmayı içeren üç farklı işlem, 30Cr2Ni4MoV rotor çeliği üzerine uygulanmıştır. Kızgın suda işlem görmüş numunelerin korozyon direncini değerlendirmek için elektrokimyasal polarizasyon eğrisi ve yüksek sıcaklıktaki basınçlı kapta gerilme korozyon testi kullanılmıştır. Sonuçlar, konvansiyonel ısıtım işleminin, düşük akma dayanımlı numuneler için K_{IH} değerini artıracak ve bundan dolayı gerilmeli korozyon çatlaması hassasiyetini düşürecek olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, derin kriyojenik işlem uygulanmış numune için, sınırlı karbon çökmesi ve östenit dönüşümünden dolayı, sertlik ve korozyon direnci üzerinde belirgin bir iyileşme görülmemiştir. Karşılaştırma yapıldığında, 90 °C sıcaklıkta yapılan elektrokimyasal polarizasyon test sonuçlarına göre üç farklı proses uygulanmış numuneler arasında lazer işlemi uygulanmış numuneler, en iyi korozyon direncine sahip olmuştur. Buna rağmen, büyük miktardaki deformasyondan dolayı kendinden yüklenen U dirseğin imalatı sırasında gerilmeli yüzeyde bazı mikro çatlaklar oluşmuş ve bundan dolayı kızgın su ortamında gerilmeli korozyon çatlama direncinin azalmasına neden olmuştur [116].

Bensely ve arkadaşları, ayna dişlisi ve pinyon gibi araç transmisyon elemanlarının imalatında kullanılan sementasyon çeliklerinin yorulma ve kırılma davranışlarını daha iyi anlayabilmek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. En 353 çeliği, konvansiyonel ısıtım işlemi, sıg kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem olmak üzere üç farklı işleme tabi tutulduktan sonra, yorulma mukavemeti bakımından incelenmiştir. Tüm numuneler için oda sıcaklığında yorulma deneyleri yapılmıştır.

Kırılan numune yüzeyleri, yorulma esnasında ortaya çıkan mekanizmaları tanımlamak için tarama elektron mikroskopunda incelenmiştir. Sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin, konvansiyonel ısıtma işlemi uygulanmış numunelere göre yorulma ömründe, sırasıyla %71 iyileşme ve %26 azalma gözlenmiştir. Kalıntı östenitin ve karbürlerin birleşik bulunması, sığ kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin, konvansiyonel ısıtma işlem ve derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelere göre daha iyi bir yorulma mukavemetine sahip olmasına neden olmuştur [117].

Vadivel ve Rudramoorthy araştırmalarında, kriyojenik işlemin kesici takım malzemelerinde ömür artışı sağlayan önemli mikroyapı değişimleri meydana getirdiğini ifade etmişlerdir. Günümüz endüstrisinde tungsten karbür kesici takımlar yaygın olarak kullanıldığını ancak şu ana kadar karbür kesici takımlar üzerinde kriyojenik işlemle ilgili sadece birkaç detaylı çalışma olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bu nedenle küresel grafitli dökme demirin tornalanmasında kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış kaplamalı karbür takımların performanslarını analiz etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, kriyojenik işlem uygulanmış (CT) kaplamalı karbür takımlar yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi ve yanak aşınması bakımından kriyojenik işlem uygulanmamış (UT) kaplamalı karbür takımlara göre daha iyi performans göstermiştir. CT ve UT kaplamalı karbür takımların aşınma dirençlerini belirlemek için tarama elektron mikroskobu ile analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kriyojenik işlem uygulanmış takımların aşınma direncinin, uygulanmamış takımlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [118].

Harold, orta yoğunluklu fiberin (MDF) tornalanmasında takım aşınması bakımından kriyojenik işlem (-188 °C) uygulanmış C2 tungsten karbür (WC %6 Co) kesici takımlarla, kriyojenik işlem uygulanmamış takımları karşılaştırmıştır. Kesme kuvveti verileri ve kesici kenar gözlemlerinin her ikisi de takım aşınmasının azaldığını göstermiştir. Kriyojenik işlemin mikroyapı ve faz değişimleri meydana getirerek kobalt bağlayıcısı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu yüzden kesme esnasında daha fazla kobalt bağlayıcısının muhafaza edildiği tespit edilmiştir [119].

Poomani ve arkadaşları, imalatda yüksek talaş kaldırma oranları ile işlemede iyi bir yüzey kalitesi ve daha uzun takım ömrünün esas gereksinimlerden biri olduğunu belirterek bu hedeflerin işleme esnasındaki takım aşınmasının azaltılarak elde edilebileceğine değinmişlerdir. Yine kriyojenik işlemin, takım ömrü, tokluk ve aşınma direncini arttırmak amacıyla kullanılmakta ve kesici takımın performansını iyileştirmek için uygulanan etkin ikincil işlemlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca dökme demir ve çeliklerin işlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılan sermetlerin, mükemmel termal çatlak direnci, aşınma direnci ve sertlik ile tokluğun dengelenmiş kombinasyonuna sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, sermet kesici takımların performansları üzerine kriyojenik işlemin etkilerini analiz etmek için Ti (C, N) esaslı sermet kesici takımlara kriyojenik işlem uygulanmıştır. İşleme deneyleri, farklı kesme hızlarında sabit ilerleme ve kesme derinliğinde 45 HRC'ye kadar sertleştirilmiş AISI 4340 çeliği üzerinde yapılmıştır. Kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış sermet kesici takımlar arasında, kesici takım üzerinde meydana gelen krater ve yanak aşınması ile işlenmiş yüzeylerdeki yüzey pürüzlülükleri bakımından karşılaştırma yapılmıştır. Kriyojenik işlem uygulanmış sermet kesici takımlar uygulanmamış takımlara göre daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Ayrıca kriyojenik işlem uygulanmış takımlarla daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir [120].

Sreerama ve arkadaşları derin kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış P-20 tungsten karbür kesici takımlar kullanarak karbon çeliği iş parçası üzerinde işleme deneyleri yapmışlardır. C45 çeliğinin işlenmesinde, derin kriyojenik işlem uygulanmış takımlardaki yanak aşınmasının kriyojenik işlem uygulanmamış takımlardakinden daha düşük olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, C45 çeliğinin işlenmesi esnasında ölçülen kesme kuvveti değerleri ile işlenmiş yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerinin, derin kriyojenik işlem uygulanmış takımlarda uygulanmamış takımlara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir [121].

Ramji ve arkadaşları araştırmalarında gri dökme demirin delinmesinde kriyojenik işlem uygulanmış HSS matkapların performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında delme esnasındaki eksenel kuvvet ve tork değerleri dinamometre

kullanılarak, delinmiş numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ise talysurf yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel sıralama, Taguchi'nin ortogonal dizin tekniği kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca yanıt değişkenleri üzerinde parametrelerin etkisini tanımlamak için Sinyal-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio) analizi yapılmıştır. Bütün deney şartlarında daha düşük eksenel kuvvet, tork ve daha iyi yüzey pürüzlülüğü bakımından kriyojenik işlem uygulanmış takımların, uygulanmamış takımlara göre daha üstün olduğu görülmüştür [122].

Yong ve Ding çalışmalarında, kriyojenik işlemin ağırlıkça %8 Co içeren sementit karbür kesici takımların mekanik ve manyetik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kriyojenik işlem uygulanan kesici takımların sertlik, basma dayanımı, aşınma ve yorulma direncinde iyileşme kaydedilirken tokluk ve bükme dayanımlarında çok fazla bir değişiklik olmamıştır. Manyetik özellikler üzerinde ise artık mıknatıslanım giderici kuvvetteki artış ile doyma yoğunluğunda azalma tespit edilmiştir. Mekanik özelliklerin değişimi büyük ölçüde bekletme zamanına bağlanmıştır. Bu da kriyojenik işlem esnasında α -Co (FCC) den ϵ -Co (HCP)'e martensitik faz dönüşümünün gerçekleşmesi ve artık gerilmelerin değişmesine atfedilmiştir [123].

Ramji ve arkadaşları araştırmalarında gri dökme demirin tornalanmasında kaplamalı karbür takımlar üzerine yapılan kriyojenik işlemin etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Kaplamalı kesici takımlar oda sıcaklığından kriyojenik sıcaklık olan $-175,9^{\circ}\text{C}$ 'ye 3 saatte getirilmiş 24 saat bu sıcaklıkta bekletildikten sonra yaklaşık 5 saatte oda sıcaklığına tekrar getirilmek suretiyle kriyojenik işlem uygulanmıştır. Kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, yanak aşınması ve takım uç sıcaklığı kaplamalı ve kriyojenik işlem uygulanmış kaplamalı takımın her ikisinde de ayrı ayrı ölçülmüştür. Yanıt değişkenleri üzerinde parametrelerin etkisini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Tornalama işleminden sonra kesici takımlar üzerinde meydana gelen yanak aşınmasını belirlemek için tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bütün deney şartlarında daha düşük yanak aşınması ve daha iyi yüzey pürüzlülüğü bakımından kriyojenik işlem uygulanmış takımların uygulanmamış takımlara göre daha üstün olduğu görülmüştür [124].

Koneshlou ve arkadaşları H13 sıcak iş takım çeliğinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde düşük sıcaklık (sıfır altı) işlemlerinin etkisini araştırmışlardır. H13 malzemesine sıfır altı işlemler olarak -72°C 'de kriyojenik işlem ve -196°C 'de derin kriyojenik işlem uygulanmış bunun sonucunda malzeme içerisindeki kalıntı östenit martensite dönüşmüştür. Uygulama sıcaklığı azaldıkça daha fazla kalıntı östenitin martensite dönüştüğü ve aynı zamanda mikroyapıda daha küçük ve daha homojen karbür dağılımı sağlandığı tespit edilmiştir. Derin kriyojenik işlem daha homojen ve çok ince karbür parçacıkların çökmesini sağlamıştır. Mikro yapıda meydana gelen bu değişiklikler H13 takım çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır [125].

Gill ve arkadaşları, bugüne kadar yapılan birçok araştırmada kaplamanın yapışma dayanımı açısından kaplamalı tungsten karbür kesici takımların performansı üzerinde kriyojenik işlemin etkisini ortaya koyan çalışmaların olmadığını vurgulamışlardır. Bu nedenle çalışmalarında, kriyojenik işlemin kaplamanın yapışma dayanımı üzerindeki etkisini anlamak için ortogonal tornalama işleminde kriyojenik işlem uygulanmış kaplamalı tungsten karbür kesici takımların işleme performansı ve aşınma davranışlarını araştırmışlardır. Ticari olarak kullanılan TiAlN kaplı kare formlu tungsten karbür uçlar (P25) tedarik edilmiş ve birbirinden bağımsız olarak -110°C 'de (sığ işlem) ve -196°C 'de (derin işlem) iki farklı kriyojenik işlem uygulanmıştır. Tornalama performansını belirlemede kriter olarak ISO 3685-1993'de tavsiye edilen maksimum yanak aşınması (0,6 mm) esas alınmıştır. Deney sonuçları, sığ kriyojenik işlem uygulanmış kaplamalı sementit karbür takımların derin kriyojenik işlem uygulanmış ve herhangi bir işlem uygulanmamış kesici takımlara göre daha üstün olduğu görülmüştür. Sonuç olarak herhangi bir işlem uygulanmamış takımla karşılaştırıldığında derin kriyojenik işlem uygulanmış takımın ömründe önemli bir azalma olduğu bu da derin kriyojenik sıcaklığın (-196°C) TiAlN kaplı uçlar üzerinde negatif bir etki yaptığı VDI-3198 çentik testi ile doğrulanmıştır [126].

Baldissera, 18NiCrMo5 sementasyon çeliğinin yorulma davranışı üzerinde derin kriyojenik işlemin etkilerini, deneysel merdiven testleri ve tarama elektron mikroskobu (SEM) kırılma fotoğrafı gözlemleri aracılığıyla araştırmıştır. Çalışmada,

geleneksel sementasyondan sonra yapılacak derin kriyojenik işlem ve temperlemenin farklı sıraları arasında karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Bekletme süresinin etkisini analiz etmek için ön temperlenen derin kriyojenik işlem durumu için iki farklı bekletme süresi denenmiştir. Deneysel verilerin dikkatli bir şekilde istatistikî analizi yapılmış ve *SNP* eğrileri maksimum olabilirlik metodu kullanılarak çizilmiştir. Literatürde sık bir şekilde bildirilen karbür değişimine sebep olan derin kriyojenik işlemin yorulma davranışı üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ön temperlenen derin kriyojenik işlem durumunda, yorulma ömründe genel bir kayba neden olan kalıntı gerilme durumunu içeren diğer bazı değişiklikler iyileşmeleri dengelerken, son temperlenen derin kriyojenik işlemin, daha güvenilir ve mukavemetli malzeme davranışını vermede yan etkilerinin olmadığı tespit edilmiştir [127].

5.3. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

Yapılan literatür araştırmaları incelendiğinde, endüstride çok geniş bir kullanım alanına ve titanyum alaşımları içerisinde %60'lık paya sahip olan Ti-6Al-4V alaşımı üzerindeki çalışmaların tornalama ve frezeleme operasyonları üzerine yoğunlaştığı delme operasyonlarıyla ilgili yeterli çalışmanın olmadığı görülmektedir. Oysa havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan malzemeler üzerindeki delme operasyonlarının diğer talaşlı imalat yöntemlerine göre daha çok kullanıldığı bilinmektedir. Ti-6Al-4V alaşımının da ağırlıklı olarak bu sektörde kullanımının olması bu malzemenin delinebilirliği üzerine çalışma yapmanın önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca literatürde Ti-6Al-4V alaşımının sahip olduğu özellikleri ile işlenebilirliği zor malzemeler sınıfında yer aldığı belirtilmektedir. Delme işleminin kapalı bir alanda oluşması, yüzeyden akan sıcaklığın yetersiz olması ve dönme ekseninde kesici ağız boyunca kesme hızı değerinin sıfır olması gibi problemler nedeniyle delme işleminin diğer talaşlı imalat yöntemlerine göre daha karmaşık ve daha zor bir operasyon olduğu söylenebilir. Bu operasyonun Ti-6Al-4V alaşımı gibi işlenebilirliği zor bir malzeme üzerinde yapılacak olması bu alanda çalışma yapmanın önemini bir kez daha arttırmaktadır.

Kriyojenik işlemle ilgili yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde ise çalışmaların çoğunlukla malzemelerin aşınma direncini artırma amaçlı yapıldığı, işlenebilirlik çalışmalarında kullanılan kesici takımların performansını arttırmaya yönelik araştırmaların yetersiz olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, kriyojenik işlemin, uygulama sıcaklıklarına bağlı olarak sıg kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem olarak farklı uygulamalarını görmek mümkündür. Sıg kriyojenik işlem ile derin kriyojenik işlemin malzemelerin aşınma direnci üzerindeki etkilerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda genellikle derin kriyojenik işlemde daha iyi sonuç alındığı vurgulanmaktadır. Bununla birlikte kriyojenik işlemdeki bekletme sürelerinin de etkili olduğu ifade edilmektedir. Yine aşınma direnci üzerinde bekletme sürelerinin etkisinin araştırıldığı çalışmalarda en iyi sonucun alındığı bekletme süresinin 24 saat olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlemin kesici takımlara uygulanması suretiyle yapılan işlenebilirlik çalışmalarında ise kesici takım ömründe ciddi iyileşmeler kaydedilmiştir. Takım ömrünün yanı sıra kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde de olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. İşlenebilirlik çalışmalarında işleme maliyetleri üzerinde kesici takım maliyetinin büyük bir yere sahip olması kesici takımlar üzerine uygulanan kriyojenik işlemle ilgili çalışma yapmayı gerekli kılmaktadır. Özellikle delme takımlarının tornalama ve frezeleme uçlarına göre üretim maliyetinin çok daha yüksek olması kriyojenik işlemin delme takımları üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasını gerektirmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda kriyojenik işlem uygulanmış takımların, Ti-6Al-4V alaşımı gibi düşük ısı iletim katsayısına ve düşük işlenebilirlik özelliğine sahip olan malzemeler üzerinde test edilmemiş olması bu alandaki açığı ortaya koymaktadır.

Ülkemizde çoğunlukla kalıp imalatında kullanılan kalıp ve takım çeliklerinin aşınma direncini artırma amacıyla uygulanan kriyojenik işlem, endüstride takım maliyetlerinin azaltılmasında da önemli rol oynayacak potansiyele sahiptir. Ancak bu alanla ilgili bilimsel boyutta yapılan çalışmaların olmayışı araştırılması gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yukarıdaki değerlendirmeler doğrultusunda bu alanla ilgili literatürdeki eksikliklerin giderilmesi ve kesici takım ömürleri üzerinde artışlar sağlanarak imalat sektöründeki

işletmelere teknolojik veri sağlanması açısından yapılacak çalışmanın önemli bir yer tutacağına inanılmaktadır.

6. MALZEME VE METOT

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının kuru ve ıslak kesme şartları altında kaplamalı ve kaplamasız M42 HSS (yüksek hız çeliği) ve tungsten karbür matkaplarla delinmesinde kesme parametrelerinin; kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, delik kalitesi ve takım ömrü üzerindeki etkileri incelenerek optimum delme şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca kriyojenik işlemin kesici takımların performansları üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla kaplamasız HSS ve tungsten karbür matkapların bir kısmına kriyojenik işlem diğer bir kısmına ise kriyojenik işlemi müteakip temperleme işlemi uygulanmıştır.

6.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Deneylerde 100x80x15 mm ebatlarında ASTM B265 özelliklerine sahip Ti-6Al-4V alaşımı numuneler kullanılmıştır. Numune ebatları dinamometre üzerine bağlanacak olan bağlama kalıbının ölçüleri dikkate alınarak tespit edilmiştir. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 6.2’de verilmiştir. Deney numunelerine ait malzeme sertifikası EK-1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
89,858	5,9	4,00	0,08	0,14	0,01	0,01	0,002

Çizelge 6.2. Ti-6Al-4V alaşımının fiziksel özellikleri [128]

Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Sertliği Rockwell C	% Uzama
900-1100 MPa	830 MPa	36	10

6.2. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı

Delme deneyleri, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Johnford VMC-550 marka CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Bu tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Deneylerde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri

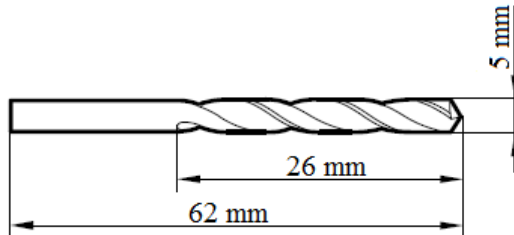
Tezgâh gücü	10 KW
Maksimum devir sayısı	8000 dev/dak
Sırasıyla x, y, z eksen	600, 500, 600 mm
Ölçü hassasiyeti	0,001 mm
İşletim sistemi	Fanuc

6.3. Deneylerde Kullanılan Kesici Takımlar ve Kesme Parametreleri

Deneylerde kullanılan 5 mm çapındaki M42 HSS ve tungsten karbür matkap uçları Guhring kesici takım firmasından temin edilmiştir. Temin edilen kesici takımlara ait özellikler ve deneylerde kullanılan kesme parametreleri Çizelge 6.4'te kesici takımların diğer boyutları ise Şekil 6.1'de verilmiştir. Her iki matkap için de kesme parametrelerinin tayini, literatürden [78, 92, 129] istifade ederek ve kesici takım kataloğunda tavsiye edilen değerler göz önünde bulundurularak ayrı ayrı yapılan ön deney çalışmaları neticesinde belirlenmiştir.

Çizelge 6.4. Kesici takım özellikleri ve kesme parametreleri

Kesici Takım Malzemesi	M42 (HSS)	Tungsten Karbür
Standart	DIN 338	DIN 6539
Kesici Geometrisi	Ø5mm, 135° uç açısı	Ø5mm, 140° uç açısı
Kesme Hızları	6, 8, 10, 12 m/dak	15, 20, 25, 30 m/dak
İlerleme Hızları	0,04; 0,05; 0,06 mm/dev	0,04; 0,06; 0,08 mm/dev
Kesicinin Cinsi	Silindirik saplı kısa helisel matkap ucu	



Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan HSS ve tungsten karbür matkapların boyutları

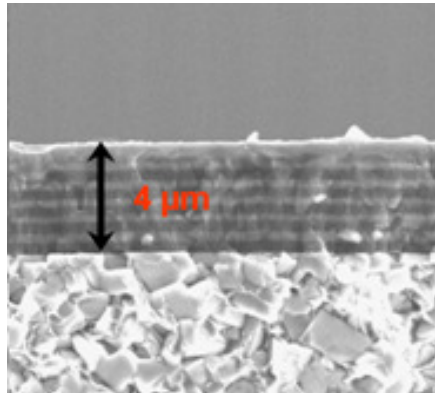
6.4. Kesici Takım Kaplama Malzemeleri

Kaplamasız ve kriyojenik işlem uygulanmış takımlarla mukayese yapabilmek amacıyla M42 HSS ve tungsten karbür matkapların bir kısmına, Guhring kesici takım firması tarafından PVD (Fiziksel Buharlaştırma Metodu) yöntemiyle çok katlı TiAlN/TiN (Fire) kaplama yapılmıştır. Çizelge 6.5'te çok katlı kaplamaya ait özellikler, Şekil 6.2'de ise çok katlı kaplama yapısı verilmiştir.

Çizelge 6.5. Kaplama özellikleri [130]

	Kaplamalı-M42 HSS (TiAlN/TiN-PVD)	Kaplamalı-Tungsten Karbür (TiAlN/TiN-PVD)
Kaplama kalınlığı (μm)	4	4
Sertlik (HV 0,05)	3600	3600
Kaplama yapısı	Çok katlı	Çok katlı
Katman	6	6
Sürtünme katsayısı	0,3	0,3
Termal iletkenlik (kW/mK)	0,05	0,05

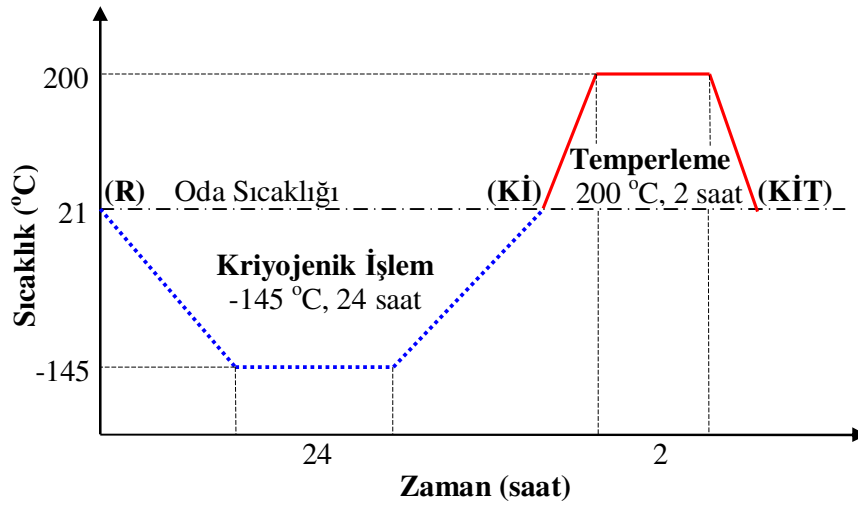
TiAlN/TiN çok katlı bir kaplama tipi olup özellikle HSS ve sert metal helisel matkaplarda kullanılmaktadır. Delik delmede çok iyi bir aşınma direnci ve termal kararlılık sağlamaktadır. Bu kaplama, normal soğutma sistemleri ile kullanmanın yanı sıra minimum miktarda yağlama sistemi veya kuru işleme için de uygundur [130].



Şekil 6.2. TiAlN/TiN çok katlı kaplama yapısı [131]

6.5. Kriyojenik İşlem ve Temperleme

Kaplamasız M42 HSS ve tungsten karbür kesici takımların bir kısmına kriyojenik işlem diğer bir kısmına ise kriyojenik işlemi müteakip temperleme işlemi uygulanmıştır. Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme işlemine ait ısıtma işlem eğrisinin şematik gösterimi Şekil 6.3'te verilmiştir. Kesici takımlar oda sıcaklığından -145°C 'ye yaklaşık $1-2^{\circ}\text{C/dak}$ soğutma hızı ile kademeli olarak soğutulmuş, bu sıcaklıkta 24 saat bekletildikten sonra yine $1-2^{\circ}\text{C/dak}$ ısıtma hızı ile kademeli olarak oda sıcaklığına getirilerek kriyojenik işlem uygulanmıştır. Kriyojenik işlem ile ısıtma sonrası kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile kesici takımların aşınma dirençlerinin artırılması amaçlanmıştır. Kriyojenik işlem uygulanan HSS ve tungsten karbür kesici takımların bir kısmına ise kriyojenik işlemin ardından 200°C 'de 2 saat bekletmek suretiyle temperleme işlemi uygulanmıştır. Kriyojenik işlemi müteakip uygulanan temperleme işlemi ile de daha homojen karbür dağılımı ile kesici takımların aşınma dirençlerinin artırılması hedeflenmiştir.



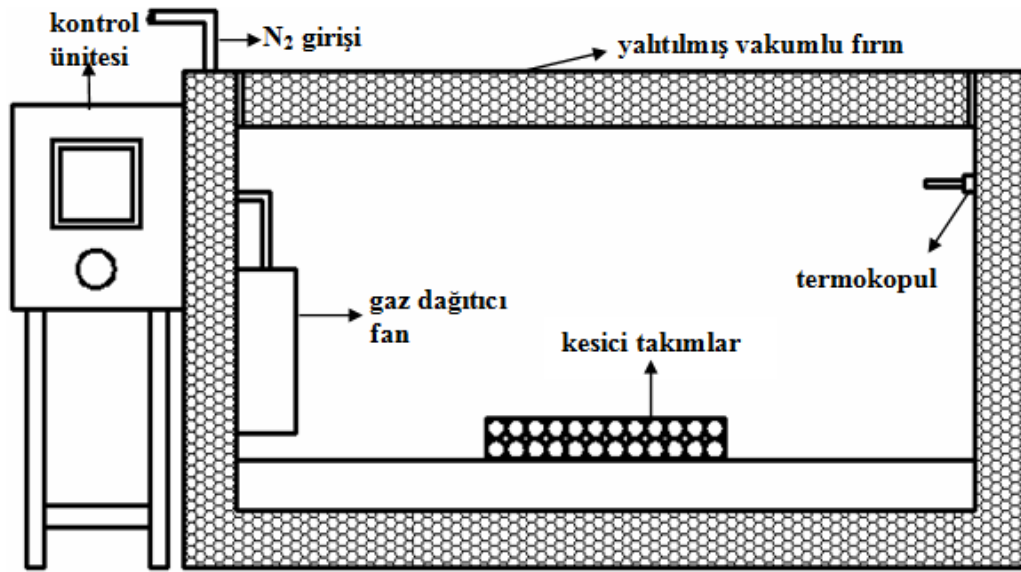
Şekil 6.3. Kaplamasız HSS ve sementit karbür takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme ısıtma işlem özeti

(R) Herhangi bir işlem uygulanmamış (Referans matkap)

(Kİ) Kriyojenik işlem uygulanmış

(KİT) Kriyojenik işlemin ardından temperleme işlemi uygulanmış

Şekil 6.4'te kriyojenik işlem uygulanan PLC kontrollü fırının şematik gösterimi verilmiştir. Basınçlı ortamdaki sıvı azot fırın içerisine girdiğinde gaz fazına dönüşmekte ve fan yardımıyla fırın içerisinde homojen bir gaz dağılımı elde edilmektedir. Böylece kesici takımlara sıvı haldeki azotun teması ile olası çatlamaların önüne geçilmektedir. Kesici takımların termal şoklara maruz kalmaması için yukarıda bahsedildiği gibi soğutma ve ısıtma işlemleri kademeli olarak gerçekleştirilmiştir.



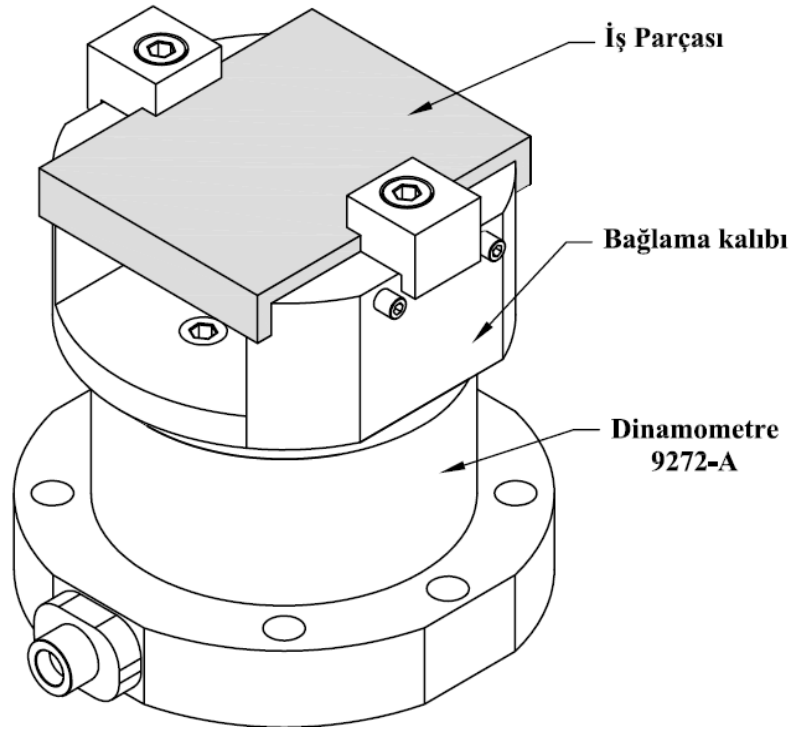
Şekil 6.4. Kriyojenik işlemin uygulandığı sistemin şeması

6.6. Islak Kesme Deneylerinde Kullanılan Soğutma Sıvısı

Delme deneylerinin bir kısmı kuru kesme şartlarında diğer bir kısmı ise ıslak kesme şartlarında yapılmıştır. Soğutma sıvısı olarak Q8 BARANI XCI-H yarı sentetik emülsiyon (%6) kullanılmıştır. Soğutma sıvısı seçimi kesici takım firmalarının direktifleri doğrultusunda literatürdeki tavsiyeler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Harici soğutma yöntemi kullanılarak soğutma sıvısı kesme bölgesine dışarıdan tatbik edilmiştir.

6.7. Bağlama Kalıbı Tasarımı ve İmalatı

Deney numunelerinin dinamometreye sağlıklı bir şekilde bağlanarak delme esnasındaki kesme kuvveti ve moment değerlerinin alınabilmesi amacıyla Şekil 6.5'te resmi verilen bağlama kalıbı tasarlanarak imal edilmiştir.



Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan bağlama kalıbı ve dinamometre üzerindeki gösterimi

6.8. Deney Sayısı ve Deliklerin Deney Numuneleri Üzerindeki Dağılımı

M42 HSS ve tungsten karbür matkapların her ikisi içinde ayrı ayrı dört kesme hızı üç ilerleme hızı kullanılmıştır. Çizelge 6.6, 6.7 ve 6.8'de kesme parametrelerine, kesme şartlarına, kesici takımlara uygulanan kriyojenik işleme bağlı olarak yapılan toplam deney sayısı ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Çizelge 6.6'da kriyojenik işlem uygulanmadan, Çizelge 6.7'de kesici takımlara kriyojenik işlem uygulanarak ve Çizelge 6.8'de kesici takımlara kriyojenik işlem ardına temperleme işlemi uygulanarak yapılan toplam deney sayısı yer almaktadır. Farklı kesici takım, kesme

parametreleri ve kesme şartlarında 192 adet olmak üzere 3 kez tekrarlarla 576 adet delme deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca buradaki deneylere ilave olarak takım aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneylerine ait detaylı bilgiler, “Takım Aşınmasının Belirlenmesi” başlığı altında verilmiştir.

Çizelge 6.6. Kriyojenik işlem uygulanmadan yapılan deney sayısı

Kesme Parametreleri		Kesici Takımlar				Kesme Şartları		Deney Sayısı	Tekrarla Toplam Deney Sayısı
Kesme Hızı	İlerleme Hızı	Kaplamasız HSS	Kaplamalı HSS	Kaplamasız Karbür	Kaplamalı Karbür	Kuru	Islak		
4	3	1	-	-	-	1	-	12	36
4	3	1	-	-	-	-	1	12	36
4	3	-	1	-	-	1	-	12	36
4	3	-	1	-	-	-	1	12	36
4	3	-	-	1	-	1	-	12	36
4	3	-	-	1	-	-	1	12	36
4	3	-	-	-	1	1	-	12	36
4	3	-	-	-	1	-	1	12	36
TOPLAM								96	288

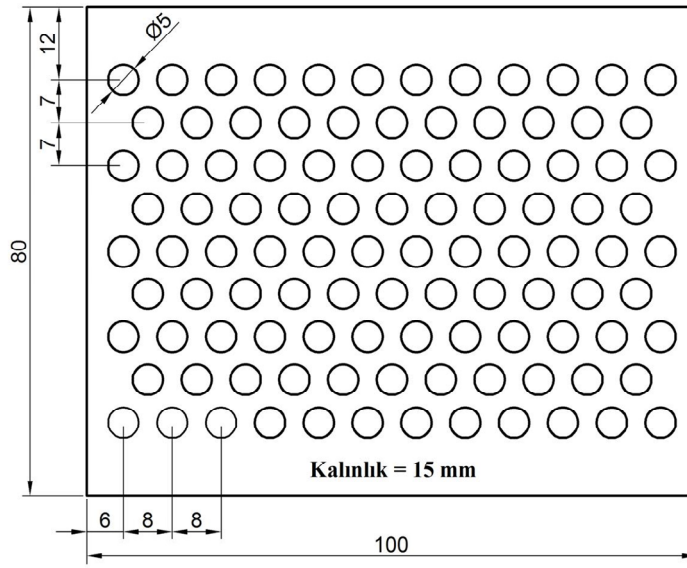
Çizelge 6.7. Kriyojenik işlem uygulanarak yapılan deney sayısı

Kesme Parametreleri		Kesici Takımlar		Kesme Şartları		Deney Sayısı	Tekrarla Toplam Deney Sayısı
Kesme Hızı	İlerleme Hızı	Kaplamasız HSS	Kaplamasız Karbür	Kuru	Islak		
4	3	1	-	1	-	12	36
4	3	1	-	-	1	12	36
4	3	-	1	1	-	12	36
4	3	-	1	-	1	12	36
TOPLAM						48	144

Çizelge 6.8. Kriyojenik işlem ardına temperleme uygulanarak yapılan deney sayısı

Kesme Parametreleri		Kesici Takımlar		Kesme Şartları		Deney Sayısı	Tekrarla Toplam Deney Sayısı
Kesme Hızı	İlerleme Hızı	Kaplamasız HSS	Kaplamasız Karbür	Kuru	Islak		
4	3	1	-	1	-	12	36
4	3	1	-	-	1	12	36
4	3	-	1	1	-	12	36
4	3	-	1	-	1	12	36
TOPLAM						48	144

Deney numuneleri 100x80 mm ebatlarında 15 mm kalınlığında plakar halinde kesilmiş olup delme esnasındaki olası yüzey hasarlarından kaçınmak amacıyla numunelerin alt ve üst yüzeyleri taşlanmıştır. Delme deneylerinde, her numune üzerine 104 adet delik delinmiştir. Deliklerin numune üst yüzeyindeki dağılımı Şekil 6.6’da verilmiştir. Delinen delik etrafındaki sertlik dağılımı göz önüne alınarak, deliklerin parça üzerine yerleştirilmesinde mümkün olduğu kadar birbiri ile uzaklığının eşit olmasına dikkat edilmiştir. Böylece delme sırasında ısının mümkün olduğu kadar eşit şartlarda dağılması hedeflenmiştir.



Şekil 6.6. Deliklerin deney numunesi üzerindeki dağılımı

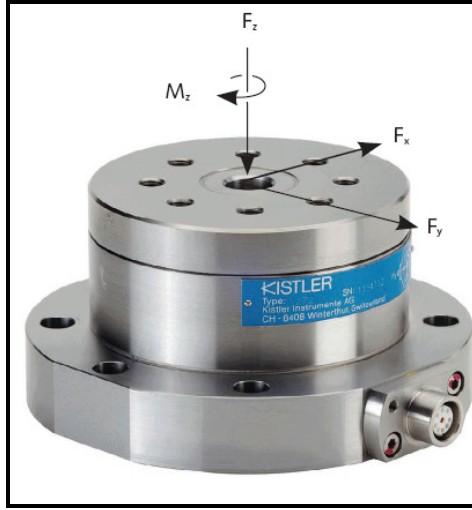
Delme işleminde optimum sonuçlar elde etmek amacıyla, delme boyu, delik çapının üç katı ya da üç katından daha düşük olması şartına uymak amacı ile 15 mm seçilmiş olup [132], açık delik (boydan boya) uygulaması yapılmıştır. Her deneyde yeni bir matkap ucu kullanılmıştır. Üç kez deney tekrarı yapılarak alınan verilerin doğruluğu teyit edilmiştir. Deney çıktılarının değerlendirilmesinde kullanılan ölçümler, bu tekrarlardan elde edilen verilerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

6.9. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi

Üretimde en önemli maliyet faktörlerinden birini enerji sarfiyatı oluşturmaktadır. Talaş kaldırma sırasında harcanan güç, enerji sarfiyatını belirleyen unsurların

başında gelir. Delme işlemlerinde, performans açısından önemli bir diğer parametre ise ilerleme kuvvetidir (F_z). Bu kuvvet, matkap malzeme üzerinde talaş kaldırırken uygulanan eksenel kuvvettir (ilerleme kuvveti). Yüksek eksenel kuvvetler delik kalitesini ve takım güvenilirliğini olumsuz etkilerken, gereğinden düşük (yetersiz) kuvvetler ise verimi olumsuz etkiler. Eksenel kuvvet de çap, ilerleme hızı ve delinen malzemeyle ilişkilidir. Dolayısıyla giriş parametrelerine bağlı olarak doğru eksenel kuvvetlerin tayini, işleme performansı açısından büyük önem taşır. Matkabin kesici kenarlarında oluşan teğetsel kuvvetlerin yarıçapa bağlı olarak oluşturduğu burulma momenti (M_c) delik delme işlemleri ile delik büyütme işlemlerinde önemli olan bir başka çıktıdır. Takımın işleme esnasında oluşan kuvvetlere ve bu kuvvetler etkisiyle oluşan moment ve burkulma (flambaj) etkisine dayanması gerekir. Bu amaçla, kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan F_z ve M_c 'nin deneysel olarak belirlenmesi ve optimum değerlerin ortaya konulması bu çalışmanın temel amaçlarından birini oluşturmaktadır.

İşlenebilirlik testlerinde, delme işlemi için üç kuvvet bileşeninden radyal ve kesme kuvveti nispeten küçük değerlerde olduğundan üçüncü kuvvet bileşeni olan eksenel kuvvet (thrust force) ve moment değerleri dikkate alınmaktadır. Yapılan çalışmada üç kesme kuvveti bileşeni de ölçülmüş ancak eksenel kuvvet bileşeni ile moment (tork) değerlendirilmeye alınmıştır. Kesme kuvveti ölçümleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarındaki dik işleme merkezine bağlanan Kistler 9257A tipi dinamometre ile yapılmıştır. Deneysel çalışmanın değerlendirilmesinde kullanılan kesme kuvveti ve moment değerleri deney tekrarı ile üç kez yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Dinamometre ile ilgili teknik özellikler Şekil 6.7'de verilmiştir. Delme deneylerinin sağlıklı biçimde yapılabilmesi için dinamometrenin üzerine bağlama kalıbı ile iş parçası yerleştirilmiştir (Şekil 6.5). Tasarımı yapılan sistemde kuvvet verileri, iş parçası ile dinamometre arasında doğrudan temas sağlanarak iş parçası üzerinden alınmıştır. Dinamometreden gelen sinyallerin veri okuma kartına aktarılmasında Kistler 5070-A tipi çok kanallı amplifier kullanılmıştır. Bu amplifier'a ait teknik özellikler ise Şekil 6.8'de verilmiştir.

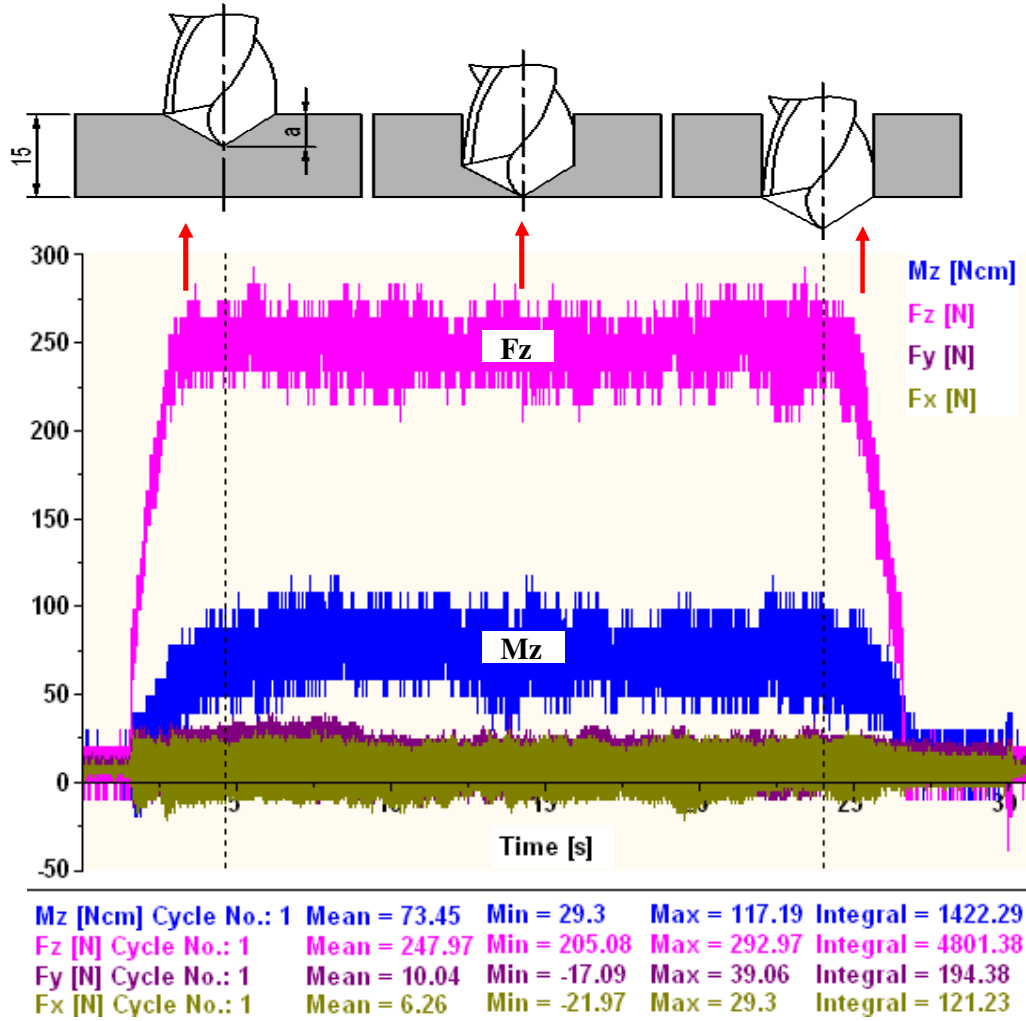
	Kuvvet aralığı (kN) F_x, F_y	-5
	F_z	-5...+20
	M_z	± 200
	Hassasiyet (pC/N) F_x, F_y	-7,8
	F_z	-3,5
	M_z	-160
		-3.5
	Doğal frekans (kHz) $f_n(x,y)$	3,1
	$f_n(z)$	6,3
	$f_n(M_z)$	4,2
	Çap (mm)	100
	Yükseklik (mm)	70
	Koruma sınıfı	IP 67
	Ağırlık (kg)	4,2

Şekil 6.7. 9257-A tipi dinamometrenin teknik özellikleri

	Kanal sayısı	8
	Açıklama	19" rack
	Bağlantı	Fischer 9 pol. Neg.
	Ölçüm aralığı	$\pm 200 \dots 200000$ pC
	Frekans aralığı	0...>45 kHz
	Çıktı sinyali	± 10 V
	Güç	100...240 V
	Arayüz	RS-232C

Şekil 6.8. 5070A01100 tip amplifiyer'in teknik özellikleri

Dinamometre ile ölçülen eksenel kuvvet ve moment değerleri DynoWare programı yardımı ile sayısal değerlere dönüştürülmüştür. DynoWare programında elde edilen, eksenel kuvvet ve moment ölçümünü gösteren grafik Şekil 6.9'da verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi eksenel kuvvet ve moment, matkabın "a" değeri kadar malzemeye nüfuz etmesi süresince hızla artmakta delik boyunca düzenli bir eğilim göstermekte ve yine delik çıkışında hızla düşmektedir. Değerlendirmeye alınan eksenel kuvvet ve moment değerleri iki kesik çizgi arasında kalan düzenli alanın ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla matkabın giriş ve çıkıştaki dinamik kararsızlığını sergileyen bölgeler değerlendirmeye alınmamıştır.



Şekil 6.9. Eksenel kuvvet ve momentin DynoWare programındaki grafik görüntüsü

Delme deneyleri esnasında matkap üzerindeki burkulma etkisini elimine etmek amacıyla, matkap ucunun takım tutucudan çıkma mesafesi minimum (30 mm) tutulmuştur. Bu değer elde edilen verilerde karşılaştırma doğruluğunu tespit etmek amacıyla her iki takımda da bütün deneylerde sabit kalmıştır.

6.10. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

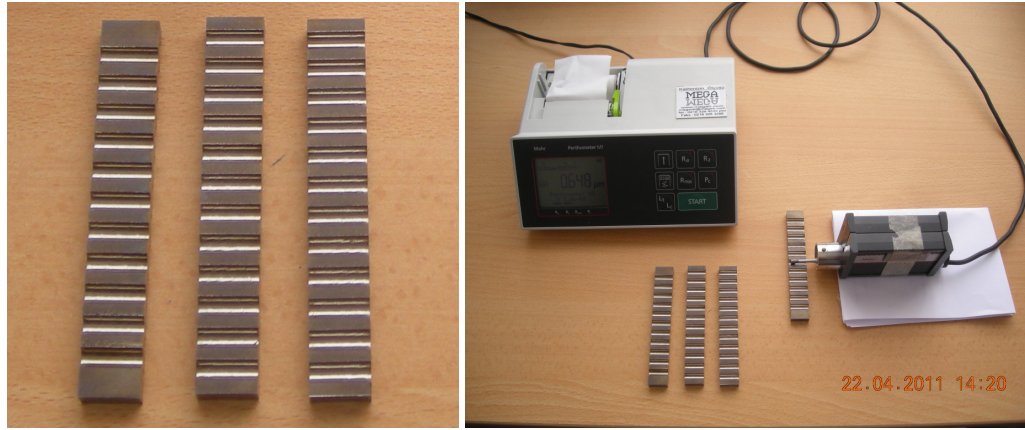
Talaşlı imalatla yüzey pürüzlülüğü, son mamulde istenen yüzey kalitesinin sağlanması bakımından son derece önemlidir. Parçanın kullanım amacı, malzemesi

ve önceki imalat işlemleri (ısıtıl işlem vb.) son yüzey kalitesine etki eder. Her talaş kaldırma yönteminde elde edilebilecek yüzey kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü derecesi farklıdır. Yüzey pürüzlülük değerinin istenilen sınırlar dâhilinde olması, malzeme, enerji ve işçilik maliyetlerine doğrudan etki etmektedir. Delme işlemlerinde istenilen yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesi için ikincil bir işlem olan raybalama işlemi endüstride yaygın olarak uygulanmaktadır. Ancak deliğin yüzey kalitesini artırmak amacıyla uygulanan ikincil işlemler üretim maliyetlerini ciddi şekilde artırmaktadır. Günümüzde modern takım tezgâhları ve delme takımları kullanılarak ikincil işlemlere gerek kalmadan istenilen delik kalitesinin elde edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Doğru belirlenmiş kesici takım, kesme parametreleri ve kesme şartları istenilen yüzey kalitesinin elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmanın amaçlarından birisi de bahsi geçen değişkenlerin delik yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini belirleyerek optimum işleme şartlarının ortaya konulmasıdır. Bu amaç doğrultusunda delinen deliklerin yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi için Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümünde 9633 seri numaralı Mohr Perthometer M1 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaza ait teknik özellikler Çizelge 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6.9. 9633 seri numaralı Mohr Perthometer M1 yüzey pürüzlülük cihazının teknik özellikleri

Model	M1
Tarama hızı	0,5 m/sn
Tarama kuvveti	0,75 mN
İğne uç yarı çapı	2 µm
Ölçüm aralıkları	100 -150 µm
Profil çözünürlüğü	12 mm
Filtre	Gausion
Örnekleme uzunluğu (Cut-off length)	0,25 - 0,8 - 2,5 (mm)
Ölçme uzunluğu (L)	1,75 - 5,6 – 17,5 (mm)
Ölçülen parametreler	R _a , R _z , R _{max}
Dil	Seçilebilir 10 Avrupa, 3 Asya dili
Güç kaynağı	Entegre, NiCd şarj edilebilir pil
Boyutlar	190x170x75 mm
Yaklaşık ağırlık	90 g

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin yapılabilmesi için Resim 6.1’de gösterildiği gibi deney yapılan numuneler tel erezyon tezgâhında delik eksenine paralel olarak kesilmiştir. Her delik yüzeyinde, delik eksenine paralel üç farklı noktadan ölçüm alınarak bunların ortalaması alınmıştır. Deney tekrarı ile elde edilen üç delikte de aynı işlem gerçekleştirilmiş olup değerlendirmeye alınan veriler bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Pürüzlülük ölçümlerinde değerlendirmede esas alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ölçülmüştür.



Resim 6.1. Delik eksenine paralel kesilen deney numuneleri ve R_a ölçümleri

6.11. Delik Çap, Dairesellik ve Silindirikliğinin Kontrolü

Günümüzde gelişen teknolojiye paralel olarak üretimden beklenen yüksek hassasiyet her geçen gün artmaktadır. Bu beklentileri karşılayabilecek imalat yöntem ve tekniklerinin belirlenmesi ve uygulanması üretim maliyetlerinin düşürülmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Kullanım amacına bağlı olarak değişmekle birlikte delme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünden sonra delik kalitesini belirleyen unsurlar;

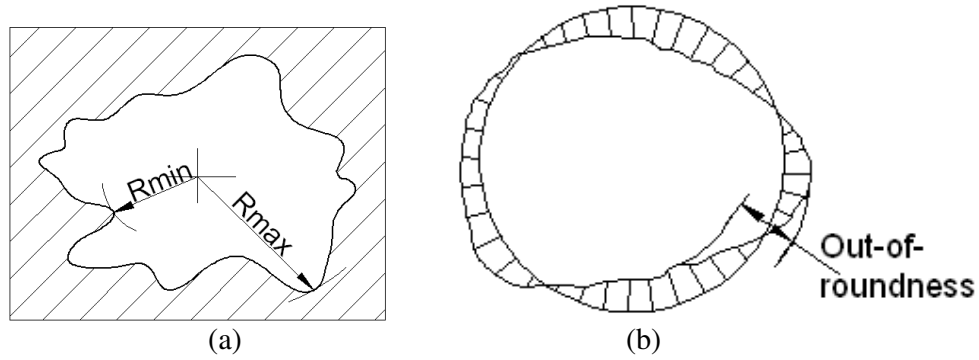
- Delik çapı
 - Dairesellikten sapma (ovalite)
 - Silindiriklikten sapma (eksenel kaçıklık)
- şeklinde sıralanabilir.

Delik kalitesini belirleyen bu unsurlar üzerinde kesici takım, iş parçası malzemesi, kesme parametreleri ve işleme şartları gibi birçok etkili parametre vardır. Bu çalışmanın amaçlarından bir diğeri de optimum delik kalitesini belirleyen işleme şartlarının ve kesme parametrelerinin irdelenerek nihai sonuca ulaştıracak değişkenlerin ortaya konulmasıdır. Bu amaçla delinen deliklerin çap, dairesellik ve silindiriklikten sapma ölçümleri Mitutoyo marka üç boyutlu CMM (Coordinat Measuring Machine) tezgâhında yapılmıştır. Delik çap, dairesellik ve silindiriklikten sapma ölçümleri, her delikte en az 10 ayrı noktadan koordinat alınarak tespit edilmiştir. Bu işlem, deney tekrarı ile elde edilen üç delikte de gerçekleştirilmiş olup değerlendirmeye alınan veriler bu ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Delik çapı ve daireselliğinin değerlendirilmesinde kullanılan bu ölçüler doğrudan doğruya CMM tezgâhından alınmıştır. Çizelge 6.10'da ölçümlerin yapıldığı tezgâha ait teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 6.10. Ölçümlerin yapıldığı tezgâha ait teknik özellikler

Ölçüm alanı x, y, z		505, 405, 405 mm
Ölçme hassasiyeti		0,0001 mm
Maksimum ölçüm hızı		8 mm/s
İş Parçası	Mak. Yükseklik	545 mm
	Mak. Ağırlı	180 kg

Dairesellikten sapma belirli bir merkez noktadan ölçülen en büyük ve en küçük yarıçap arasındaki fark olarak tanımlanır (Şekil 6.10.a). Ancak bir deliğin merkezinin belirlenmesi için çeşitli yollar vardır. En küçük radyal sapmanın elde edildiği noktayı merkez kabul eden MRS (minimum radyal sapma) metodu ve LSC (en küçük merkez daire) metodu gibi yaygın kullanılan metotlar vardır. Deliklerin CMM tezgâhı ile yapılan dairesellikten sapma ölçümlerinde merkez noktanın tayininde LSC metodu kullanılmıştır. LSC metodu merkez nokta, radyal koordinatlarının kareleri toplamı en küçük olan dairenin merkezini ifade etmektedir (Şekil 6.10.b) [133].



Şekil 6.10. Dairesellik ölçümleri

a) Dairesellikten sapma b) LSC (Least squares circle) [35]

Literatürde yapılan çalışmalarda, kesici takımın deliğe ilk girişteki dinamik kararsızlığından dolayı delik girişindeki çap ve dairesellikten sapma değerlerinin delik çıkışına göre daha yüksek olduğu ifade edilmektedir. Deliğin giriş ve çıkışı boyunca bu değerlerde azalmaların olduğu bunun da delme işlemine başlayan matkaba delik çıkışına kadar deliğin klavuzluk etmesinden kaynaklandığı söylenmektedir [134-135]. Alınan verilerde karşılaştırma doğrulunu sağlamak amacıyla delik çap ve dairesellikten sapma değerleri, deliğin giriş kısmından yapılan ölçümler ile belirlenmiştir.

6.12. Mikrosertlik Ölçümleri

Kriyojenik işlem ve temperlemenin HSS ve tungsten karbür takımlarda meydana getirdiği sertlik değişimlerini belirlemek amacıyla ayrı ayrı mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri için Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme ve Metalurji Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan Leica WMHT MOT marka mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde 200 g yük 10 saniye uygulanarak elde edilen izlerden sertlik değerleri okunmuştur. Herbir numunede en az sekiz adet ölçüm yapılmış ve ortalamaları vickers sertlik ($HV_{0.2}$) değeri olarak kaydedilmiştir.

6.13. Mikroyapı İncelemeleri

Kaplamasız HSS ve tungsten karbür takımlara uygulanan kriyojenik ve kriyojenik işlem+temperleme işleminin herhangi bir işlem uygulanmamış kesici takımlara göre mikroyapıda meydana getirdiği değişimleri irdelemek amacıyla her iki takım malzemesi içinde ayrı ayrı SEM’de mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Mikroyapı fotoğraflarının çekimi Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme ve Metalürji Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal inceleme için, bakalite alınan numuneler standart yöntemlerle zımparalanıp parlatıldıktan sonra dağlanarak optik mikroskop ve SEM’de incelenmiştir.

6.14. Takım Aşınmasının Belirlenmesi

Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde, HSS ve tungsten karbür takımlara uygulanan kriyojenik ve temperleme işleminin herhangi bir işlem uygulanmamış takımlar ile kaplamalı takımlara göre performansını ortaya koymak maksadıyla aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri hem kuru kesme şartlarında hem de ıslak kesme şartlarında yapılarak kesme şartlarının kesme performansı üzerindeki etkileri de ortaya konulmaya çalışılmıştır. Böylece kriyojenik işlemin ıslak kesme şartlarındaki performansında belirlenmesi amaçlanmıştır.

Aşınma deneylerinde kullanılan kesme parametreleri ve aşınma ölçümlerinin kaç delikte bir yapıldığına dair bilgiler Çizelge 6.11’de verilmiştir. Aşınma deneyleri, Çizelge 6.11’de belirtilen kesme parametreleri kullanılarak hem HSS hem de tungsten karbür matkaplarla 15 mm derinliğinde boydan boya delikler delinerek gerçekleştirilmiştir. Tungsten karbür takımlarla ıslak kesme şartlarında 30 m/dak kesme hızında yapılan aşınma deneylerinde (ön deneylerde) delik sayısında çok ciddi bir artışın olduğu görülmüştür. Bu sebeple tungsten karbür takımların ıslak kesme şartlarındaki aşınma deneyleri kesme hızı %50 artırılarak 45 m/dak kesme hızında test edilmiş ve diğer aşınma deneylerinden farklı olarak 12 delikte bir aşınma ölçümü yapılmıştır.

Çizelge 6.11. Aşınma deneylerinde kullanılan kesici takımlar ve kesme parametreleri

Kesici Takım	Kesme Şartı	Kesme Hızı	İlerleme hızı	Aşınma ölçüm aralığı
M42 HSS	Kuru	10 m/dak	0,06 mm/dev	3 delik
M42 HSS	Islak	10 m/dak	0,06 mm/dev	3 delik
Tungsten karbür	Kuru	30 m/dak	0,06 mm/dev	3 delik
Tungsten karbür	Islak	45 m/dak	0,06 mm/dev	12 delik

Aşınma deneylerinde matkapta farklı aşınma mekanizmaları ve tiplerinin meydana gelmesi ve iş parçası maliyetinin yüksek olması sebebiyle takım ömrü kriteri olarak birkaç kriter belirlenmiştir. Bu kriterler;

- a) Homojen olmayan ortalama yanak aşınması ($V_b \geq 0,15$ mm)
- b) Maksimum yanak aşınması $\geq 0,2$ mm
- c) Dökülme $\geq 0,2$ mm
- d) Dış köşe aşınması $\geq 0,2$ mm
- e) Kırılma ya da takım bozulması

şeklindedir. Yukarıda belirtilen kriterlerden herhangi biri gerçekleştiğinde takımın aşındığı kabul edilmiştir. Aşınma kriterine ulaşmış olan takımın toplam deldiği delik sayısı delme zamanı ile çarpılarak takım ömrü zamanı elde edilmiştir.

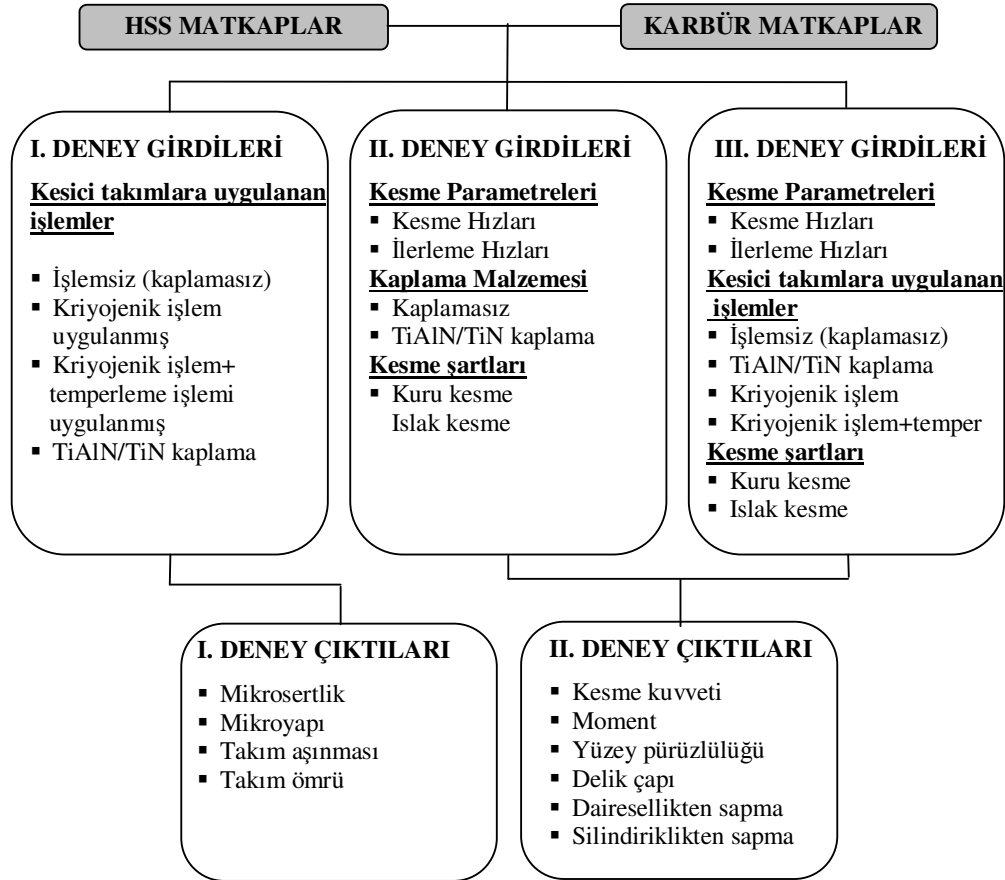
Takım aşınma ölçümleri ile aşınma mekanizmaları ve tiplerinin belirlenmesinde dijital mikroskop ve SEM cihazı kullanılmıştır. Oluşturulan aşınma ve takım ömrü grafikleri ile aşınma fotoğrafları yardımıyla kesici takımlar arasında mukayese yoluyla değerlendirme yapılmıştır.

6.15. Deneysel Çalışma Değerlendirme Esasları

Deneysel çalışma, HSS ve tungsten karbür matkaplar için ayrı ayrı tanımlanan deney girdilerine bağlı olarak elde edilen deney çıktıları dikkate alınarak üç ana bölüm

altında değerlendirilmiştir. Deney girdileri ve çıktıları olarak ifade edilen değişkenler Çizelge 6.12’de tanımlanmıştır.

Çizelge 6.12. Deney girdi parametrelerine bağlı olarak elde edilen çıktılar

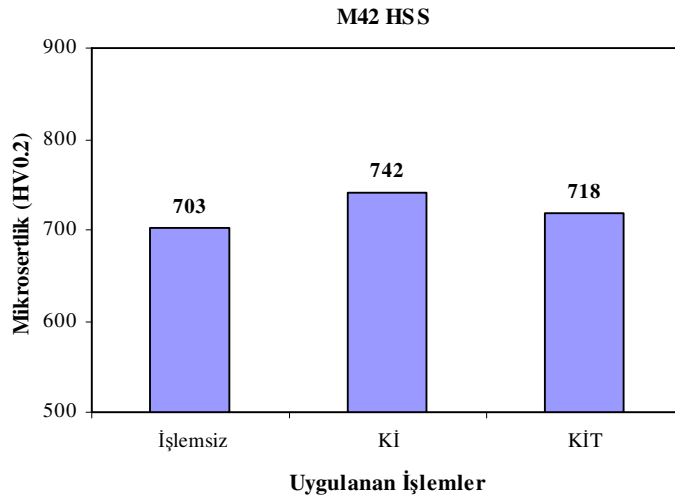


Birinci bölümde HSS ve tungsten karbür matkaplarla “I. DENEY GİRDİLERİNE”, bağlı olarak “I. DENEY ÇIKTILARI” değerlendirilmiştir. İkinci bölümde HSS matkaplar ile önce “II. DENEY GİRDİLERİNE” daha sonra ise “III. DENEY GİRDİLERİNE” bağlı olarak elde edilen “II. DENEY ÇIKTILARI” ayrı ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir. Son olarak üçüncü bölümde tungsten karbür matkaplar ile önce “II. DENEY GİRDİLERİNE” daha sonra ise “III. DENEY GİRDİLERİNE” bağlı olarak elde edilen “II. DENEY ÇIKTILARI” ayrı ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir. Delme deneylerinde deney girdileri’ne bağlı olarak elde edilen deney çıktılarının ortalamaları EK-2’de toplu olarak verilmiştir.

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Mikrosertliğin Değerlendirilmesi

M42 HSS ve tungsten karbür takımlara ayrı ayrı uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme işleminin işlemsiz takımlara göre sertlikte meydana getirdiği değişimleri belirlemek amacıyla mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 7.1’de M42 HSS takımlara uygulanan işlemlere bağlı olarak mikrosertlik değerlerindeki değişimler görülmektedir. İşlemsiz takımda 703 HV olan sertlik değeri kriyojenik işlem sonrası 742 HV sertliğe çıkmış daha sonrası uygulanan temperleme işleminin ardından düşüş göstererek 718 HV sertliğine gerilemiştir. İşlemsiz takıma göre kriyojenik işlem sertlikte %5,5’lik bir artış sağlarken kriyojenik işlem ardına uygulanan temperleme işlemi ile sertlikteki artış yaklaşık %2,1 değerine düşmüştür.

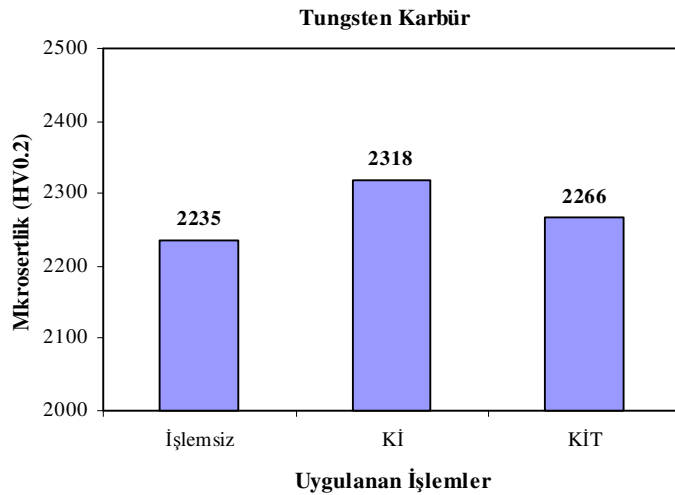


Şekil 7.1. M42 HSS kesici takımlara uygulanan işlemlere bağlı olarak mikro sertlik değerlerindeki değişimler

Kriyojenik işlem ile sertlikteki artışın geleneksel ısıtıl işlem sonrası östenitin martensite dönüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer şekilde literatürde yapılan çalışmalarda da kriyojenik işlemin sertliği artırıcı etkisi olduğu görülmektedir [10, 136]. Uygulanan malzemeye ve uygulama yöntemine bağlı olarak değişmekle birlikte kriyojenik işlem ile 1-3 HRC’lik sertlik artışları elde

edilebilmektedir [95]. Temperleme işlemi kriyojenik işleme göre sertlikte bir miktar düşüşe sebep olmuş ancak sertlik değerinin işlemsiz takımdan daha yüksek olduğu görülmüştür. Temperleme işlemi ile sertlikteki bu düşüşe bazı MC (Mo, V, W, Cr) karbürlerinin ve çökelti fazlarının çözünmesinin sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 7.2'deki grafikte tungsten karbür takımlara uygulanan farklı işlemlere bağlı olarak mikrosertlikteki değişimler görülmektedir. M42 HSS takımlarda olduğu gibi tungsten karbür takımlarda da kriyojenik işlemin sertlik üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu görülmüştür. İşlemsiz takımda 2235 HV olan sertlik değeri kriyojenik işlem sonrası yaklaşık %3,7'lik artışla 2318 HV sertliğe ulaşmıştır. Kriyojenik işlem sonrası yapılan temperleme işlemi ile Kİ takıma göre bir miktar sertlik kaybı meydana gelmiş ancak işlemsiz takıma göre sertlik değeri yaklaşık %1,4 daha yüksek olup 2266 HV olmuştur. Sertlikte meydana gelen bu artışın kriyojenik işlemin tungsten karbür kesici takımların η -fazı karbürlerinin miktarında sağladığı artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir [118]. Literatürdeki çalışmalarda da kriyojenik işlem ile tungsten karbür takımların sertliğinde benzer artışların kaydedildiği görülmektedir [104, 123, 137-138].

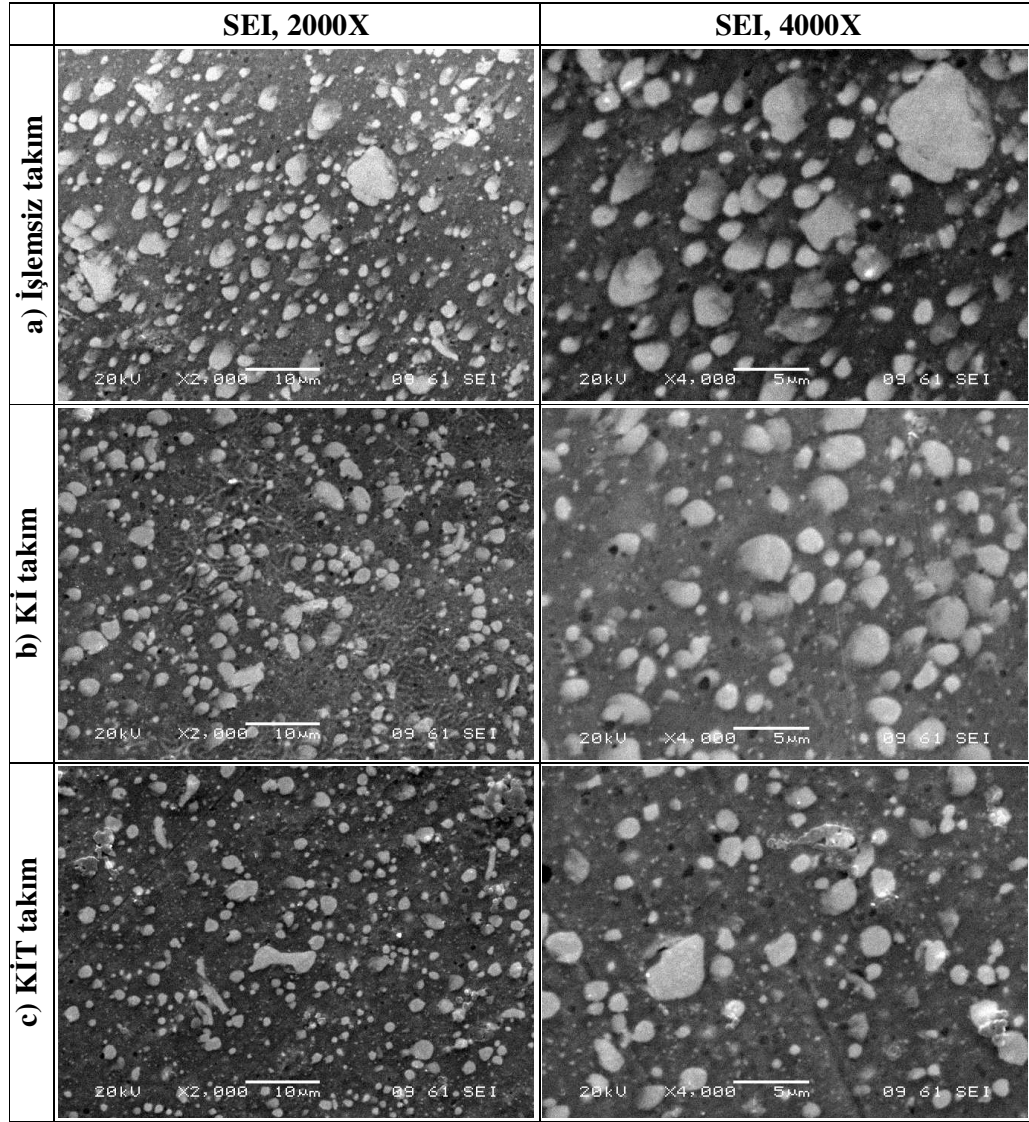


Şekil 7.2. Tungsten karbür kesici takımlara uygulanan işlemlere bağlı olarak mikrosertlik değerlerindeki değişimler

7.2. Mikroyapı Analizlerinin Değerlendirilmesi

7.2.1. HSS matkaplar

HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve kriyojenik+temperleme işleminin işlemsiz takımlara göre mikroyapıda meydana getirdiği değişimleri belirlemek amacıyla SEM’de mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Mikro yapı incelemesinin amacı, artan sertlik değerleri ve geliştirilen takım ömrünü açıklamaktır. Delici ve kesici takımların performansları mikro yapıdaki karbürlerinin özelliklerine bağlıdır. HSS takımlarda mikro yapıyı ve özellikleri önemli ölçüde değiştiren belli başlı alaşım elemanları C, Cr, Mo, V, W ve Co’tır. Co’ın dışındakiler içyapıda çökerek karbür oluşturmaktadırlar. Genel olarak yüksek hız çeliklerinde yedi grup karbür çökmektedir. Bu karbürler; 1- ϵ -karbür: $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ (hcp), 2- θ -karbür: M_3C (Fe_3C), 3- MC ya da M_4C_3 : (V_4C_3), 4- M_2C : (W_2C ya da Mo_2C), 5- λ -karbür: M_7C_3 (Cr_7C_3), 6- γ - karbür: M_{23}C_6 (Cr_{23}C_6), 7- η -karbür: M_6C ($\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ ya da $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$) şeklinde ifade edilmektedir [139-140]. M_6C karbürleri özgün olarak yüksek hız çeliği olarak bilinmekte olup çeliğe kızıl sertlik özelliğini kazandıran tungsten veya molibden zengin yüzey merkezli kübik karbüre benzer karbürlerdir. Bu karbürlerin iç yapıdaki dağılımı, boyutları, miktarı ve parçacıklar arası mesafeleri, malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Şekil 7.3’te işlemsiz, kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem+temperleme işlemi uygulanmış HSS takımlara ait mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Şekil 7.3.a’daki herhangi bir işlem uygulanmamış HSS takımın mikroyapı fotoğrafından matristeki karbür boyutlarının büyük olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem+temperleme işlemi sonucu karbür boyutları belirgin bir şekilde küçülerek daha iyi bir dağılım sergilemiştir (Şekil 7.3.b-c). Karbür boyutlarının küçülmesi ve homojen dağılımı ile martensit yapıdaki iç gerilmelerin giderilerek mikro çatlak duyarlılığı en aza indirilmekte ve bu sayede sertlik ve aşınma direncinde önemli iyileşmeler sağlanabilmektedir. Mikrosertlik ölçümlerinde kriyojenik işlemin meydana getirdiği sertlik artışı bu tezi doğrular niteliktedir. Çeliklerin aşınma ve sertlik özellikleri ile mikroyapı arasında kuvvetli bir bağ vardır [141].



Şekil 7.3. HSS takımlarda mikroyapı değişimi a) İşlem uygulanmamış, b) Kriyojenik işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem+temperleme işlemi uygulanmış (M_6C ve MC)

Literatürde yapılan çalışmalarda kriyojenik işlemin sadece karbür oluşumunu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda homojen karbür dağılımını da sağladığı ifade edilmektedir [7, 95]. Yine yapılan çalışmalarda kriyojenik işlem ardına uygulanan temperleme işleminin ikinci karbür çökmesini sağlayarak iç gerilmeleri gidermede etkin rol oynadığı vurgulanmaktadır [95]. Nitekim yapılan çalışmada homojen olmayan farklı boyutlardaki karbürlerin kriyojenik işlem ile boyutlarının küçüldüğü

ve yeni karbür oluşumu sağlanarak homojen dağılımın sağlandığı ve kriyojenik işlem ardına uygulanan temperleme işlemi ile de iç gerilmelerin giderildiği düşünülmektedir.

7.2.2. Tungsten karbür matkaplar

Sinterlenmiş tungsten karbürlerin özellikleri nihai bileşim ve yapılarıyla oldukça ilgilidir. Bileşime bağlı olarak sinterlenmiş tungsten karbürlerde bulunan farklı fazlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

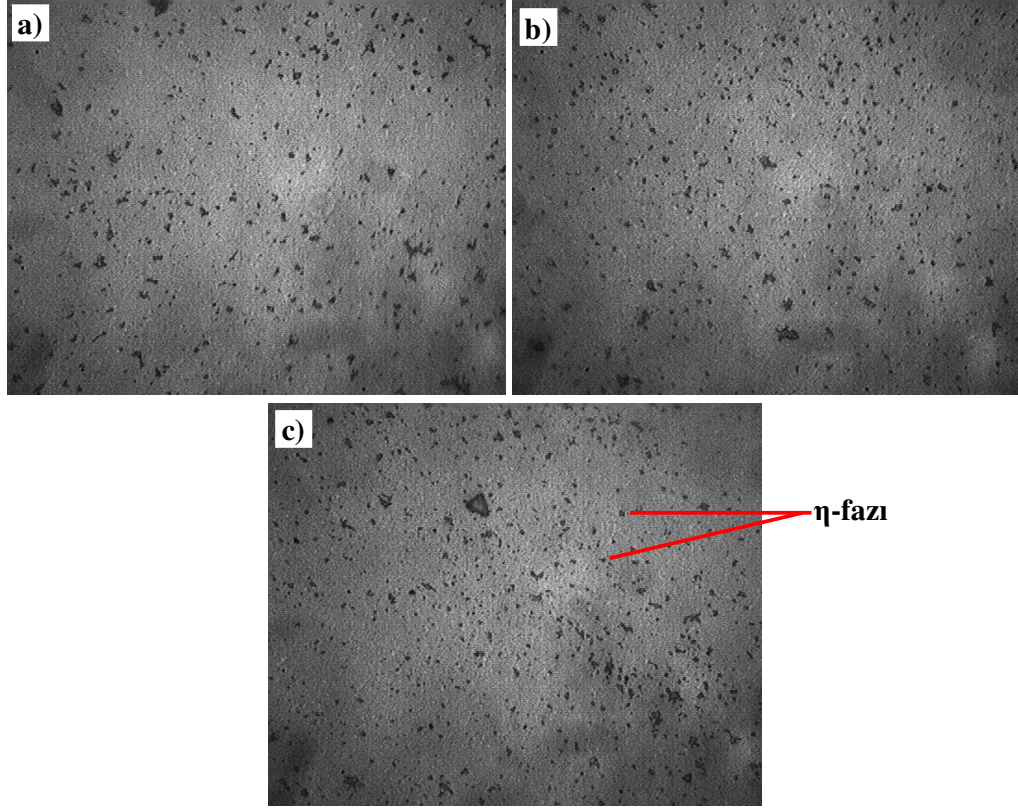
α -fazı	Tungsten karbür (WC)
β -fazı	Bağlayıcı (Co)
γ -fazı	Kübik kafes yapılı karbürler (TiC, TaC vb.)
η -fazı	Tungsten ve bağlayıcı çoklu karbürler

İdeal karbon miktarından hafif bir sapma grafit veya üçlü bir bileşim oluşumuna neden olmaktadır. Genellikle her iki faz da arzu edilmez ve mekanik özelliklerle performansın düşmesine sebep olur. Dolayısıyla, optimum özellikleri olan istenen bileşimi elde etmek için karbon miktarı dar sınırlar içinde tutulmalıdır. Tungsten karbürlerde genellikle iki tip η -fazı elde edilebilmektedir. Bunlar oldukça sabit bileşime sahip $M_{12}C$ (Co_6W_6C) ve bileşimin $Co_{3.2}W_{2.8}C$ ile Co_2W_4C arasında değiştiği M_6C 'dir. M_6C tip η -fazı sıvı fazla dengededir ve sinterleme işlemi sırasında çekirdeklenerek büyümektedir. Bu da bağlayıcının, kırılgan bir fazla yer değiştirerek yapının kırılgan olmasına neden olmaktadır. Ancak $M_{12}C$ karbürü ise soğuma sırasında matrisin tamamında küçük taneli olarak katı fazda oluşur ve dolayısıyla yapının bir önceki gibi kırılgan olmasına sebebiyet vermez.

Diğer refrakter karbürlerle kıyaslandığında, tungsten karbürün termodinamik kararlılığı oda sıcaklığındaki sertliği gibi düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda WC'nin sertliği oldukça kararlı olduğu halde kübik karbürlerin çoğunun sertliği hızla düşmektedir. Bu da WC'nin sementit karbürlerde sert refrakter faz olarak

üstünlüğünün bir göstergesidir. WC'nin diğer kayda değer özellikleri, elmaştan sonra çok yüksek elastik modülüne sahip olması ve yüksek ısı iletkenliğidir.

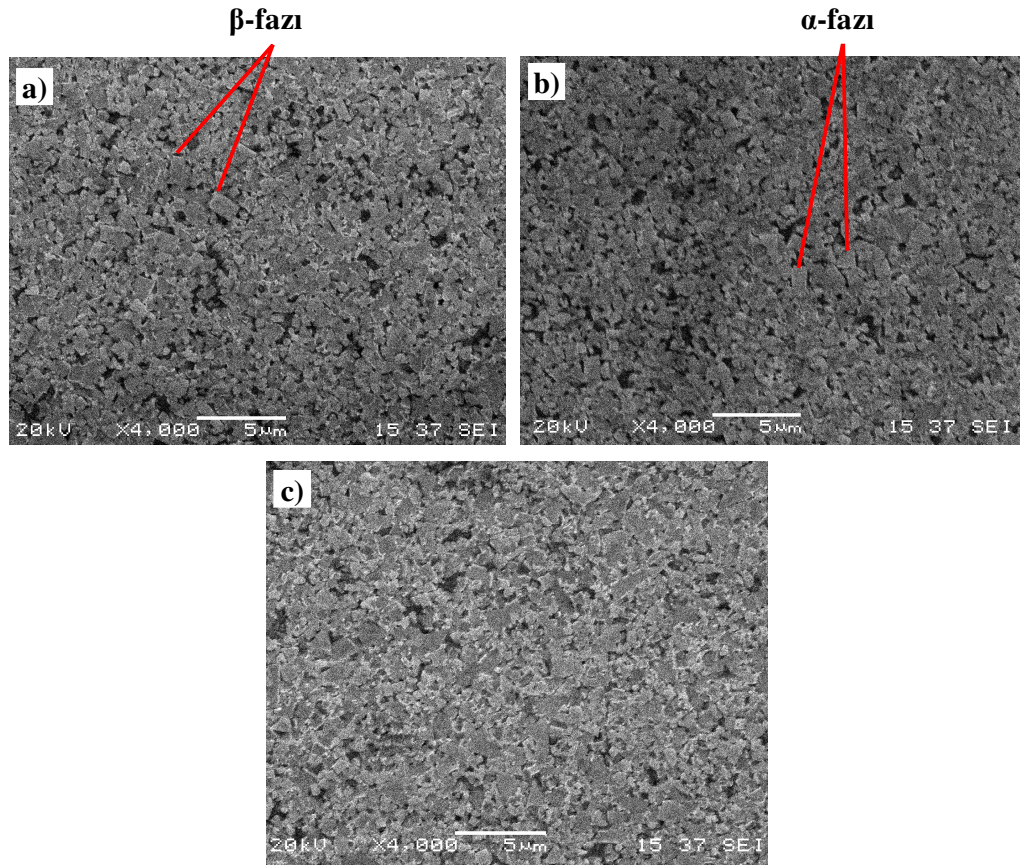
Tungsten karbür takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve kriyojenik+temperleme işleminin işlemsiz takımlara göre mikroyapıda meydana getirdiği değişimleri belirlemek amacıyla optik mikroskopta ve SEM'de mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Mikroyapının metalografik olarak tayini, ASTM B657-92 [142] standardına (Sementasyona tabi tutulan karbürlerde mikroyapının metalografik tayini) uygun olarak yapılmıştır. Şekil 7.4'te optik mikroskopta çekilen, kesici takımlara uygulanan işlemlere bağlı olarak tungsten ve bağlayıcının çoklu karbürleri olan η fazındaki değişimi gösteren fotoğraflar görülmektedir. Fotoğraflardaki koyu gri noktalar η -fazı karbürlerini tanımlamaktadır. Şekil 7.4.a'da açıkça görüldüğü gibi işlemsiz takımda az miktarda olan η -fazı kriyojenik işlemle bir miktar artış göstermiştir. Temperleme işlemine tabi tutulmayan (Şekil 7.4.b) ve tabi tutulan (Şekil 7.4.c) numunelerde η -fazı karbürlerinin miktar ve dağılımları arasındaki farklılık da önemlidir. Temperlenmiş numuneler daha fazla η -fazı karbürleri ihtiva etmektedir. η -fazı karbürlerinin mevcudiyeti kesici ucun kırılma dayanımını azaltmakla beraber fazın inceliği dayanımı çok fazla etkilemeksizin aşınma direncini iyileştirmektedir [102]. Kriyojenik işlem sırasında kaba ve gelişigüzel dağılan η fazı parçacıkları en kararlı şekle gelmektedir. Bu ince parçacıklar daha büyük tungsten karbür parçacıklarıyla birlikte daha yoğun, birbirini tutan ve daha sağlam matris meydana getirmektedir [118, 138]. Bu da kesici takımların sertlik ve aşınma direncini önemli ölçüde artırmaktadır. Nitekim mikrosertlik ölçümlerinde kriyojenik işlem ve temperleme işleminin sertlikte meydana getirdiği artış bunu doğrulamaktadır. η -fazı karbürlerin çökmesi tungsten karbürün artan dayanıklılığının tek nedeni değildir. Kriyojenik işlem, tungsten karbürü malzemenin sert ve yumuşak bağlayıcı fazlarının her ikisinde de η -fazı karbürlerinin çökmesiyle birlikte artan sertlik ve aşınma direnci özelliklerinden sorumlu olan kristal yapı değişmelerine sebep olmaktadır [138].



Şekil 7.4. Tungsten karbür takımlarda η -fazı değişimi a) İşlem uygulanmamış, b) Kriyojenik işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem+temperleme işlemi uygulanmış (600X)

Şekil 7.5'te SEM'de çekilen, kesici takımlara uygulanan işlemlere bağlı olarak α ve β fazlarındaki değişimi gösteren fotoğraflar görülmektedir. Fotoğraflarda α -fazı gri renkli alanlar olup taneler keskin köşeli kenarlarla tanımlanır. Bu α -fazı malzemenin büyük kısmını oluşturmaktadır. α -fazı tane sınırlarını çevreleyen açık renkli alanlar ise β -fazını göstermektedir. Fotoğraflarda çok belirgin olmamakla birlikte kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işleminin yumuşak β -fazında azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Yine fotoğraflardan α -fazı tanelerinin birbirine daha yakın olduğu söylenebilir. Tungsten karbür numunelerinde düşük miktardaki bağlayıcılar (β -fazı) ısı iletkenliğini artırmaktadır. Ayrıca kriyojenik işleme tabi tutulan sementit karbürlerde karbür tane büyüklüğündeki bir artış da sementit karbürlerin ısı iletkenliğini artırmaktadır. Bu etki, karbür tane bitişikliğindeki artışa ve ısı iletiminde karbür fazının baskın rolüne atfedilmektedir

[97]. Kriyojenik işlem nedeniyle ısı iletkenliğindeki artış ise kesici takımların ısı yayma kapasitesini attırmaktadır. Bunun sonucu olarak işleme esnasında kesici uçta ısı birikimi engellenerek kesici takımların uzun süre dayanımı sağlanabilmektedir. Kriyojenik işlemin tungsten karbür kesici takımlarda sağladığı avantajlardan bir diğeri de yüksek sıcaklıklarda kobalt matrisinin kimyasal bozunmasını azaltmasıdır [97]. Yine yapılan çalışmalarda kriyojenik işlemin, karbür takımlarının imal edildiği sinterleme işlemi sırasında meydana gelen gerilimleri de giderdiğine inanılmaktadır [126, 143].



Şekil 7.5. Tungsten karbür takımlarda α ve β fazı değişimi a) İşlem uygulanmamış, b) Kriyojenik işlem uygulanmış, c) Kriyojenik işlem+temperleme işlemi uygulanmış (4000X)

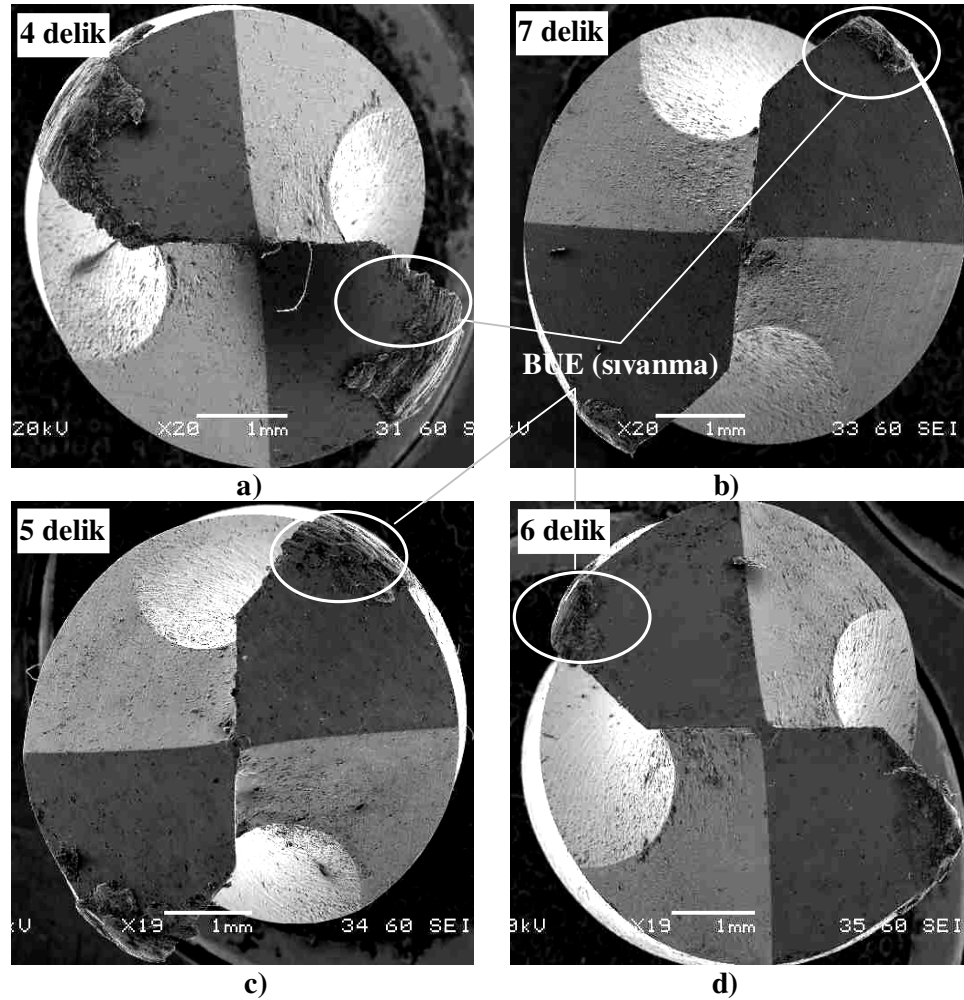
7.3. Takım Aşınması ve Takım Ömrünün Değerlendirilmesi

Bu bölümde belirlenen aşınma kriterleri (Bkz. Başlık 6.14) esas alınarak kuru ve ıslak kesme şartlarında HSS ve tungsten karbür matkaplarla yapılan aşınma ve ömür deneyleri her takım malzemesi için ayrı ayrı başlıklar altında değerlendirilmiş daha sonra ise genel bir değerlendirme yapılmıştır.

7.3.1. HSS matkaplar

Kaplamasız, TiAlN/TiN kaplı, kriyojenik işlem uygulanmış (Kİ) ve kriyojenik işlem+temperleme işlemi uygulanmış (KİT) takımların hem kuru hem de ıslak kesme şartlarındaki performansını karşılaştırmak amacıyla bir dizi aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Daha öncede ifade edildiği gibi aşınma deneylerinde, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında 15 mm derinliğinde boydan boya delikler delinmiştir. Bahsedilen parametrelerde kuru kesme şartlarında takımın düzenli bir aşınma eğilimi göstermeden yapışmanın etkisiyle hızla bozulması (catastrophic failure) sebebiyle aşınma grafiği oluşturulamamıştır. Şekil 7.6'da kuru kesme şartlarında test edilen dört farklı takımda meydana gelen aşınmalar görülmektedir. Dört farklı matkapta da titanyumun sahip olduğu düşük ısı iletim katsayısı sebebiyle kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların [14] BUE oluşumuna neden olduğu net bir şekilde görülmektedir. Özellikle kesme hızının maksimum olduğu dış köşelerde sıvanmanın daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, dış köşede oluşan ısının daha fazla olmasına bağlı olarak bu bölgenin ısı ve kimyasal yüklere daha fazla maruz kalması ile izah edilebilir. Yapışma eğiliminin, daha az delik delmesine rağmen kaplamasız takımda çok daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 7.6.a). Belirlenen kesme parametrelerinde işlemsiz (kaplamasız) takım 4 delik, Kİ takım 5 delik, KİT takım 6 delik, TiAlN/TiN kaplı takım 7 delik sonunda ömrünü tamamlamıştır. Kesici takımların hızla bozulması sebebiyle kesici takımlar arasında belirgin bir ömür farkı oluşmamıştır. İşlemsiz takım 4 delik sonunda ömrünü tamamlarken kaplamalı takımda bu sayı 7 deliğe ulaşmıştır. Kaplamanın sahip olduğu düşük ısı iletim ve sürtünme katsayısının takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünmeyi azaltarak BUE oluşumunu azalttığı görülmüştür. Kriyojenik

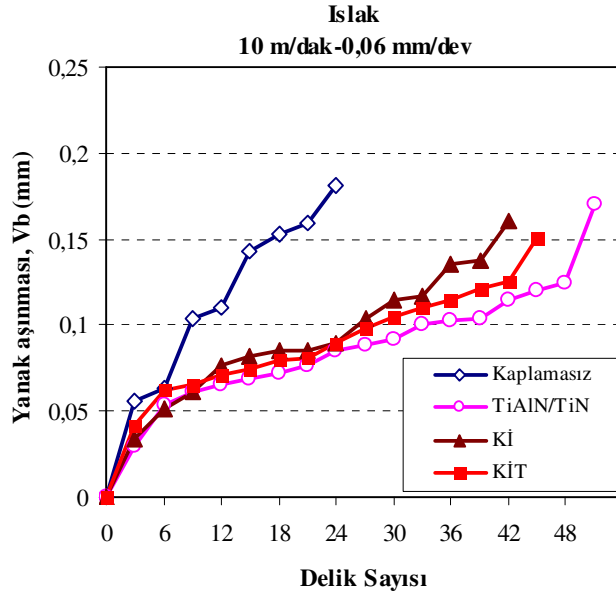
işlem ve temperleme işlemi de kesici takım ömrünün artmasında etkili olmuş ve işlemsiz takıma göre birkaç deliklik ömür artışı sağlamıştır. Ayrıca KİT takım performans bakımından TiAlN/TiN kaplı takıma yakın bir performans sergilemiştir.



Şekil 7.6. Kuru kesme şartlarında, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında test edilen dört farklı takımın SEM görüntüleri a) İşlemsiz, b) TiAlN/TiN kaplamalı, c) Kİ, d) KİT

Islak kesme şartlarında kuru kesme şartlarına göre daha düzenli aşınma eğilimi görüldüğünden belirlenen aşınma kriterleri esas alınarak delik sayısına bağlı aşınma grafiği oluşturulmuştur. Şekil 7.7’de ıslak kesme şartlarında, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında dört farklı takım arasında delik sayısı ile yanak aşınmasındaki değişim görülmektedir. Takım aşınması bakımından en iyi performans

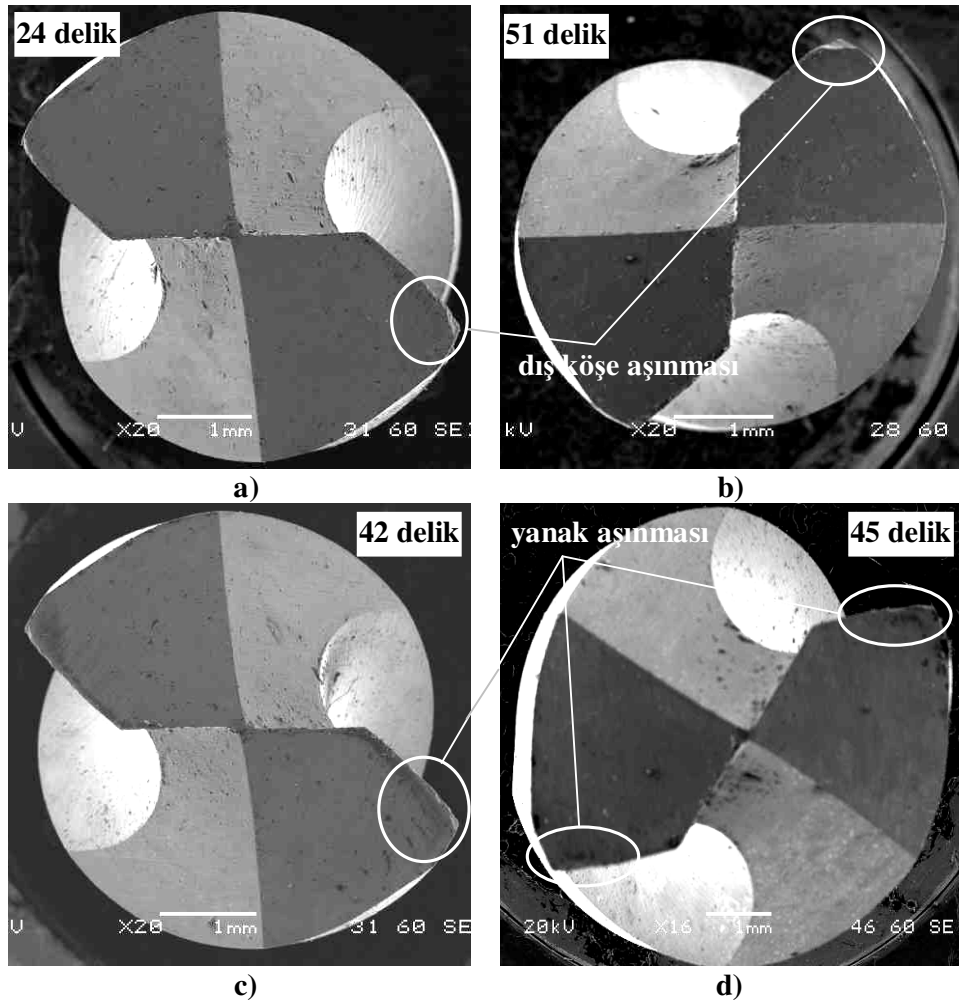
çok katlı TiAlN/TiN kaplı takımından alınırken bu takımını sırasıyla Kİ ve KİT takımlar takip etmiştir. 0,15 mm aşınma değerine kaplamasız takım 24, Kİ takım 42, KİT takım 45 ve TiAlN/TiN kaplı takım 51. delikte ulaşmıştır. Buradan hareketle kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işleminin mikro yapıda meydana getirdiği değişimin ve sertlikte sağladığı artışın takım ömrünü arttırmada önemli etkiye sahip olduğunu söylemek mümkündür. Genel itibariyle TiAlN/TiN kaplı, Kİ ve KİT takımlar 24. deliğe kadar benzer aşınma değerlerine sahipken bu delikten sonra aşınma farkı oluşmaya başlamıştır. Özellikle Kİ ve KİT takımlar, aşınma kriterine birkaç deliklik farkla ulaşmışlardır.



Şekil 7.7. Islak kesme şartlarında, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında dört farklı takım arasında delik sayısı ile yanak aşınmasındaki değişim

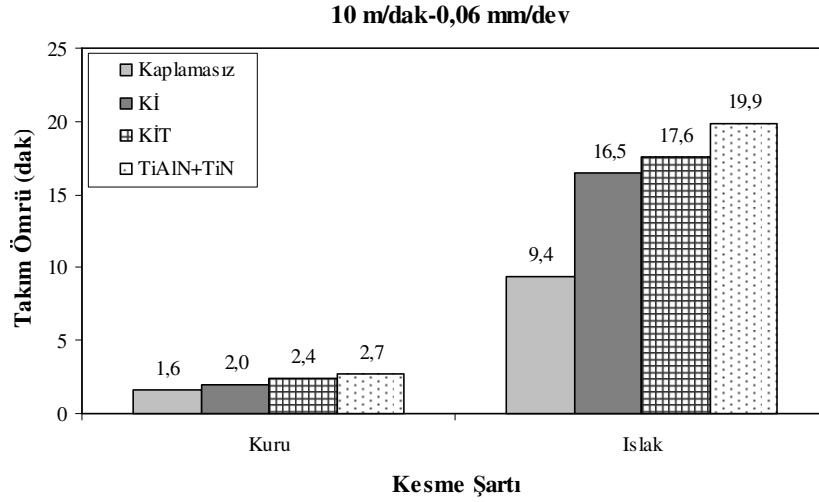
Şekil 7.8’de ıslak kesme şartlarında test edilen dört farklı takımın aşınma resimleri görülmektedir. Aşınma resimlerinden kuru kesme şartlarına göre aşınmanın çok daha düzenli olduğu söylenebilir. Kuru kesme şartlarında görülen aşırı sıvanma eğilimi soğutma sıvısının kullanımı ile minimize edilmiştir. Bilindiği üzere soğutma sıvısı kesme esnasında takım-talaş ara yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltmakta aynı zamanda talaş tahliyesini kolaylaştırarak kesme bölgesindeki sıcaklıkları düşürmektedir [144]. Bu da kuru kesmeye göre kesici

takımın aşınmasını geciktirmektedir. Kaplamasız ve TiAlN/TiN kaplı takımda etkin aşınma tipinin dış köşe aşınması (Şekil 7.8.a-b) Kİ ve KİT takımlarda ise yanak aşınması şeklinde olduğu (Şekil 7.8.c-d) görülmüştür. Kİ ve KİT takımlarda aşınmanın işlemsiz takımdaki gibi dış köşede hızla gelişmediği bunun yerine kesici ağız boyunca daha düzgün bir ilerleme kaydettiği tespit edilmiştir. Bu durumun kriyojenik işlemin kesici takımın aşınma direncinde sağladığı iyileşmeden kaynaklandığı düşünülmektedir [7].



Şekil 7.8. Islak kesme şartlarında, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında test edilen dört farklı takımın SEM görüntüleri
a) Kaplamasız, b) TiAlN/TiN kaplamalı, c) Kİ, d) KİT

Kuru ve ıslak kesme şartlarının Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde takım ömrü üzerindeki etkilerini ortaya koymak için Şekil 7.9'da görülen takım ömrü grafiği oluşturulmuştur. Grafiğe bakıldığında ıslak kesme şartları kuru kesme şartlarına göre takım ömründe ciddi bir artış sağlamıştır. Bu artışın Ti-6Al-4V alaşımının düşük termal iletkenliğe sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [3]. Ti-6Al-4V alaşımının özellikle yüksek kesme hızlarında işlenmesinde soğutma sıvısı uygulaması ile takım aşınmasında 10 kata kadar azalmalar elde edilebilmektedir [145]. Kuru kesme şartlarında kaydedilen en yüksek takım ömrü 2,7 dakika iken bu değer ıslak kesme şartlarında 19,9 dakikaya ulaşmıştır. Buradan hareketle Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde soğutma sıvısı kullanımının önemi bir kez daha anlaşılmaktadır. Kuru kesme şartlarında, kaplamasız takıma göre KI, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlar sırasıyla %25, %50, %68'lik ömür artışı sağlamıştır. Bu oranlar ıslak kesme şartlarında sırasıyla %76, %87, %112 şeklinde gerçekleşmiştir. Kriyojenik işlem ve kriyojenik+temper işleminin karbür boyutlarının küçülmesi, homojen karbür dağılımının sağlanması, geleneksel ısı işlem sonrası yapıda bulunan kalıntı östenitin martensite dönüşmesi ile kesici takımların sertlik ve aşınma direncinin artmasında önemli bir role sahip olduğu düşünülmektedir [95]. Yapılan aşınma ve ömür deneyleride bunu doğrulamaktadır. Temperleme işlemi iç yapıdaki gerilmeleri gidermesi ile kriyojenik işleme göre kuru kesme şartlarında %20, ıslak kesme şartlarında ise %7'lik bir ömür artışı sağlamıştır. Test edilen matkaplar arasında en iyi performansı TiAlN/TiN kaplı matkaplar göstermiştir. TiAlN/TiN kaplamanın çok katlı kaplama yapısına ve düşük sürtünme katsayısına sahip olması ve kesme esnasındaki talaş akışını kolaylaştırmasının takım ömrünün artmasında önemli etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Ayrıca kaplamasız takıma göre sahip olduğu yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı da takım ömrünün artmasında etkili olmuştur. Kuru kesme şartlarına göre ıslak kesme şartlarında TiAlN/TiN kaplı takımın daha uzun takım ömrüne sahip olması dikkat çekicidir. Bu durumun kaplamanın katı yağlayıcı özelliği ile soğutma sıvısının yağlama ve soğutma özelliğinin birlikte kullanılmasından kaynaklandığına inanılmaktadır.

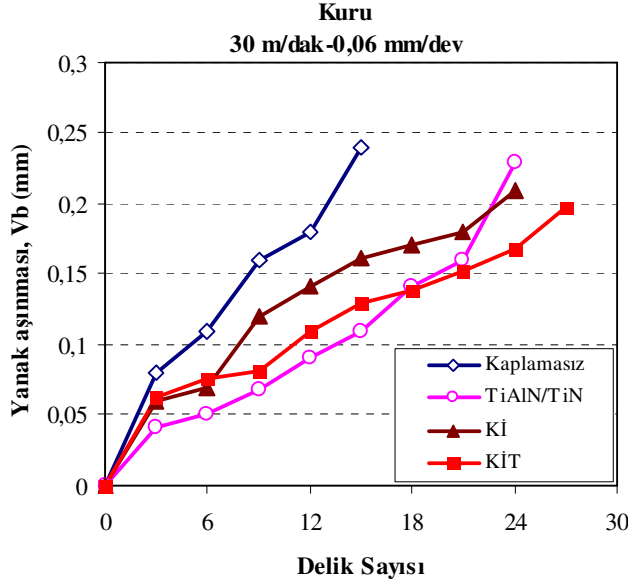


Şekil 7.9. 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında dört farklı takım arasında kesme şartlarına bağlı olarak takım ömründeki değişim

7.3.2. Tungsten karbür matkaplar

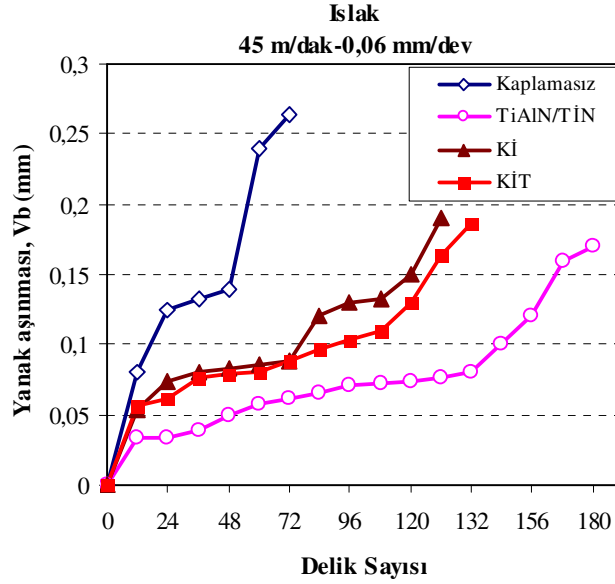
HSS takımlarda olduğu gibi tungsten karbür takımlarda da kesici takımlar arasında performans farkını ortaya koymak amacıyla aşınma ve ömür deneyleri yapılmıştır. Aşınma grafikleri belirlenen aşınma kriterleri (Bkz. Başlık 6.14) dikkate alınarak kuru kesme şartlarında 3 delikte, ıslak kesme şartlarında ise 12 delikte bir aşınma ölçümü yapılarak oluşturulmuştur. Ayrıca kuru kesme şartlarında kesici takımlar 30 m/dak kesme hızında test edilirken ıslak kesme şartlarında 45 m/dak kesme hızında test edilmiştir. HSS takımlarda olduğu gibi 0,06 mm/dev ilerleme hızında 15 mm derinliğinde boydan boy delik uygulaması yapılmıştır. Şekil 7.10'da kuru kesme şartlarında Şekil 7.11'de ise ıslak kesme şartlarında dört takım arasında delik sayısındaki artışla yanak aşınmasındaki değişim görülmektedir. Kuru kesme şartlarındaki aşınma grafiğine bakıldığında en iyi performansı KİT takım göstermiştir. Bu takımı Kİ ve TiAlN/TiN kaplı takım takip etmiştir. Kaplamasız takım 15 delik sonunda aşınma kriterine ulaşırken Kİ ve TiAlN/TiN kaplı takım 24. ve KİT takım 27. delikte ulaşmıştır. Kriyojenik işlem ve temperleme işlemi HSS takımlarda olduğu gibi tungsten karbür takımlarda da takımların aşınma direncinde önemli bir iyileşme sağlamıştır. TiAlN/TiN kaplı takım 18. deliğe kadar en iyi

aşınma değerleri verirken bu delikten sonra sıvanmanın etkisiyle hızla aşınarak 24. delikte ömrünü tamamlamıştır.



Şekil 7.10. Kuru kesme şartlarında 30 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında, dört farklı takım arasında, delik sayısına bağlı olarak yanak aşınmasındaki değişim

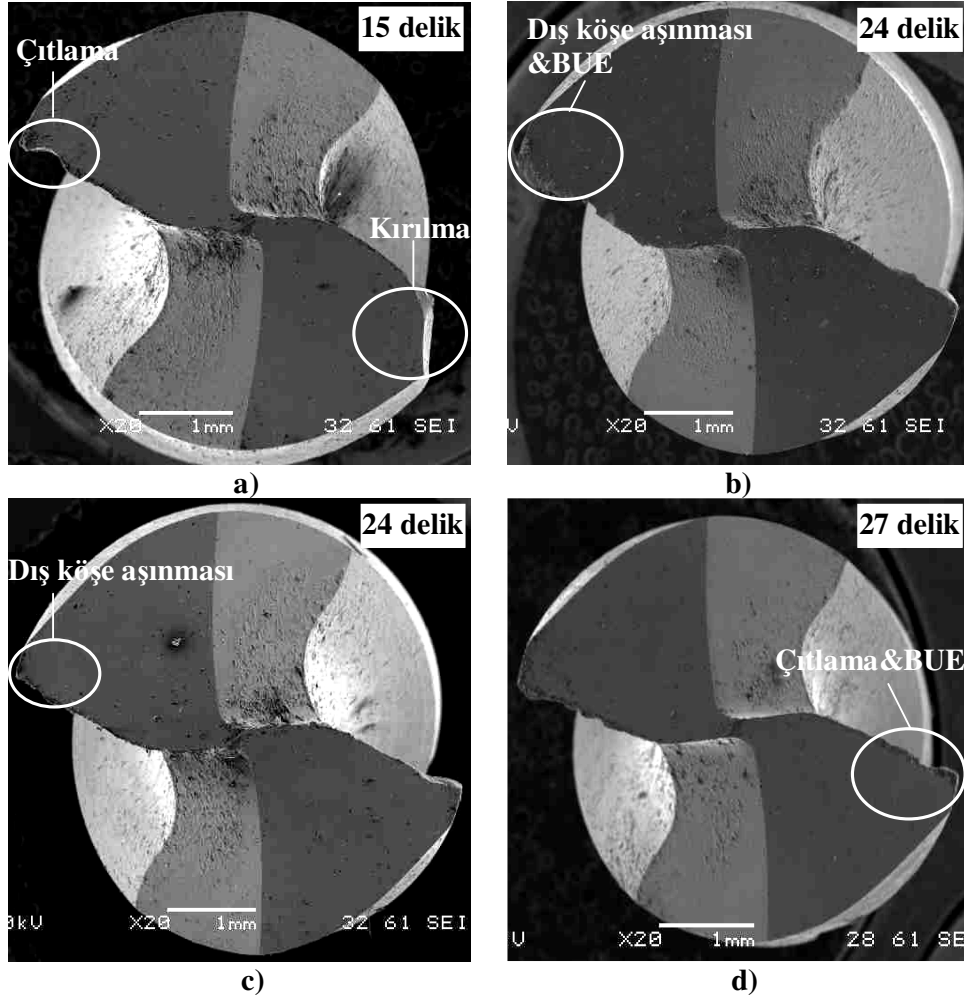
30 m/dak kesme hızında ıslak kesme şartlarında yapılan ömür deneylerinde delik sayısında çok fazla artış olduğu görülmüştür. Malzemenin üretim maliyetinin yüksek olması sebebiyle ıslak kesme deneyleri kesme hızı değeri %50 arttırılarak 45 m/dak kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Islak kesme şartlarındaki aşınma grafiğine bakıldığında (Şekil 7.11) kuru kesme şartlarından farklı olarak en iyi performansı önemli bir farkla TiAlN/TiN kaplı takım göstermiştir. Kaplamasız takım 72, KI takım 126, KİT 132 ve TiAlN/TiN kaplı takım 180 delik sonunda aşınma kriterine ulaşmıştır. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda, soğutma sıvısı kullanımının TiAlN/TiN kaplı takımın performansını arttırmada diğer takımlara göre daha büyük etkiye sahip olduğu söylenebilir. Kuru kesme şartlarında olduğu gibi ıslak kesme şartlarında da KI ve KİT takımların birbirine oldukça yakın aşınma değerleri verdiği görülmüştür. Özellikle 72. deliğe kadar hemen hemen aynı olan aşınma değerleri bu delikten sonra bir miktar farklılık arz etmiştir.



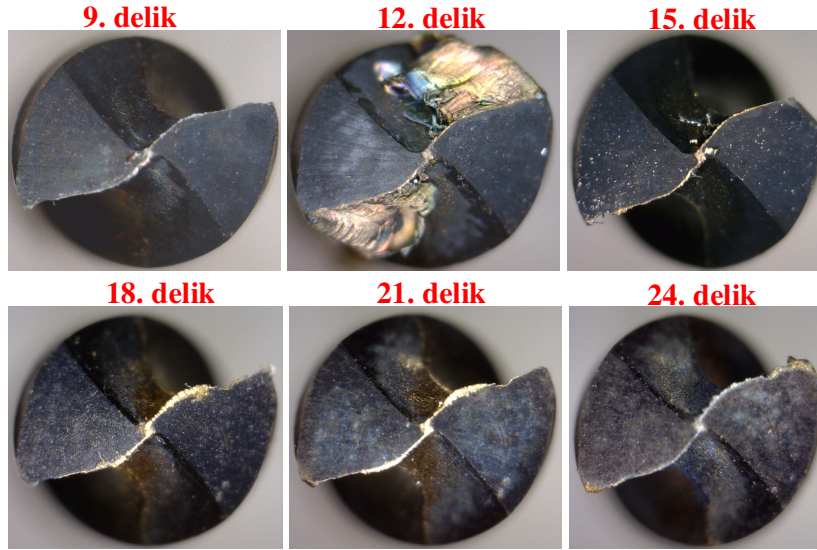
Şekil 7.11. Islak kesme şartlarında 45 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında, dört farklı takım arasında, delik sayısına bağlı olarak yanak aşınmasındaki değişim

Şekil 7.12’de kuru kesme şartlarında test edilen takımlardaki aşınmalar görülmektedir. Kaplamasız takımındaki aşınma çatlama ve kırılma şeklinde görülmüştür. Bu aşınmaların genellikle titanyumun işlenmesi esnasında görülen adhezyon, difüzyon ve plastik deformasyon aşınma mekanizmalarının etkisiyle oluştuğu düşünülmektedir [3, 129]. Kaplamasız takımda kırılmaya sebep olan unsurun aşırı sıvanma olduğu Şekil 7.13’te verilen aşınma safhalarını gösteren fotoğraflardan açık bir şekilde görülmektedir. İlk önce dış köşe aşınması meydana gelmiş takip eden delme işlemi ile bu bölgede sıvanma ile köşe noktada ısının etkisiyle kaynaklanma oluşmuştur. Bunun akabinde ise dış köşede kırılma gerçekleşmiştir. Kuru kesme şartlarında oluşan yüksek ısı kesici takımlarda etkin bir şekilde sıvanmanın oluşmasına sebep olmuştur. TiAlN/TiN kaplı takımın KI ve KİT takımlara göre daha çabuk aşınmasında en büyük paya sıvanmanın sahip olduğu tespit edilmiştir. TiAlN/TiN kaplı takımda oluşan sıvanma büyüyerek belli bir boyuta ulaştığında kesme bölgesinden kopmuş ve bu esnada kesici takım malzemesinden de bir parçayı beraberinde götürürerek dış köşe aşınmasının oluşmasına neden olmuştur (Şekil 7.13). Özellikle kaplamanın çok katlı yapıya sahip olması yapışma etkisiyle

kopmayı kolaylaştırmıştır. Benzer şekilde Kİ ve KİT takımlarda da sıvanma ve akabinde dış köşe aşınması ile yanak aşınmasının olduğu görülmüştür.

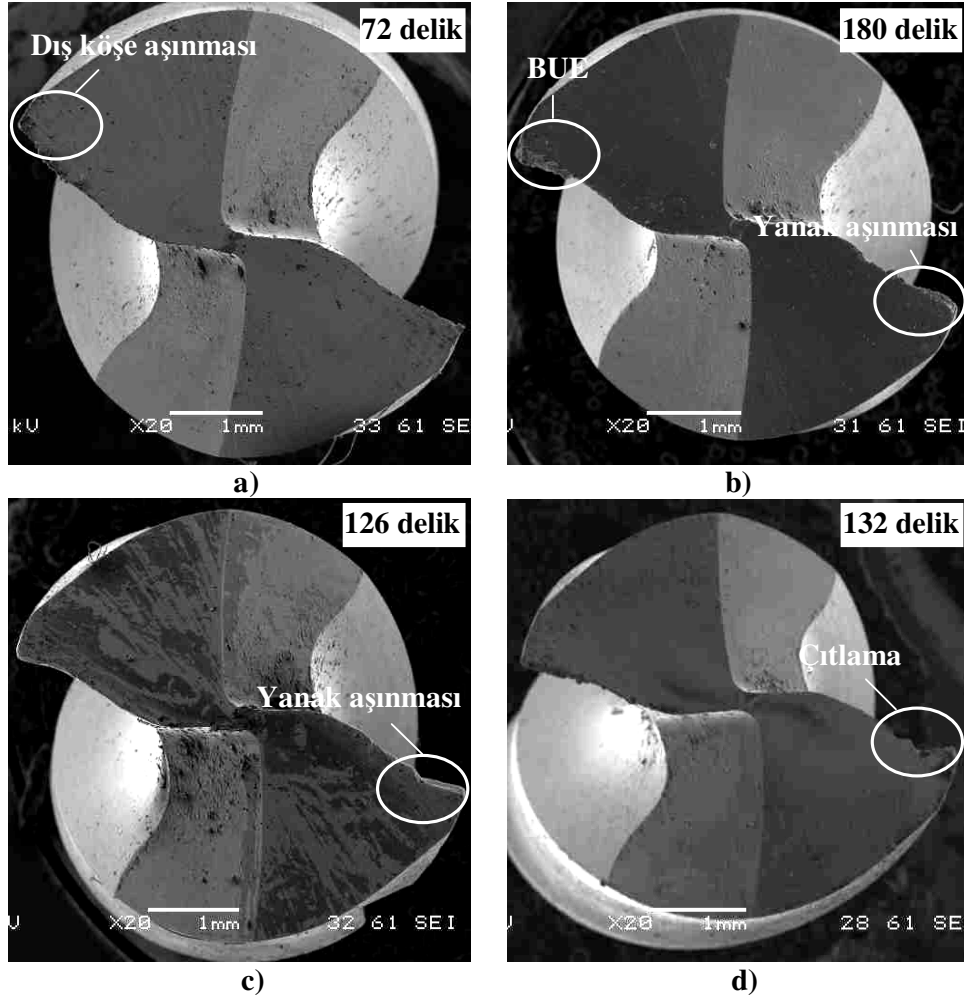


Şekil 7.12. Kuru kesme şartlarında, 30 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında test edilen dört farklı takımın SEM görüntüleri
a) Kaplamasız, b) TiAlN/TiN kaplamalı, c) Kİ, d) KİT



Şekil 7.13. Kuru kesme şartlarında test edilen kaplamasız ve TiAlN/TiN kaplı takımlarda delik sayısı ile aşınmadaki değişim

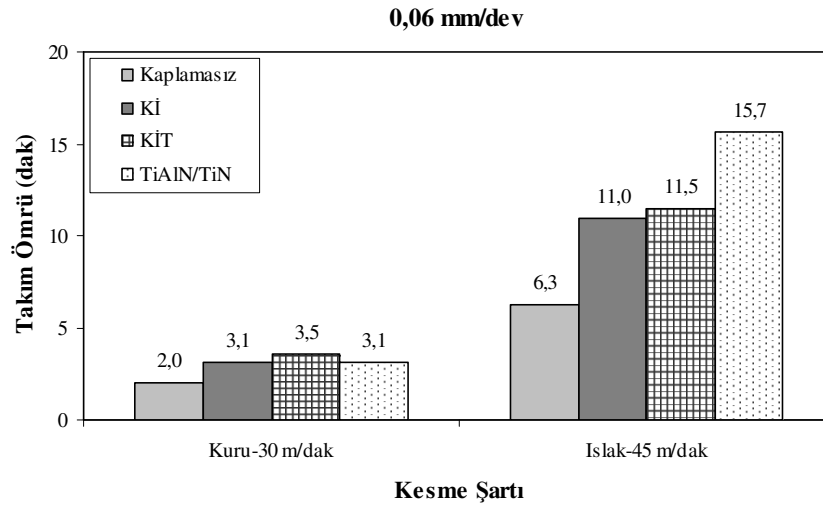
Şekil 7.14'te ıslak kesme şartlarında test edilen takımlardaki aşınmalar görülmektedir. Kaplamasız takımın etkin aşınma tipi dış köşe aşınması ve sıvanma olurken TiAlN/TiN kaplı takımın yanak aşınması ve BUE şeklinde gerçekleşmiştir. KI ve KİT takımlarda ise yanak aşınması ve çatlama görülmüştür. Kesme hızındaki %50'lik artışa karşılık kuru kesme şartlarına göre ıslak kesme şartlarında kesici takımların uzun süre özelliğini korumasında soğutma sıvısının BUE oluşumunu önemli ölçüde engellediğine inanılmaktadır.



Şekil 7.14. Islak kesme şartlarında, 45 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında test edilen dört farklı takımın SEM görüntüleri
a) Kaplamasız, b) TiAlN/TiN kaplamalı, c) Kİ, d) KİT

Şekil 7.15'te dört farklı takımın kesme hızı ve kesme şartıyla takım ömründeki değişimi görülmektedir. Kesme hızının takım ömrünü etkileyen en önemli işleme parametrelerden biri olduğu bilinmektedir. Artan kesme hızı takım ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak dört farklı takımla yapılan ömür deneylerinde kuru kesme şartlarına göre %50 daha yüksek kesme hızı kullanılmasına rağmen soğutma sıvısı kullanımının takım ömrünü ciddi bir şekilde arttırdığı görülmüştür. Kuru kesme şartlarında kaydedilen en yüksek takım ömrü 3,5 dakika iken bu değer ıslak kesme şartlarında 15,7 dakikaya çıkmıştır. Bu da artan kesme hızına rağmen titanyumun işlenmesinde soğutma sıvısı kullanımının önemini açık bir şekilde ortaya

koymaktadır. Kuru kesme şartlarında en uzun takım ömrü KİT takımlarla elde edilirken ıslak kesme şartlarında en uzun takım ömrü TiAlN/TiN kaplı takımlardan elde edilmiştir. Her iki kesme şartında da en düşük takım ömrüne kaplamasız takımlar sahip olmuştur. HSS takımlarda olduğu gibi tungsten karbür takımlarda da kriyojenik işlem ve kriyojenik+temper işleminin kesici takım ömrünün artmasında önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kuru kesme şartlarında kaplamasız takıma göre Kİ takım %55, KİT takım %75 ve TiAlN/TiN kaplı takım %55’lik ömür artışı sağlarken ıslak kesme şartlarında bu oranlar sırasıyla %75, %83 ve %149 şeklinde gerçekleşmiştir. Kriyojenik işlemin kesici takımların mikroyapı ve sertliğinde meydana getirdiği olumlu değişimlerin yanı sıra kesici takımların ısı iletimini arttırmasının da ömür artışı üzerinde etkisinin olduğuna inanılmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi esnasında yüksek sıcaklıkların oluştuğu bilinmektedir. Kesme bölgesindeki sıcaklık artışı kesici takımın aşınma direnci ve sertliğini olumsuz yönde etkileyen bir unsur olmakla birlikte artan ısı işlenen parçalarda boyutsal değişimlere neden olmakta bu da boyutsal doğruluğun kontrolünü zorlaştırmaktadır. Kriyojenik işlemin termal iletkenliği arttırma etkisi kesici takımın ısı dağıtım kapasitesini arttırmakta bu da takım uç sıcaklığının düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Bunun sonucunda işleme esnasında kesici takım sıcak sertliğini korumakta ve işlemsiz takıma göre Kİ takımında daha az aşınma meydana gelmektedir [137, 146-147].



Şekil 7.15. 0,06 mm/dev ilerleme hızında dört farklı takım arasında kesme hızı ve kesme şartlarına bağlı olarak takım ömründeki değişim

Kuru ve ıslak kesme şartları arasındaki en büyük ömür farkı TiAlN/TiN kaplı takım ile elde edilmiştir. Bunun Ti-6Al-4V alaşımının sahip olduğu düşük ısı iletim katsayısı ve yüksek kimyasal reaktifliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kuru kesme şartlarında kesme bölgesinde oluşan yüksek ısı talaşın takım üzerine yüksek miktarda sıvanması sonucu kaynaklanmasına neden olmuş bu da kaplama tabakasının kalkarak takımın kısa sürede ömrünü tamamlamasına neden olmuştur. Soğutma sıvısı kullanımı ise HSS takımlarda olduğu gibi karbür takımlarda da kaplamanın varlığını daha etkin hale getirmiştir.

7.3.3. Genel değerlendirme

Hem HSS hem de karbür matkaplar için yapılan aşınma ve ömür deneyleri kaplama uygulaması, kriyojenik işlem ve kriyojenik+temper işleminin takım ömrünü arttırmada önemli role sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde soğutma sıvısı kullanımı takım ömrünü önemli ölçüde arttırmıştır. Çok katlı kaplama HSS takımlarda hem kuru hem de ıslak kesme şartlarında önemli iyileşme sağlarken karbür takımlarlarda kuru kesme şartlarında beklenen performansı gösterememiştir. Karbür takımlara göre HSS takımlarda kriyojenik işlem ve kriyojenik+temper işleminin takım ömrünü arttırmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Takım ömrü bakımından karbür takımlar HSS takımlara göre mukayese edilemeyecek düzeyde üstünlük sağlamıştır. Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde her iki takım malzemesi içinde etkin aşınma tipinin sıvanma şeklinde olduğu görülmüştür.

7.4. HSS Matkaplar

Bu bölümde HSS matkaplarla Çizelge 6.12’de belirtilen II. ve III. deney girdi parametrelerine bağlı olarak elde edilen II. deney çıktıları (ilerleme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülüğü vb.) ayrı ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir. II. deney çıktılarının her biri değerlendirilirken önce kaplamasız takımlarla kaplamalı takımlar mukayese edilmiş daha sonra ise Kİ ve KİT takımların bu takımlarla mukayesesi

yapılmıştır. Deney çıktılarının değerlendirilmesinde, deney takrarları sonucu elde edilen ölçümlerin ortalamaları dikkate alınmıştır.

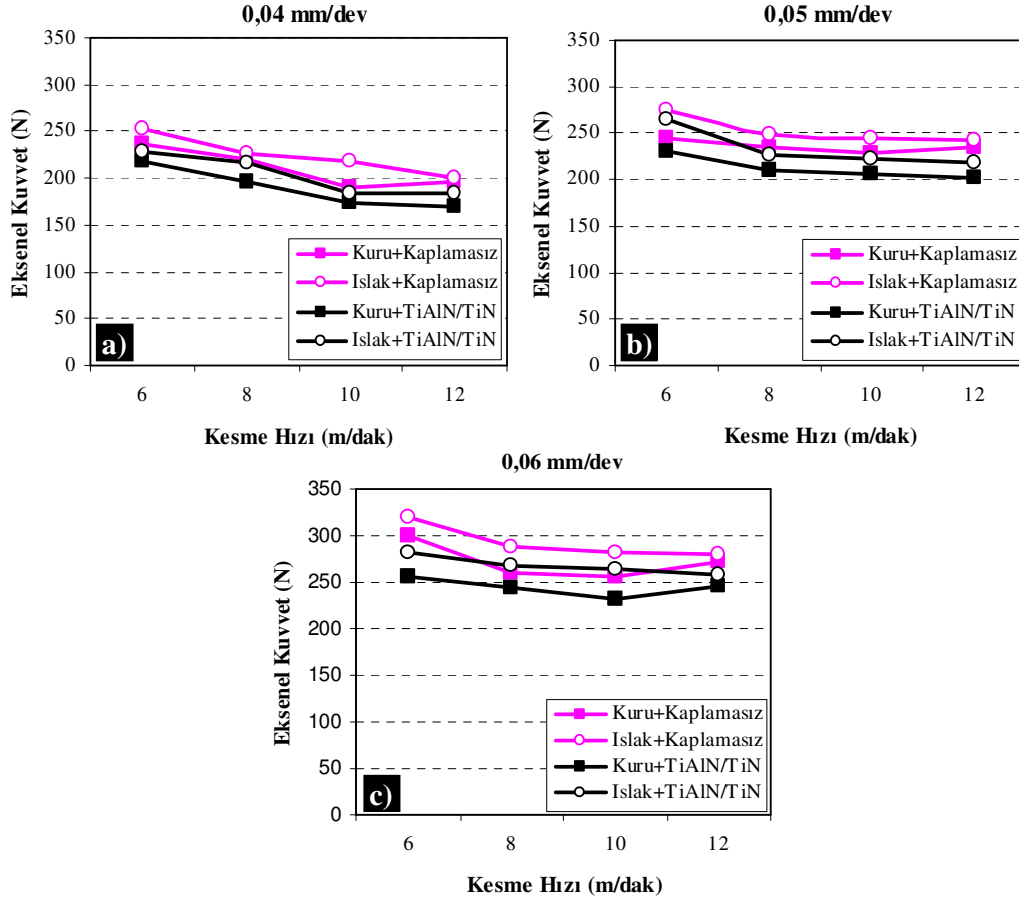
7.4.1. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların kesme kuvvetleri bakımından değerlendirilmesi

Şekil 7.16'daki grafikler kaplamasız ve çok katlı TiAlN/TiN kaplı takım ile farklı kesme şartlarında (kuru ve ıslak), kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak elde edilen kesme kuvveti değişimlerini göstermektedir. Grafiklere bakıldığında 0,04 ve 0,05 mm/dev ilerlemelerde kesme hızındaki artışla her iki takım da kesme kuvvetlerinin düştüğü görülmektedir. Ancak 0,06 mm/dev ilerlemede, kesme kuvvetlerinde 10 m/dak kesme hızına kadar düşüş olmuş bu kesme hızından sonra ise özellikle kuru kesme şartlarında kuvvetlerin bir miktar arttığı görülmüştür. Kesme hızındaki artışla kesme kuvvetlerinde meydana gelen bu düşüşe, kısmen takım-talaş temas alanındaki azalma, kısmen de kesme hızındaki artışla birlikte sıcaklıktaki artışın malzemenin akma mukavemetini düşürmesinin sebep olduğu söylenebilir [148-149]. 0,06 mm/dev ilerlemede 10 m/dak kesme hızından sonra meydana gelen artış ise yüksek kesme hızı ve ilerleme kombinasyonlarında kesme bölgesinde yüksek sıcaklıkların oluşması ve kesici takım üzerine gelen yüklerin artması sonucu muhtemel takım aşınmasına atfedilmiştir [35]. Kesme hızı kesme kuvvetleri üzerinde; ilerlemeye, kaplama malzemesine ve kesme şartlarına bağlı olarak değişmekle birlikte %4-29 arasında değişen değerlerde düşüşe sebep olmuştur.

İlerlemeye bağlı kuvvet değişimlerine bakıldığında ise ilerlemedeki artışla kesme kuvvetlerinin kuru ve ıslak kesme şartlarında her iki takım da belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. 0,04 mm/dev ilerlemede 169-253 N aralığında olan kesme kuvvetleri, ilerlemenin %50 artırılmasıyla 0,06 mm/dev ilerlemede 233-320 N aralığına ulaşarak %7-38 arasında değişen bir artış göstermiştir. Daha öncede ifade edildiği gibi üç kesme kuvveti bileşeni de ölçülmüş ancak değerlendirmeye sadece eksenel kuvvet alınmıştır. Delme esnasında eksenel kuvvetin büyüklüğünü belirleyen en önemli parametrelerden biri de ilerlemedir. Dolayısıyla ilerlemedeki artışın

eksenel kuvveti artırması beklenen bir durumdur. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda da ilerlemedeki artışın kesme kuvvetlerini artırdığı ifade edilmektedir [150-152]. Buradan hareketle yapılan çalışmada kesme kuvvetlerinin değişimi üzerinde ilerlemenin kesme hızından daha etkili olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7.16. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki kesme kuvveti değişimleri
a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev

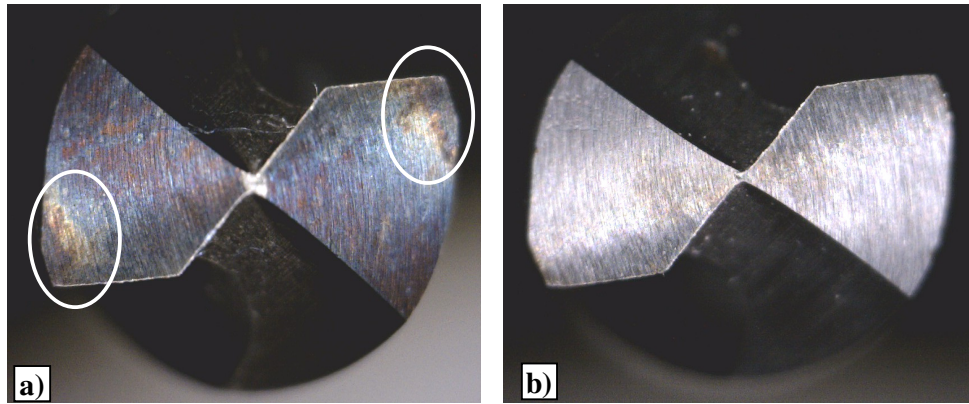
Kaplama farkına bağlı kuvvet değişimleri irdelendiğinde, deneylerde test edilen bütün kesme parametresi kombinasyonlarında çok katlı TiAlN/TiN kaplı takımla elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kaplamasız takımla elde edilen değerlerden daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Kaplama malzemesi kesme kuvvetleri üzerinde %14'lere varan düşüşler sağlamıştır. Bu fark yüksek ilerleme hızlarında (0,06 mm/dev) daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 7.16.c). Bu durum TiAlN/TiN

kaplamanın çok katlı kaplama yapısına ve yüksek kaplama sertliğine sahip olması sonucu kesici takımın aşınma direncini artırmasına atfedilmiştir. Ayrıca sahip olduğu düşük sürtünme katsayısı takım-talaş arayüzeyindeki sürtünmeyi azaltarak kesme kuvvetlerinin düşmesinde etkili olmuştur. Literatürde de çok katlı kaplamaların tek katlı kaplamalara ve özellikle kaplamasız takımlara göre takım performansı açısından üstünlük sağladığı ifade edilmektedir [153].

Kuru ve ıslak kesme şartları, kesme kuvvetleri üzerinde çok fazla değişim meydana getirmemekle birlikte ıslak kesme şartlarında kuvvetlerin bir miktar arttığı görülmüştür (Şekil 7.16). Islak kesme, kesme kuvvetleri üzerinde kesme parametreleri ve kaplamaya bağlı olarak %2-14 arasında değişen değerlerde artışa sebep olmuştur. Talaşlı imalatla kullanılan soğutma sıvılarının iyi bir yağlama ve iyi bir soğutma özelliğine sahip olması istenmektedir. Yağlama özelliği ile takım/talaş arayüzeyinde ince bir yağ filmi oluşturarak sürtünmeyi azaltmak, soğutma özelliği ile de kesme bölgesindeki sıcaklıkların düşürülmesi amaçlanmaktadır [144]. Yağlama özelliğinin sürtünmeyi azaltması kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Ancak Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde ıslak kesmenin kesme kuvvetlerini bir miktar arttırdığı görülmüştür. Bu durum Ti-6Al-4V alaşımının, ısıl iletkenliğinin düşük [154] olmasına bağlanmıştır. Düşük ısıl iletkenliğe sahip olan Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi esnasında kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır [3, 145]. Kesme bölgesinde oluşan bu sıcaklıklar ise malzemenin akma mukavemetini düşürerek talaş oluşumunu kolaylaştırmakta bu da kesme kuvvetlerinde düşüşe sebep olmaktadır [155]. Ancak kesme bölgesine tatbik edilen soğutma sıvısı kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkları düşürerek malzemenin akma mukavemetini artırmaktadır. Bunun sonucu olarak da kesme kuvvetlerinde bir miktar artış meydana gelmektedir. Belirtilen bu sebeplerden dolayı, ıslak kesmenin, Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kesme kuvvetlerini bir miktar artırdığı düşünülmektedir. Aslında soğutma sıvısı kullanımı kesme kuvvetlerini artırmamış aksine kesme işlemi ideal şartlarda gerçekleşmiş olup kuru kesme şartlarındaki kesme bölgesinde oluşan sıcaklıklar kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olmuştur. Dolayısıyla yukarıda anlatılanlar ışığında Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde kesme kuvvetleri üzerinde,

kullanılan soğutma sıvısının yağlama özelliğinden ziyade soğutma özelliğinin ön plana çıktığını söylemek mümkündür.

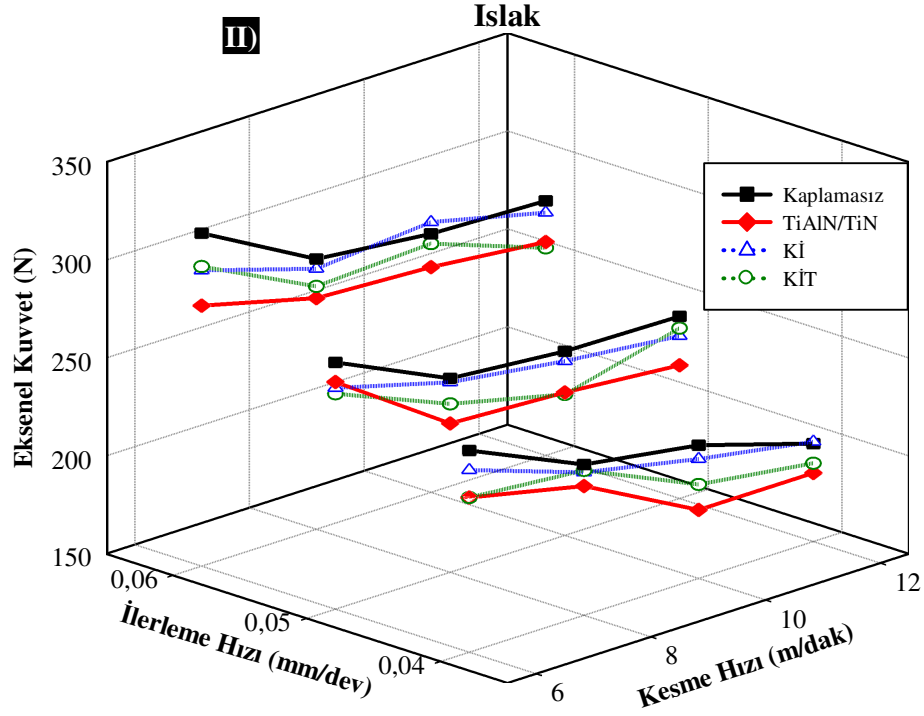
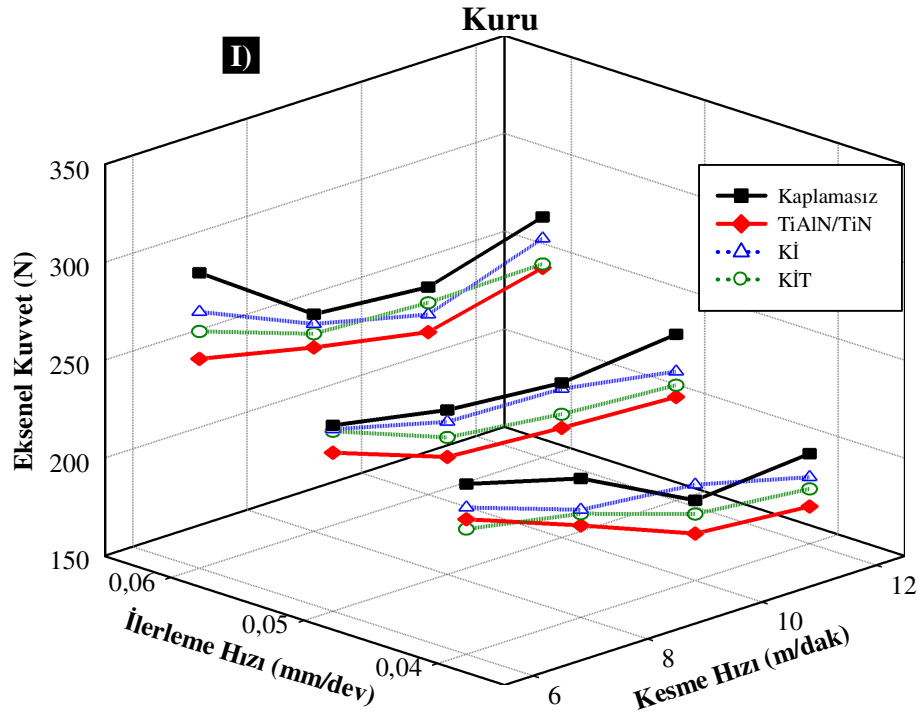
Şekil 7.17’de kaplamasız HSS matkaplarla 8 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerlemede kuru ve ıslak kesme şartlarında delinen üç delik sonundaki takımların makro fotoğrafları görülmektedir. Şekil 7.17.a’da, aynı kesme parametrelerinde test edilmesine rağmen kuru kesme şartlarında özellikle takımın dış çapa yakın bölgelerinde ısıнын etkisiyle belirgin bir renk değişimi (yanma) olduğu görülmektedir. Oysa ıslak kesme şartlarında kesici takımda ısı etkisiyle her hangi bir renk değişimi olmamıştır (Şekil 7.17.b). Bu durum kuru kesme şartlarında kesme bölgesinde yüksek sıcaklıkların oluştuğunu, soğutma sıvısı kullanımının ise kesme bölgesindeki sıcaklıkları düşürmede önemli bir rol oynadığını doğrular niteliktedir.



Şekil 7.17. Kaplamasız HSS matkapların 8 m/dak kesme hızında 0,05 mm/dev ilerlemede üç delik sonundaki makro fotoğrafları
a) Kuru kesme şartlarında b) Islak kesme şartlarında

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların kesme kuvvetleri bakımından değerlendirilmesi

Şekil 7.18’deki grafikler dört farklı takım arasında kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişimleri göstermektedir. Kİ ve KİT takımlarda kaplamalı ve kaplamasız takımlarda olduğu gibi genel itibariyle artan kesme hızı ile kesme kuvvetleri düşerken artan ilerlemelerin kesme kuvvetlerini arttırdığı görülmüştür.



Şekil 7.18. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

Yine işlemsiz takımlarda olduğu gibi Kİ ve KİT takımlarda ıslak kesme şartlarının kesme kuvvetlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Bu değişimlerin muhtemel sebepleri bir önceki bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştı. İstisnai durumlar dışında genel olarak Kİ ve KİT takımlarla elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kaplamasız ve TiAlN/TiN kaplı takımlarla elde edilen kesme kuvveti değerlerinin arasında olduğunu söylemek mümkündür. Kriyojenik işlem ve temperleme işleminin takım ömrü ve takım aşınmasında olduğu gibi kesme kuvvetlerinin düşmesi üzerinde de olumlu etkilere sahip olduğu görülmüştür. Kuru kesme şartlarında kesme kuvvetleri üzerinde kaplamasız takımlara göre kriyojenik işlemin %9, kriyojenik işlem+temperleme işleminin ise %12'leri bulan düşüşler sağladığı tespit edilmiştir. Bu oranlar ıslak kesme şartlarında sırasıyla %6 ve %10 şeklinde olmuştur. Benzer şekilde literatürde yapılan çalışmalarda da kriyojenik işlemin kesme kuvvetlerinin bir miktar düşmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir [137, 156]. Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme işleminin kesici takımların aşınma direnci ve sertliğinde meydana getirdiği artışın kesme kuvvetlerinin düşmesi üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Genel olarak kaplamasız takımlarda 10 m/dak kesme hızından sonra kuvvetlerde artış görülürken Kİ ve KİT takımlarda azalma eğilimi devam etmiştir. Bu da aşınma direncindeki artışın bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Kriyojenik işlem ve temperleme işlemi çok katlı kaplama uygulamasının gösterdiği performansı gösterememiştir. Dört takım arasında en düşük kesme kuvveti değerleri çok katlı TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir.

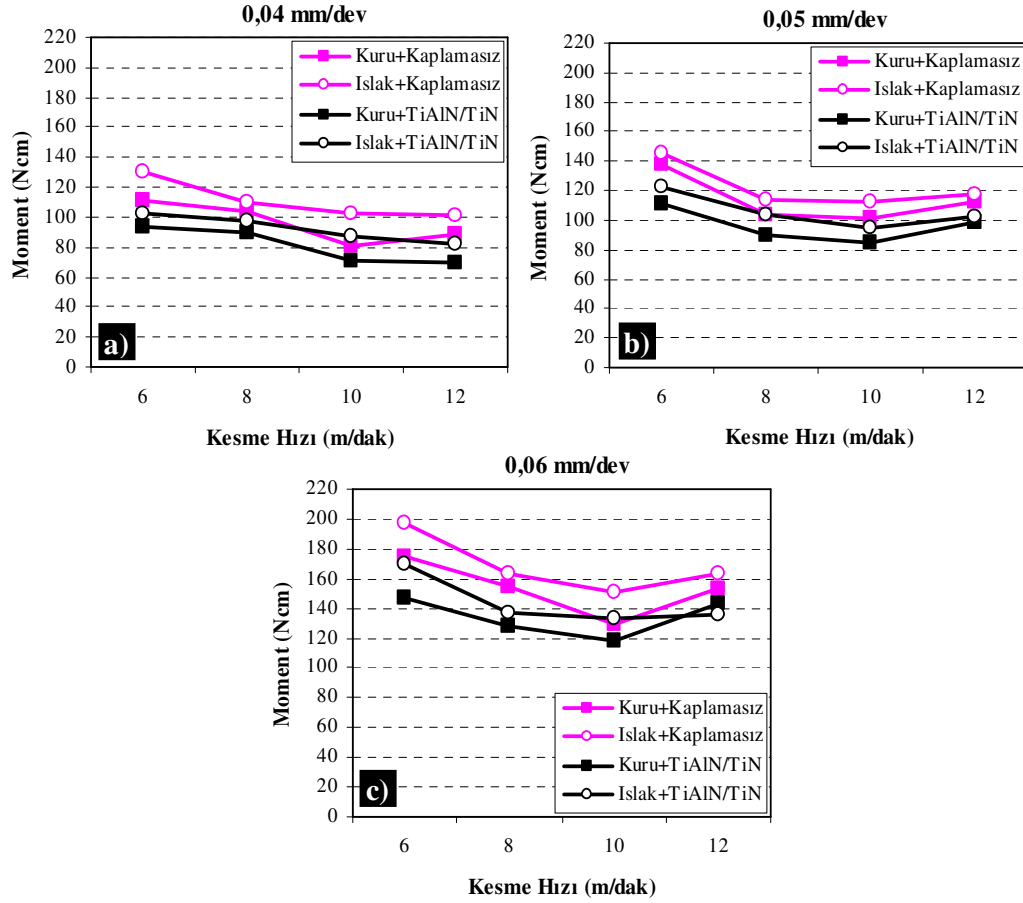
7.4.2. Momentlerin değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların moment bakımından değerlendirilmesi

Delme işleminde momenti belirleyen en önemli kuvvet bileşenlerinden birinin eksenel kuvvet (F_z) olduğu düşünülürse momentteki değişimin eksenel kuvvetteki değişimle paralellik göstermesi kaçınılmazdır. Ancak diğer kuvvet bileşenlerinin (F_x , F_y) ve sürtünmenin etkisini görebilmek adına delme işlemlerinde momentin değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Şekil 7.19'daki grafiklerde farklı kesme şartlarında kaplamasız ve kaplamalı takımlarla kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak elde edilen moment değerlerindeki değişimler görülmektedir. Genel itibariyle kesme hızındaki artışla 10 m/dak kesme hızına kadar moment değerleri her iki takımında da azalmıştır. Ancak yüksek ilerleme hızlarında (0,05-0,06 mm/dev) 10 m/dak kesme hızından sonra moment değerlerinde belirgin bir artış görülmüştür (Şekil 7.19-b-c). Kesme hızındaki artış %29-37 arasında değişen değerlerde moment değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Kesme kuvvetlerinde olduğu gibi kesme hızındaki artışla moment değerlerindeki düşüşün, kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların malzemenin akma mukavemetini düşürmesinden kaynaklandığı söylenebilir [157-158]. Özellikle yüksek ilerlemelerde 10 m/dak kesme hızından sonra meydana gelen moment artışının ise, yüksek kesme hızı-ilerleme kombinasyonlarında takım aşınmasına bağlı olarak takım/talaş arayüzeyindeki sürtünmenin bir sonucu olarak meydana geldiği düşünülmektedir. Bu kesme hızından sonra kesme şartları ve parametrelerine bağlı olarak moment değerlerinde %4-21 arasında değişen değerlerde bir artış olmuştur. Benzer durum kesme kuvvetlerinde de gerçekleşmiş ancak aynı kesme hızında 0,05-0,06 mm/dev ilerleme hızlarında momentteki artışın daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum momenti meydana getiren diğer kuvvet bileşenlerinin etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

İlerleme hızı, kesme kuvvetlerinde olduğu gibi moment üzerinde de etkili olmuştur. İlerleme hızındaki artışın momenti arttırdığı görülmüştür (Şekil 7.19). İlerlemedeki artış talaş kalınlığının artmasına, buna bağlı olarak daha küçük bir özgül kesme kuvvetinin oluşmasına neden olmaktadır. Ancak artan ilerleme aynı zamanda talaş alanını da artırmaktadır. Bu da yapılan çalışmada toplamda daha büyük bir teğetsel kuvvet ve moment oluşumuna yol açmıştır [35]. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 70-130 Ncm aralığında olan moment değerleri ilerlemedeki %50'lik bir artış sonucu 0,06 mm/dev ilerleme hızında 118-198 Ncm aralığına çıkarak %52-66 arasında değişen bir artış göstermiştir. Literatürdeki benzer çalışmalarda da ilerleme hızındaki artışın momenti arttırdığı ifade edilmektedir [159-160]. Kesme kuvvetlerinde olduğu gibi moment değerlerinin değişimi üzerinde de ilerleme hızının kesme hızından daha etkili olduğu söylenebilir.



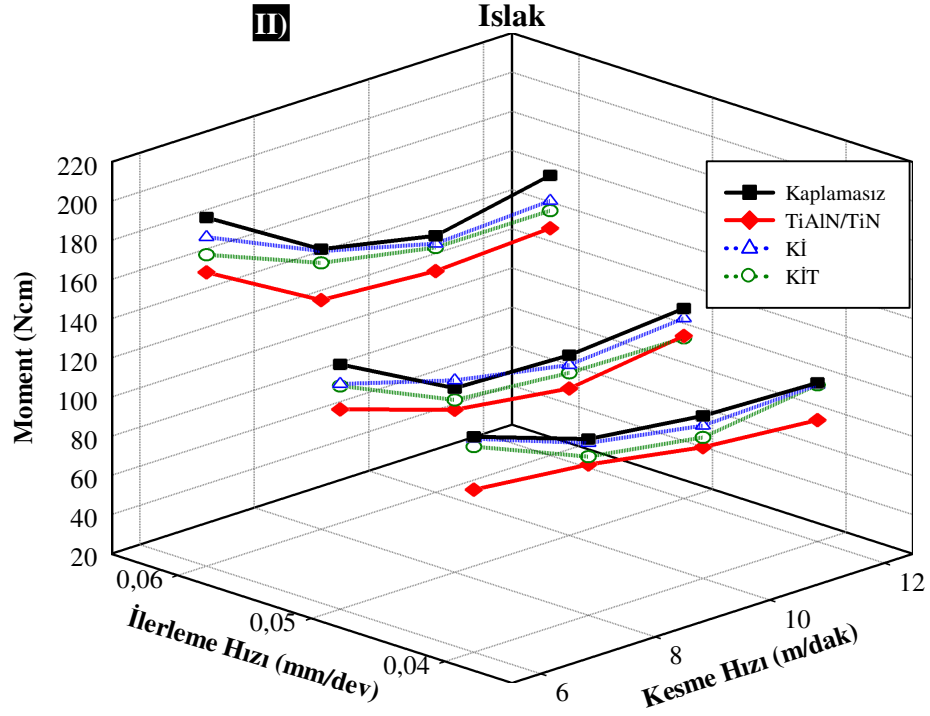
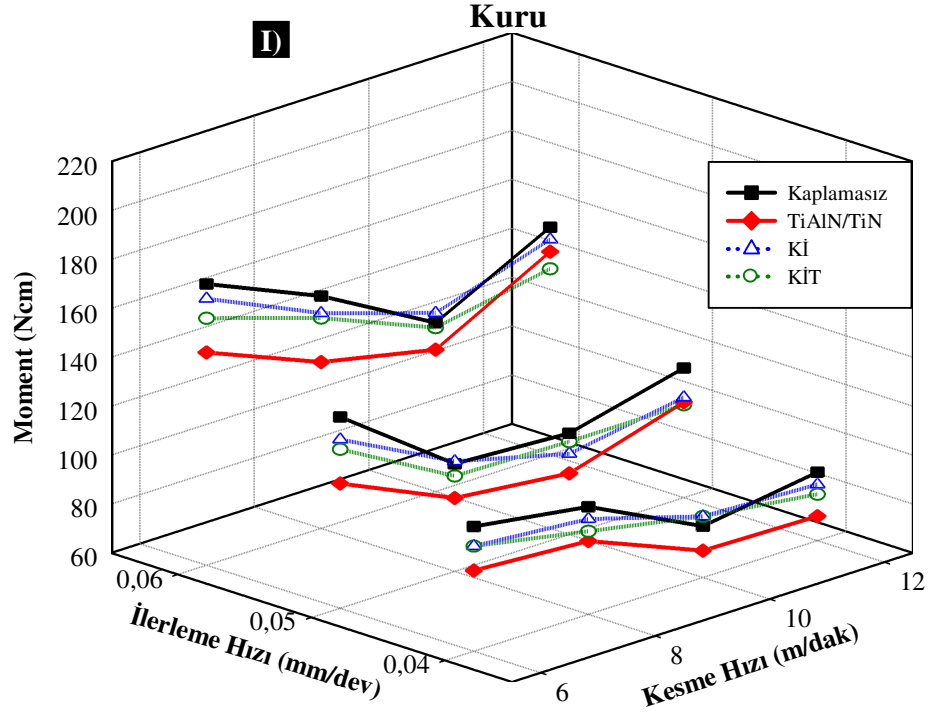
Şekil 7.19. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki moment değişimleri
a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev

Çok katlı TiAlN/TiN kaplamanın kesme kuvvetlerinde olduğu gibi moment üzerinde de olumlu etkisini görmek mümkündür. Hemen hemen tüm kesme parametresi kombinasyonlarında en düşük moment değerleri çok katlı TiAlN/TiN kaplı takımlarla elde edilmiştir. TiAlN/TiN kaplama moment değerlerinde kaplamasız takıma göre %1-24 arasında değişen değerlerde düşüş sağlamıştır. M42 HSS matkap üzerine yapılan TiAlN/TiN kaplamanın, matkap ana malzemesine (alt katman-substrate) göre daha düşük sürtünme katsayısına (0,3) sahip olması, delme esnasında takım/talaş arayüzündeki sürtünmeyi azaltarak moment değerlerinin düşmesinde önemli bir rol oynamıştır. Ayrıca düşük ısı iletim katsayısı ve yüksek sertliği ile kesici takımın aşınmasını geciktirmiş olması da momentlerin düşmesinde etkili olmuştur.

Islak kesme şartları kuru kesme şartlarına göre moment değerlerini bir miktar arttırmıştır. Islak kesme ile kesme parametrelerine göre farklılık arz etmekle birlikte moment değerlerinde %17'lara varan artışlar kaydedilmiştir. Kesme kuvvetlerinde detaylı bir şekilde irdelenen soğutma sıvısının kesme bölgesindeki sıcaklıkları düşürmesinin etkileri moment üzerinde de görülmüştür. Kuru ve ıslak kesme şartlarındaki en büyük moment farkı 6 m/dak kesme hızında 0,06 mm/dev ilerleme hızında çok katlı TiAlN/TiN kaplı takım ile delinen delikten elde edilmiştir. Yüksek kesme hızlarında (12 m/dak) ve yüksek ilerlemelerde (0,05-0,06 mm/dev) ise bu fark azalma eğilimi göstermiştir. Yüksek kesme hızı-ilerleme kombinasyonlarında kesici takım üzerine gelen yüklerin artması kesici takımın hızla aşınarak ömrünü tamamlamasına neden olmaktadır. HSS takımların yaklaşık 600 °C'ye kadar olan sıcaklıklara dayanabildiği düşünülürse ısı yüklerinin takımın deformasyonunu hızlandıracağı aşîkârdır. Belirtilen parametrelerde kuru ve ıslak kesme şartlarındaki moment değerlerinin birbirine yakın olması da kesici takımın deformasyonu ile açıklanabilir.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların moment bakımından değerlendirilmesi

Dört farklı takım ile, kesme parametrelerine ve kesme şartlarına bağlı olarak elde edilen moment değerlerindeki değişimler Şekil 7.20'deki grafiklerde verilmiştir. Genel olarak grafiklerden Kİ ve KİT takımlarla elde edilen moment değerlerinin kesme parametrelerine göre değişimlerinin kaplamasız ve kaplamalı takımlardaki değişime paralel olduğu söylenebilir. Dört takım arasında en düşük moment değerleri TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. Bu takımı sırasıyla Kİ, KİT ve kaplamasız takımlar takip etmiştir. Bu sıralama kesme kuvvetlerinde de aynı şekilde gerçekleşmiş olup benzer eğilimler sergilenmiştir. TiAlN/TiN kaplama moment değerlerinde %26'ları bulan düşüşler sağlarken, kriyojenik işlem+temperleme işlemi en fazla %15'lik düşüş sağlamıştır. Kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işlemi, kalıntı östenitin martensite dönüşümü ile takımların aşınma direncinde sağladığı artış, moment değerlerinin bir miktar düşmesini sağlamıştır.



Şekil 7.20. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak momentteki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

Literatürde de kriyojenik işlemin kesici takımların mikroyapı ve mekanik özelliklerinde sağladığı iyileşmeler sonucu momentlerin düşmesi üzerinde etkili olduğu ifade edilmektedir [122]. TiAlN/TiN kaplamanın sahip olduğu düşük sürtünme katsayısının moment değerlerini düşürmede önemli role sahip olduğu düşünülmektedir. Kİ ve KİT takımlarla delinen deliklerden elde edilen moment değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Her iki takımın, takım aşınması ve takım ömrü değerlerinde birbirine yakın olması kriyojenik işlem ve temperleme işleminin M42 HSS takımlar üzerinde benzer etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Kesme şartının, kriyojenik işlem ve temperleme işleminin momentler üzerindeki etkisini değiştirmede önemli bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir.

7.4.3. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların yüzey pürüzlülüğü bakımından değerlendirilmesi

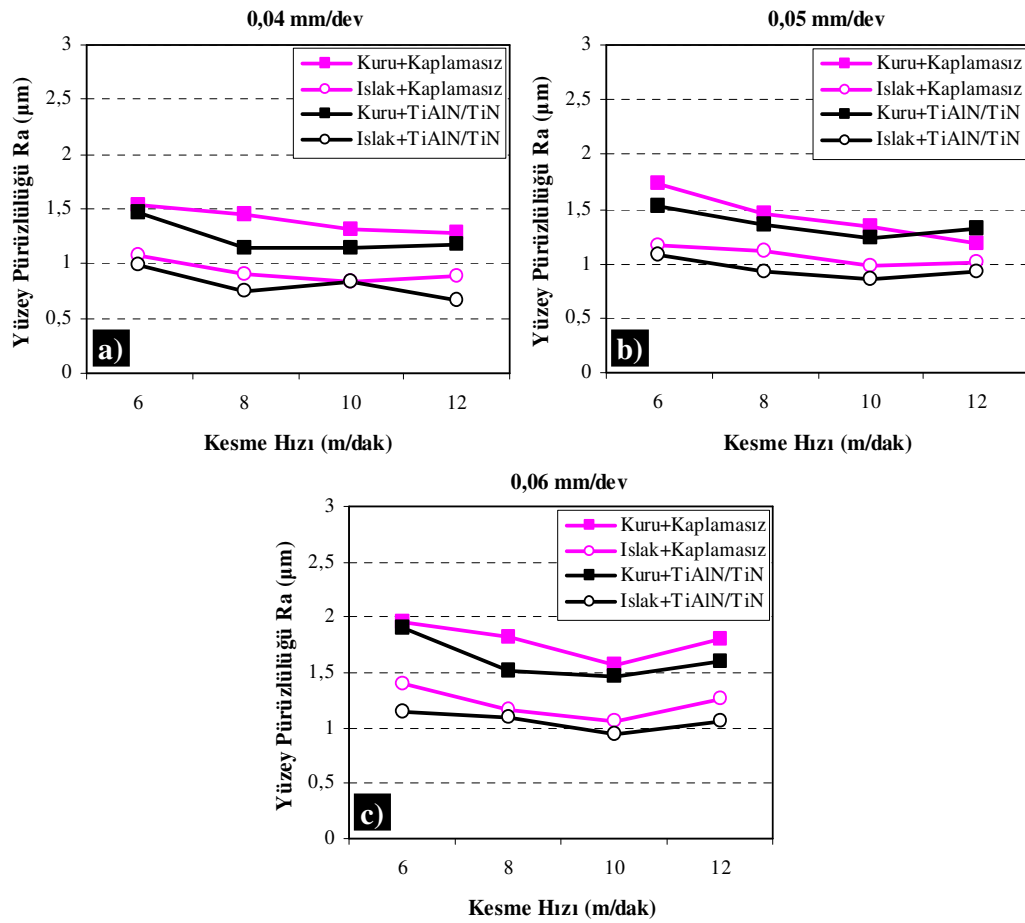
Malzemelerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli kriterlerden birisi de işlenen yüzeylerden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleridir. İyi bir yüzey pürüzlülüğü bitmiş ürünün tribolojik özellikleri, yorulma dayanımı, korozyon direnci ve estetik görünümünde önemli iyileşmeler sağlamaktadır [157, 161]. Kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği, talaş açısı, işlenen parçanın fiziksel ve kimyasal özellikleri, talaş kırıcı geometrisi gibi yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok parametre vardır [162]. Düşük maliyet ve yüksek kalitede ürünlerin elde edilebilmesi için uygun işleme şartlarının belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla delinen deliklerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek optimum işleme şartları belirlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 7.21'deki grafikler, kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak kaplamalı ve kaplamasız takımlarla delinen deliklerin ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerlerindeki değişimleri göstermektedir. 0,06 mm/dev ilerleme hızı hariç diğer ilerleme hızlarında bazı parametrelerde sapmalar olmakla birlikte kesme

hızındaki artışla R_a değerlerinin azaldığı görülmüştür. 0,06 mm/dev ilerleme hızında ise 10 m/dak kesme hızından sonra R_a değerleri bir miktar artmıştır. Bu durum kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesinde de ifade edildiği gibi artan takım aşınmasına atfedilmiştir. Aynı parametrelerde kesme kuvvetleri ve momentlerin de artması kesici takım üzerine gelen yüklerin arttığını göstermektedir. Özellikle düşük ilerleme hızlarında olmak üzere kesme hızındaki artış, R_a değerlerinde %50'lere varan oranlarda iyileşmeler sağlamıştır. Talaşlı imalatla yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyen en önemli unsurlardan biri yığıntı talaş (YT) oluşumudur. Kesici takımla kimyasal reaksiyona girme eğilimi yüksek olan Ti-6Al-4V alaşımı, işleme esnasında kesici takımın kesme kenarlarında yığıntı talaş oluşumuna sebep olmaktadır. Kesici kenardaki yığıntı talaşın büyük ve kararsız olması ise işlenen yüzeyin kalitesini bozmakta ve yüzey pürüzlülük değerlerini arttırmaktadır. Kesme hızındaki artışla R_a değerlerindeki azalma, takım-iş parçası arayüzündeki sıcaklık artışına bağlı olarak yığıntı talaşın boyutunun küçülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [148]. Ayrıca artan sıcaklıkla takım-iş parçası arayüzünde temas alanının azalmasına bağlı olarak sürtünmenin azalmasının da yüzey kalitesinin artmasında etkili olduğuna inanılmaktadır [157]. Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi esnasında yüksek sıcaklıkların oluştuğu göz önüne alınırsa aşırı sıcaklık artışına sebep olacak kesme parametrelerinin kesici takımın deformasyonunu hızlandıracağı unutulmamalıdır. Nitekim yapılan çalışmada yüksek kesme hızı-ilerleme değerlerinde R_a değerlerinin arttığı görülmüştür.

Son mamülde istenilen yüzey kalitesinin elde edilmesinde en önemli işleme parametrelerinden biri de ilerleme hızı olup, genellikle artan değerleri yüzey kalitesinin azalmasına sebep olmaktadır. Artan ilerleme hızı ile birim zamanda kaldırılan talaş hacmi artmakta ve buna bağlı olarakta kesme kuvvetleri büyümektedir. Kesici takım üzerinde artan bu yüklerin yüzey kalitesini olumsuz etkilediği Şekil 7.21'deki grafiklerde görülmektedir. Kuru kesme şartlarında daha belirgin olmakla birlikte her iki takımda da artan ilerleme hızı ile R_a değerleri artmıştır. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 0,66-1,53 μm aralığında olan R_a değerleri 0,06 mm/dev ilerleme hızında 0,95-1,95 μm aralığına ulaşmıştır. Dolayısıyla ilerleme hızındaki %50'lik artışa karşılık R_a değerlerinde %40'ın üzerine çıkan

artışlar kaydedilmiştir. En düşük R_a değeri $0,66 \mu\text{m}$ olup, bu değer en düşük ilerleme hızı ($0,04 \text{ mm/dev}$) ve en yüksek kesme hızında (12 m/dak) ıslak kesme şartlarında kaplamalı takım ile delinen deliklerden elde edilmiştir. Bunun aksine en büyük R_a değeri ise yüksek ilerleme-düşük kesme hızı kombinasyonunda kuru kesme şartlarındaki kaplamasız takım ile delinen deliklerden elde edilmiştir. Buradan hareketle kaplama malzemesi, kesme parametreleri ve kesme şartlarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili parametreler olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7.21. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki yüzey pürüzlülüğü değişimleri
a) $0,04 \text{ mm/dev}$ b) $0,05 \text{ mm/dev}$ c) $0,06 \text{ mm/dev}$

Kaplama uygulamasının, kesme kuvvetleri ve momentlerde sağladığı iyileşmelere benzer şekilde yüzey kalitesinin artmasında da önemli bir rol oynadığı söylenebilir.

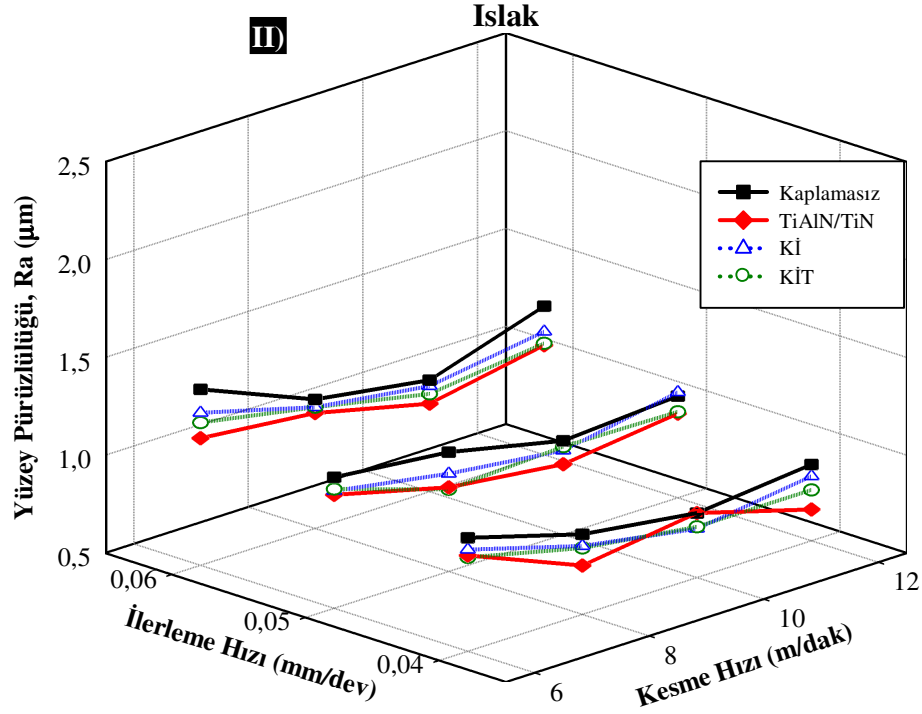
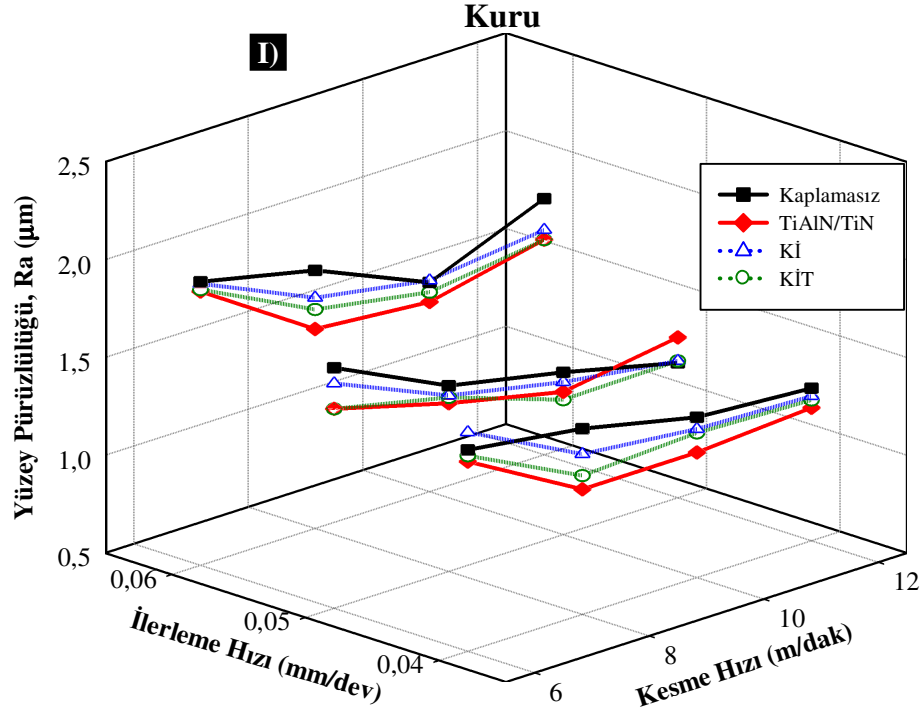
Yapılan delme deneylerinin hemen hemen hepsinde en düşük R_a değerleri TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. Bu durum Şekil 7.21'deki garfiklerden açıkça görülebilir. Kaplama malzemesi R_a değerlerinde %34'lere ulaşan düşüşler sağlamıştır. Bu düşüşler, kesici takıma uygulanan TiAlN/TiN kaplamanın çok katlı kaplama yapısına ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmasının kesme esnasındaki talaş akışını kolaylaştırması ile izah edilebilir. Genellikle kaplamalı takım ile kaplamasız takım arasındaki R_a farkının kuru kesme şartlarında daha fazla olduğu görülmüştür. Kuru kesmede, ıslak kesmeye göre sürtünmenin daha fazla olduğu bilinmektedir. Bu da Ti-6Al-4V alaşımının yüksek oranda kesici takıma yapışmasına zemin hazırlamaktadır. Özellikle kuru kesmedeki sıvanma eğiliminin yüksek olması kaplamanın varlığını burada daha etkin bir şekilde göstermesini gerekli kılmaktadır. Nitekim kaplama malzemesinin kesici takım ile talaş arasında bariyer oluşturarak sıvanma eğilimini azaltması yüzey kalitesinin artmasını sağlamıştır.

Kesme kuvvetleri ve momentin değerlendirildiği bölümde soğutma sıvısı kullanımının kesme kuvvetleri ve momentleri bir miktar arttırdığı ifade edilmişti. Aslında soğutma sıvısı kullanımının kesme kuvveti ve momentlerde artmaya sebep olmadığı, bunun aksine kuru kesmede oluşan sıcaklıkların düşüşüne sebep olduğu dolayısıyla ideal kesme şartlarının ıslak kesme şartlarında sağlandığı tezi öne sürülmüştü. En düşük R_a değerlerinin her iki takım da ıslak kesme şartlarında elde edilmiş olması ve kuru kesme şartlarına göre ciddi bir iyileşme olması bu tezi doğrular niteliktedir. Islak kesme, kuru kesmeye göre R_a değerlerinde %16 ila %80 arasında değişen değerlerde önemli düşüşler sağlamıştır. Islak kesmenin özellikle kaplamasız takımlarla delinen deliklerdeki yüzey kalitesinin artırılmasında daha etkin olduğu görülmüştür. Bu durumun, daha öncede ifade edildiği gibi YT oluşumunun kaplamasız takımlarda daha yüksek olması soğutma sıvısı kullanımının ise bu oluşumu önemli ölçüde azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların yüzey pürüzlülüğü bakımından değerlendirilmesi

İşlenebilirlik çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve değerlendirilmesi, üretilen parçaların yüzey kalitelerinin belirlenmesinde ve geliştirilmesi önemli bir rol oynar. Araştırmacılar tarafından işlenen parçaların yüzey kalitesini arttırmak amacıyla birçok işleme yöntem ve teknikleri denenmektedir. Son yıllarda kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem ile kesici takımların aşınma direncinde sağlanan iyileşmelere paralel olarak işlenen yüzeylerin kalitesinin artmasında da iyileşme sağlanabilmektedir.

HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme işleminin Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kaplamasız (işlemsiz) ve TiAlN/TiN kaplı takımlara göre yüzey kalitesi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışma neticesinde R_a değerleri elde edilmiştir. Bu R_a değerlerinin kesme şartlarına ve kesme parametrelerine göre değişimi Şekil 7.22’de toplu olarak gösterilmiştir. Grafiklerden hem kuru hem de ıslak kesme şartlarında Kİ ve KİT takımlarla elde edilen R_a değerlerin çok katlı TiAlN/TiN kaplı takımla elde edilen R_a değerlerine yakın olduğu görülmektedir (Özellikle 0,05 mm/dev ilerleme hızında). Talaşlı imalatla yüzey pürüzlülüğünün artmasında en önemli etkenlerden birinin, kesme işlemini yapan kesici takımın zamanla aşınması ve buna bağlı olarak kesme işlemini istenilen nitelikte yerine getirememesi olduğu söylenebilir. Artan aşınma ile kesici takım sahip olduğu geometriyi koruyamamakta bunun sonucu olarak artan sürtünme yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Kİ ve KİT takımların kaplamalı takımlara yakın R_a değerleri vermesi, kriyojenik işlem ve temperleme işleminin kesici takımların mikroyapısında meydana getirdiği değişimlerin kesici takımların aşınma direncini artırarak [95] uzun süre sahip olduğu geometriyi koruması ile izah edilebilir. Benzer şekilde literatürdeki çalışmalarda da kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin işlenen parçanın yüzey kalitesinin artması üzerinde iyileşmeler sağladığı görülmektedir [97, 122].



Şekil 7.22. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

Kaplamasız takımlarla delinen deliklerden elde edilen R_a değerleri 0,83-1,95 μm arasında iken Kİ takımlarda 0,75-1,94 μm , KİT takımlarda ise 0,72-1,86 μm arasında değişim göstermiştir. Dolayısıyla kaplamasız takımlara göre Kİ ve KİT takımlar yüzey kalitesinin artması yönünde önemli bir iyileşme kaydetmiştir. Islak kesme şartları kaplamasız ve TiAlN/TiN kaplı takımlarda olduğu gibi Kİ ve KİT takımlarda da yüzey kalitesinin artmasında önemli bir rol oynamıştır. Daha öncede ifade edildiği gibi Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri malzemenin sahip olduğu yüksek kimyasal reaktifliği [163] sebebiyle işleme esnasında kesici takıma sıvanma eğiliminin yüksek olmasıdır. Bu sıvanma, özellikle kuru kesme şartlarında ısının etkisiyle kesici takımın kesme kenarında oluşarak kesici ağız gibi davranmakta bu da yüzey kalitesinin düşmesinde etkin bir unsur olmaktadır. Ancak soğutma sıvısı kullanımı bu oluşumu minimize ederek hem kesici takımın etkinliğini arttırmakta hem de yüzey pürüzlüğünü azaltmaktadır. Yapılan çalışmada bunu doğrulamaktadır.

7.4.4. Delik çaplarının değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların delik çapları bakımından değerlendirilmesi

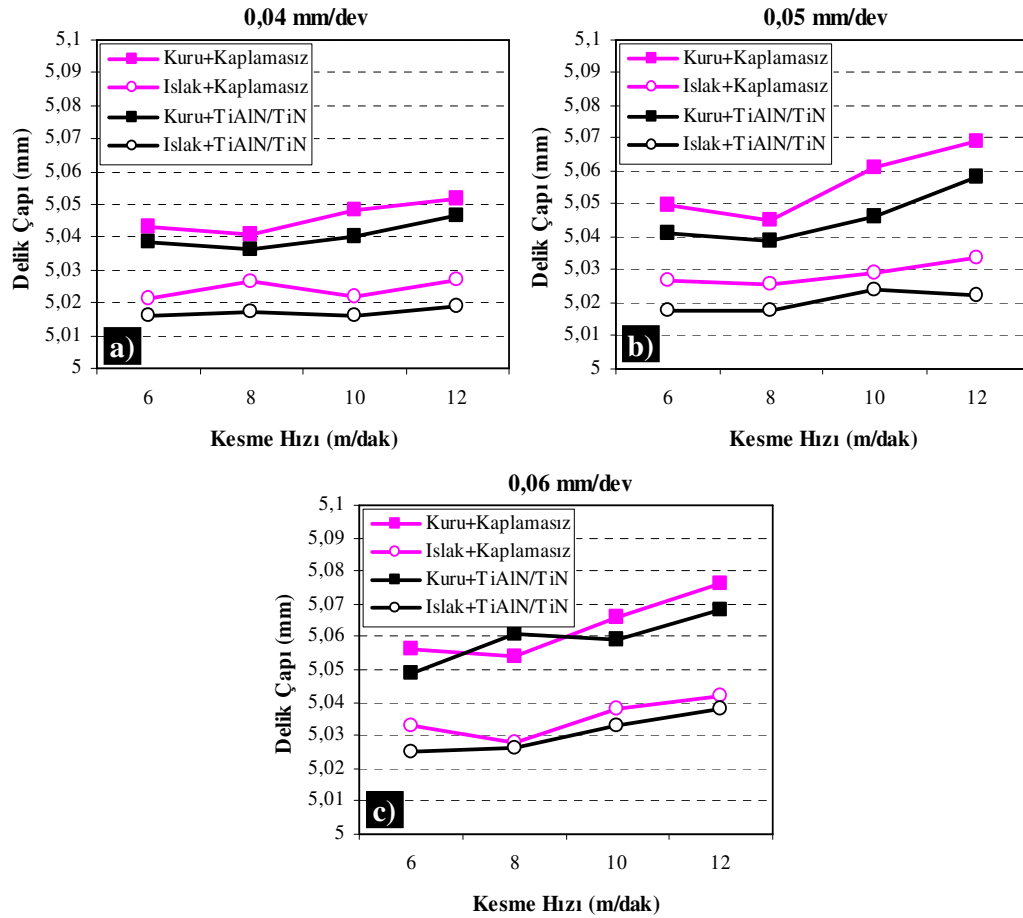
Talaşlı imalatla, delme işlemlerinde arzu edilen delik kalitesinin elde edilmesi en önemli hususlardan birisidir. Matkap ile doğrudan delinmiş bir delikte, delik çapının istenen toleranslar dâhilinde ölçü tamlığını sağlamak oldukça güçtür. İstenilen ölçü tamlığını sağlamak maksadıyla genellikle delik büyütme ve raybalama gibi ikincil işlemler yaygın olarak uygulanmaktadır [164]. Ancak ikinci bir işlem gereksinimi kuşkusuz işleme maliyetini arttırarak ürün maliyeti üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmaktadır. Bu sebepten deliğin istenilen ölçü tamlığı bakımından bir defada üretilmesi son derece önemlidir. İmalattan yüksek hassasiyet beklentilerinin havacılık ve uzay endüstrisindeki önemi düşünülürse [165], bu alanda yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde istenilen ölçü tamlığının elde edilmesinin önemi bir kez daha anlaşılmaktadır.

Şekil 7.23'te kesme şartlarına ve parametrelerine bağlı olarak iki farklı takım ile delinen deliklerden elde edilen çap değerlerindeki değişimler görülmektedir. Bütün kesme parametrelerinde delik çap değerlerinin anma çapından (5mm) daha büyük olduğu görülmüştür. Bazı parametrelerde sapmalar olmakla birlikte, kesme hızındaki artışla 8 m/dak kesme hızına kadar delik çapları bir miktar azalmış ancak bu kesme hızından sonra belirgin bir şekilde artış eğilimi göstermiştir. 8 m/dak kesme hızına kadar delik çaplarındaki sapma miktarında (anma çapından sapma) %0-18 arasında değişen değerlerde azalma kaydedilirken bu kesme hızından sonra %48'lere varan artışlar görülmüştür. Kesme hızındaki artışın titreşimi arttırmada önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Delme esnasında artan titreşimler ise delik kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir [166]. Ayrıca yüksek kesme hızlarında artan takım sıcaklıkları da delik kalitesini olumsuz yönde etkileyen önemli bir diğer etkidir. Nitekim yapılan çalışmada belli bir değerden sonra kesme hızındaki artışın delik çaplarını arttırdığı görülmüştür. Anma çapına en yakın çap değeri 5,016 mm olup bu değer TiAlN/TiN kaplı takım ile 0,04 mm/dev ilerlemede 8 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. En büyük delik çap değeri ise 5,076 mm olup kaplamasız takım ile 0,06 mm/dev ilerleme ve 12 m/dak kesme hızında elde edilmiştir.

İlerleme hızındaki değişimin delik çaplarının değişimi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Genellikle artan ilerleme hızları ile delik çapları artış eğilimi göstermiştir. İlerleme hızı ile artan kesme kuvvetlerinin kesici takım üzerindeki eksenel yükleri artırarak delik çapının genişlemesine neden olduğu düşünülmektedir [31]. 0,04 mm/dev ilerlemede 0,016-0,052 mm arasında değişim gösteren çaptan sapma değerleri ilerleme hızının %50 artırılması ile 0,06 mm/dev ilerleme hızında %198'lere ulaşan oranlarda artış göstererek 0,025-0,076 mm değerlerine ulaşmıştır. Bu yüzdelik değerler göz önüne alındığında yapılan çalışmada delik çaplarının değişimi üzerinde ilerlemenin kesme hızından daha etkili bir parametre olduğunu söylemek mümkündür.

Kesme kuvvetleri ve momentte olduğu gibi delik çapları üzerinde de çok katlı TiAlN/TiN kaplamanın olumlu etkilerini görmek mümkündür. Hemen hemen tüm kesme parametrelerinde, anma çapına en yakın çap değerleri çok katlı TiAlN/TiN

kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. TiAlN/TiN kaplama delik çapından sapma değerlerinde %53'lere varan azalmalar sağlamıştır. Bu durum, kaplama malzemesinin takımın aşınma direncini arttırmasının sonucu olarak kesici ağızlardaki düşük aşınmaya atfedilebilir. Ayrıca, sahip olduğu düşük sürtünme katsayısı ile talaş tahliyesini kolaylaştırmasında deliğin çaptan sapma değerlerinin azalması üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Kaplamalı ve kaplamasız takımla delinen delikler arasındaki en büyük çap farkı, kuru kesme şartlarında 0,05 mm/dev ilerleme hızında delinen deliklerden elde edilmiştir. Ayrıca yüksek kesme hızlarında bu farkın arttığı görülmüştür.



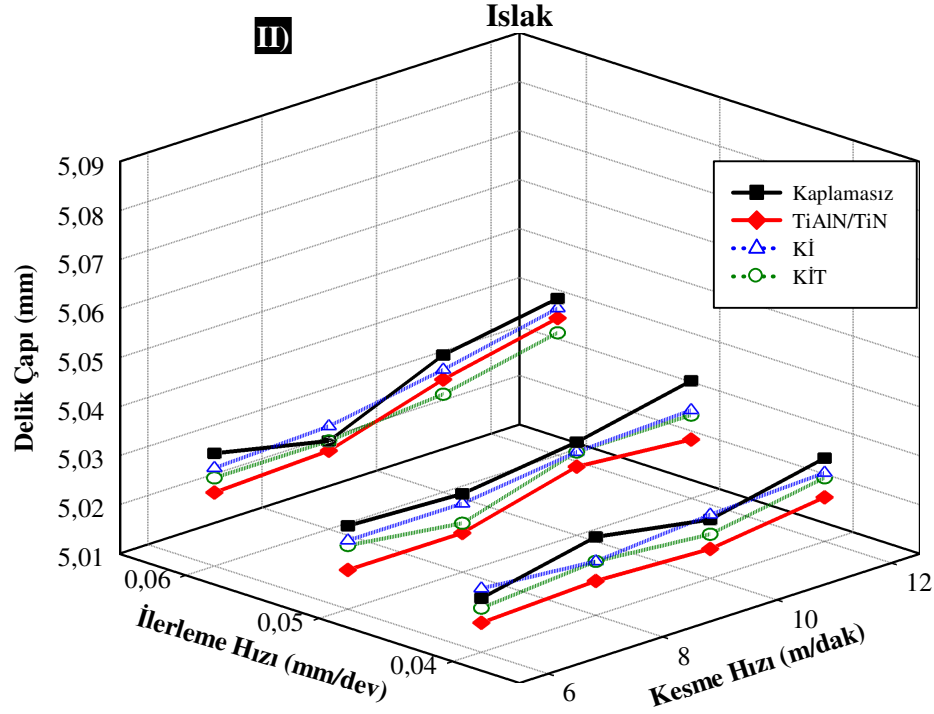
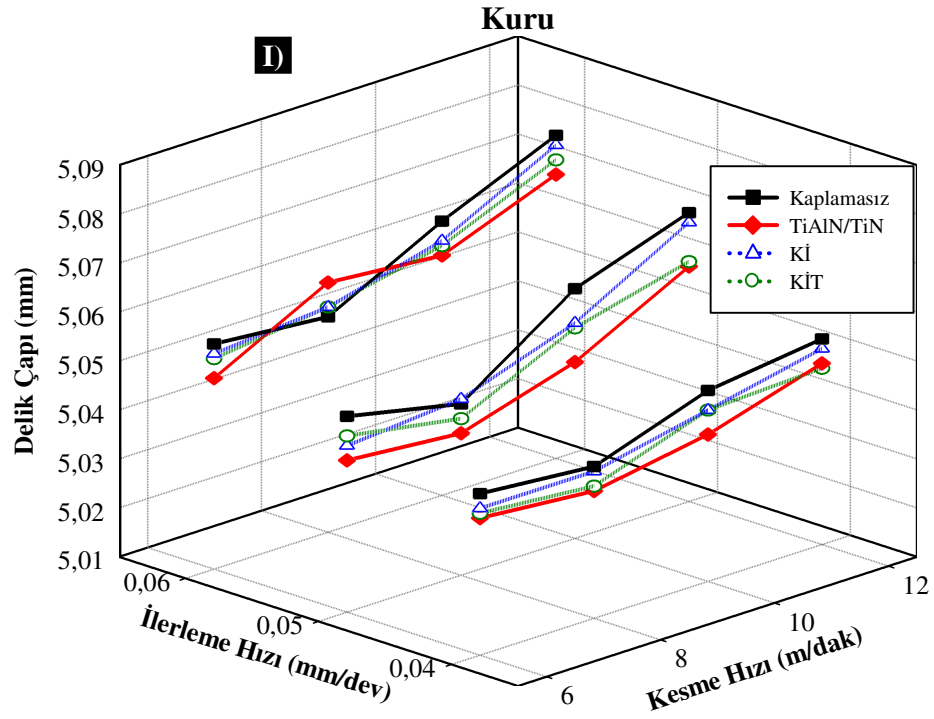
Şekil 7.23. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki farklı takımla delinen deliklerin çaplarındaki değişimler

a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev

Yüzey pürüzlülüğünün azalmasında büyük etkiye sahip olan ıslak kesme şartlarının anma çapına yakın delik çaplarının elde edilmesinde benzer etkiye sahip olduğu görülmüştür. Anma çapına en yakın çap değerlerinin her iki takım da ıslak kesme şartlarında elde edilmiş olması ve kuru kesme şartlarına göre ciddi bir iyileşme olması bunun en belirgin göstergesidir. Islak kesme şartları deliğin çaptan sapma değerlerinde, kuru kesme şartlarına göre %58-218 arasında değişen oranlarda ciddi bir azalma sağlamıştır. Grafiklerdeki eğilim çizgilerinden bu oranlardaki farklar açık bir şekilde görülebilir (Şekil 7.23). Islak kesme şartları deliğin çaptan sapma değerlerinde kaplama malzemesinin sağladığı azalmanın 4 katından daha fazla bir azalma sağladığı görülmüştür. Bu azalmanın ıslak kesme şartlarında talaşların kesme bölgesinden uzaklaştırılması ve YT oluşumunun azalmasına bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların delik çapları bakımından değerlendirilmesi

Matkap ile delme işlemlerinde delinen deliğin çapını etkileyen birçok parametre ve değişken vardır. Bu değişkenlerden biri olan takım aşınması, delik çapının istenilen toleransların dışına çıkmasına yol açmaktadır. Özellikle işlenmesi zor malzemelerde belli delik sayısından sonra takım aşınmasının etkisiyle delik çapı kontrolü zorlaşmaktadır. Kriyojenik işlemin delik çapları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla HSS takımlarla yapılan delme deneyleri sonucunda dört takım arasında, kesme şartlarına ve parametrelerine bağlı olarak elde edilen delik çaplarındaki değişimler Şekil 7.24'te verilmiştir. Genel olarak kriyojenik işlem ve temperleme işleminin kesme kuvvetleri, moment ve yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi delik çapları üzerinde de olumlu etkilere sahip olduğu görülmüştür. Hemen hemen tüm kesme parametrelerinde kaplamasız takımlara göre Kİ ve KİT takımlarla anma çapına daha yakın çap değerleri elde edilmiştir. Bunda en büyük paya kriyojenik işlem ve temperleme işleminin takımların aşınma direncinde sağladığı artışın sahip olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.24. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak delik çaplarındaki değişim

I) Kuru kesme, II) Islak kesme

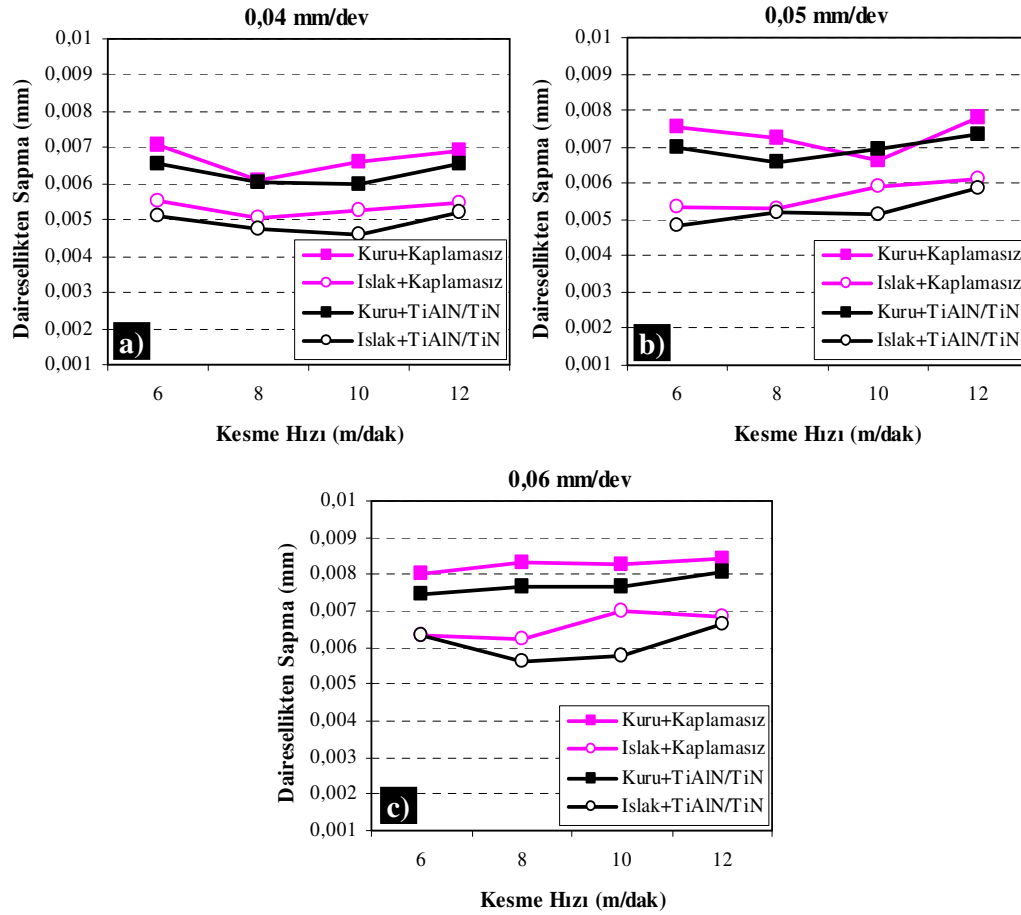
Kriyojenik işlem delik çaplarından sapma değerlerinde %25'i bulan düşüşler sağlamıştır. Ancak kriyojenik işlem ve temperleme işlemi diğer deney çıktılarında olduğu gibi delik çaplarında da TiAlN/TiN kaplamanın gösterdiği performansı gösterememiştir. Kİ ve KİT takımların aşınma direncindeki artış soğutma sıvısının kullanımı ile daha etkin hale gelmiştir. Bunun sonucu olarakta kuru kesme şartlarına göre ıslak kesme şartlarında Kİ ve KİT takımlarla delinen deliklerin çaptan sapma değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Genel olarak Kİ takımlara göre KİT takımlarla delinen deliklerin çap değerlerinin anma çapına daha yakın olduğu söylenebilir. Sonuç olarak anma çapına yakın çap değerlerinin elde edilmesinde kriyojenik işlem ve temperleme işlemi işlemsiz takımlara üstünlük sağlarken delik çaplarının değişimi üzerinde en etkili unsurun soğutma sıvısı kullanımının olduğu tespit edilmiştir.

7.4.5. Dairesellikten sapmanın değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların daireellikten sapma bakımından değerlendirilmesi

Şekil 7.25'te farklı kesme şartlarında kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak iki farklı takım ile delinen deliklerin daireellikten sapma değerlerindeki değişimler görülmektedir. Genel itibariyle daireellikten sapma değerlerinin mikron mertebesinde olduğu kesme şartlarına, kesme parametrelerine ve kaplama malzemesine bağlı olarak çok büyük değişimlerin olmadığı görülmüştür. Kesme hızındaki artışla daireellikten sapma değerleri özellikle düşük ilerleme hızlarında (0,04-0,05 mm/dev) 8 m/dak kesme hızına kadar azalma eğilimi göstermiştir. Bu kesme hızından sonra ise bir miktar artış görülmüştür. Bu durum yüksek kesme hızlarında kesici takım üzerine gelen yüklerin artmasına bağlı olarak artan titreşimlerin deliğin daireelliğinin bozulmasına neden olması şeklinde izah edilebilir [35, 166]. Özellikle kuru kesme şartlarında 0,06 mm/dev ilerleme hızında daha ilk kesme hızından itibaren daireellikten sapma değerlerinin artması dikkat çekicidir. Bu artışın takım aşınmasının deliğin daireelliğini olumsuz yönde etkilemesinden kaynaklandığı söylenebilir. Kesme hızındaki artış 8 m/dak kesme hızına kadar

dairesellikten sapma değerlerinde %12'lere varan azalma sağlarken bu değerden sonra ise artan kesme hızları %15'lere varan artışlara sebep olmuştur. Kesme hızındaki değişimin delik çapları üzerindeki etkisi kadar deliğin daireselliği üzerinde etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.25. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki dairesellikten sapma değerlerindeki değişimler
a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev

İlerleme hızının diğer deney çıktılarında olduğu gibi deliğin daireselliği üzerinde de ön plana çıkan bir parametre olduğu görülmüştür. Artan ilerleme hızları dairesellikten sapma değerlerinin artmasına neden olmuştur. Artan ilerleme hızı delme esnasındaki kesme kuvvetlerini arttırarak tezgâh ana milinin yaylanmasına neden olmakta bu da deliklerin oval çıkmasına sebep olmaktadır [35, 166]. Deneylerde kullanılan matkap çapının küçük olması ve tezgâh gücünün yeterli olması bu yaylanmayı minimize etmektedir. Ancak küçük değerlerde de olsa bir

miktar yaylanma kesme şartlarını olumsuz etkileyecektir. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 0,0046-0,0071 mm aralığında olan dairesellikten sapma değerleri, 0,05 mm/dev ilerleme hızında 0,006-0,0085 mm aralığına, 0,06 mm/dev ilerleme hızında ise 0,0067-0,0097 mm aralığına ulaşmıştır. Dolayısıyla ilerleme hızında %50 lik bir artış dairesellikten sapma değerlerinde %50'lere ulaşan artışlara sebep olmuştur. En düşük dairesellikten sapma değeri 0,0046 mm olup bu değer en düşük ilerleme hızı olan 0,04 mm/dev'de 10 m/dak kesme hızında çok katlı TiAlN/TiN kaplı takım ile delinen delikten elde edilmiştir.

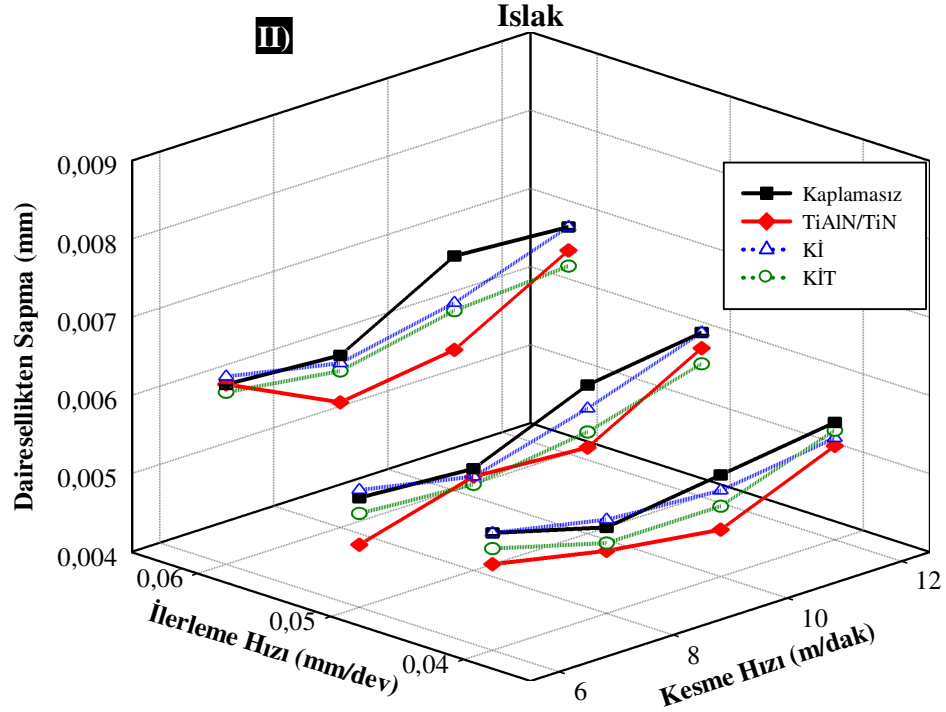
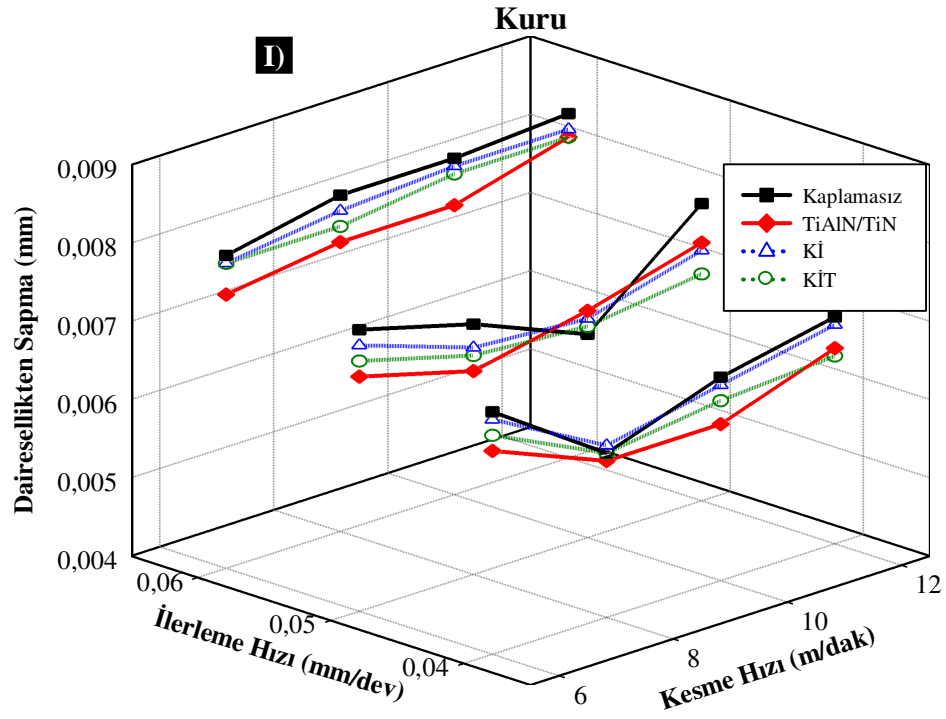
Genel olarak kaplamasız ve kaplamalı takım ile elde edilen dairesellikten sapma değerlerinin birbirine yakın olduğu ancak yüksek kesme hızı-ilerleme kombinasyonlarında belirgin bir farkın olduğu görülmüştür. Bu durum yüksek kesme hızı ve ilerleme kombinasyonlarında kesici takım üzerine gelen yüklerin artmasına bağlı olarak ağırlaşan kesme şartlarına atfedilebilir. Çok katlı TiAlN/TiN kaplı takımın sahip olduğu özelliklerden dolayı bu ağır kesme şartlarına daha uzun süre dayanacağı düşünülürse olumlu etkilerinin de bu şartlarda görülmesi beklenen bir durumdur. İki takım arasındaki en büyük dairesellikten sapma farkı ıslak kesme şartlarında 0,06 mm/dev ilerleme ve 10 m/dak kesme hızında elde edilmiş olup kaplamalı takım kaplamasız takıma göre dairesellikten sapma değerlerinde %18 azalma sağlamıştır.

Soğutma sıvısı kullanımının delik çapları üzerinde olduğu gibi deliğin daireselliği üzerinde de ciddi iyileşmeler sağladığı görülmüştür. Kuru kesme şartlarına göre ıslak kesme şartları, kesme parametreleri ve kaplama malzemesine göre değişmekle birlikte deliğin dairesellikten sapma değerleri üzerinde %28'lere varan azalma sağlamıştır. Kapalı bir alanda gerçekleşen delme işleminde talaş tahliyesi en büyük problemlerden birini oluşturmaktadır. Isı iletim katsayısı düşük olan Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılamaması ise kesme bölgesindeki sıcaklıkları önemli ölçüde arttırmaktadır. Kesme bölgesindeki talaşın varlığı ve oluşan yüksek sıcaklıklar kesme olayını olumsuz yönde etkileyerek deliğin kalitesini düşürmektedir [35]. Ancak soğutma sıvısı kullanımının kesme bölgesinden

talaşın tahliye edilmesi ve kesme sıcaklıklarının düşürülmesinde etkili olduğu bunun sonucunda da delik kalitesinde önemli iyileşmeler sağladığı görülmüştür.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların dairesellikten sapma bakımından değerlendirilmesi

Kaplamalı ve kaplamasız takımlarla Kİ ve KİT takımların dairesellikten sapma değerleri bakımından mukayese edildiği grafikler Şekil 7.26'da verilmiştir. Grafiklere bakıldığında dairesellikten sapma değerlerinin mikron düzeyinde olduğu ve kesici takımlara, kesme parametrelerine ve kesme şartlarına bağlı olarak çok büyük değişimlerin olmadığı görülmektedir. Ancak küçük de olsa genel olarak Kİ ve KİT takımlar işlemsiz takımlara göre dairesellikten sapma değerlerinin daha düşük olmasını sağlamıştır. Dairesellikten sapma değerleri bakımından işlemsiz takımlara göre Kİ takımlarla %9 KİT takımlarla ise %13'ü bulan düşüşler elde edilmiştir. Bu düşüşlere deliğin daireselliğini olumsuz yönde etkileyen BUE oluşumu, takım aşınması gibi olumsuzlukların kriyojenik işlem ve temperleme işlemi ile azalmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Nitekim Bölüm 7.3.1'de kuru kesme şartlarında işlemsiz takımlara göre Kİ ve KİT takımlardaki BUE oluşumunun daha az olması (Bkz. Şekil 7.6) ve yine ıslak kesme şartlarında aşınmanın işlemsiz takımlara göre dış köşe aşınması yerine kesme kenarı boyunca daha düzenli bir oluşum sergilemesi (Bkz. Şekil 7.8) dairesellikten sapma değerlerindeki bu düşüşleri açıklamaktadır. Diğer deney çıktılarında olduğu gibi dairesellikten sapma değerlerinde de Kİ ve KİT takımlar benzer özellikler sergilemiştir. Kuru kesme şartlarında işlemsiz takımlara göre Kİ ve KİT takımlarla elde edilen dairesellikten sapma değerlerindeki düşüşe benzer düşüşler ıslak kesme şartlarında da elde edilmiştir. Ancak soğutma sıvısı kullanımının diğer takımlarda olduğu gibi Kİ ve KİT takımlarda da dairesellikten sapma değerlerinde önemli düşüşler sağladığı görülmüştür. Dört takım arasında en düşük dairesellikten sapma değerleri TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. Kİ ve KİT takımlar deliğin daireselliği üzerinde kaplamalı takımların gösterdiği performansı gösterememiştir. Ancak kaplamasız takıma göre önemli iyileşmeler kaydetmişlerdir. Çok katlı kaplamanın sahip olduğu özellikler dairesellikten sapma değerlerinin düşmesinde etkin rol oynamıştır.



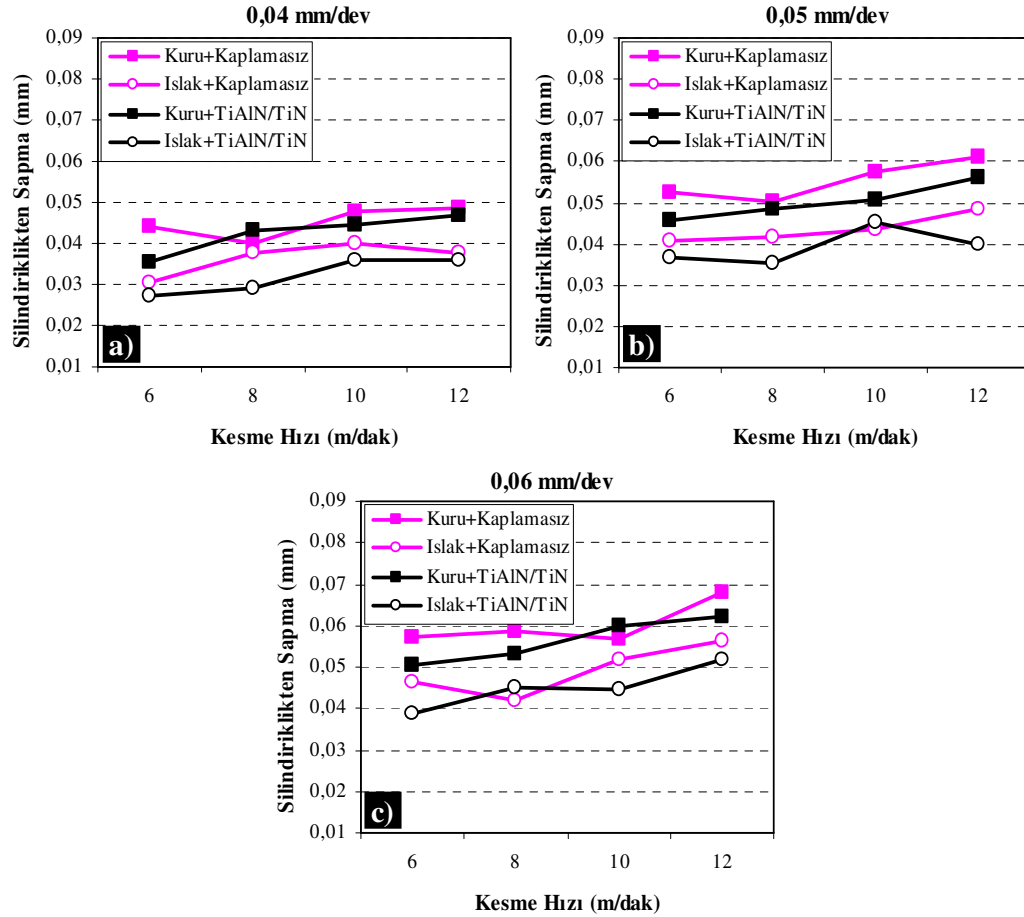
Şekil 7.26. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak dairesellikten sapmadaki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

7.4.6. Silindiriklikten sapmanın (Eksenel kaçıklık) değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların silindiriklikten sapma bakımından değerlendirilmesi

Bir deliğin geometrik toleransları değerlendirilirken delik çap ve daireselliğinin yanısıra, deliğin silindirikliği de önem taşımaktadır. Özellikle delik boyunun delik çapına oranının (L/D) büyük olduğu uygulamalarda bu kriter daha önemli olmaktadır. Şekil 7.27'deki grafikler kesme şartlarına, kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak iki takım arasındaki silindiriklikten sapma değerlerindeki değişimleri göstermektedir. Grafiklere bakıldığında kesme hızındaki artışla silindiriklikten sapma değerlerinin arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Artan kesme hızı, delik çap ve daireselliğinde olduğu gibi deliğin silindirikliğini de olumsuz yönde etkilemiştir. Kesme hızının 6 m/dak'dan %100'lük artışla 12 m/dak kesme hızına ulaşmasıyla silindiriklikten sapma değerlerinin %40'lara varan oranlarda arttığı tespit edilmiştir. En büyük silindiriklikten sapma değeri 0,068 mm olup bu değer kaplamasız takımla kuru kesme şartlarında en yüksek kesme ve ilerleme hızında elde edilmiştir.

Aynı kesme hızı değerleri için artan ilerlemelerin silindiriklikten sapma değerlerini bir miktar arttırdığı görülmüştür. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 0,0273-0,0486 mm aralığında olan silindiriklikten sapma değerleri 0,06 mm/dev ilerleme hızında 0,0388-0,068 mm aralığına yükselmiştir. İlerleme hızındaki %50'lik artışa karşılık silindiriklikten sapma değerlerinde %50'lerin üstünde artışlar kaydedilmiştir. Bu da silindirikliğin bozulması üzerinde ilerleme hızının önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Özgül kesme direnci yüksek olan Ti-6Al-4V alaşımının delinmesi esnasında yüksek ilerleme hızları büyük eksenel kuvvetlere sebep olmaktadır [152]. Tezgâh ana mili üzerinde bir basınç oluşturan eksenel kuvvetin büyümesi ise ana mildeki sehimin artmasına neden olmakta bu da eksenel kaçıklığın büyümesine sebep olmaktadır. Islak kesme şartlarından ziyade kuru kesme şartlarında, ilerleme hızındaki artışın silindiriklikten sapma üzerinde daha etkili olduğu tespit edilmiştir.



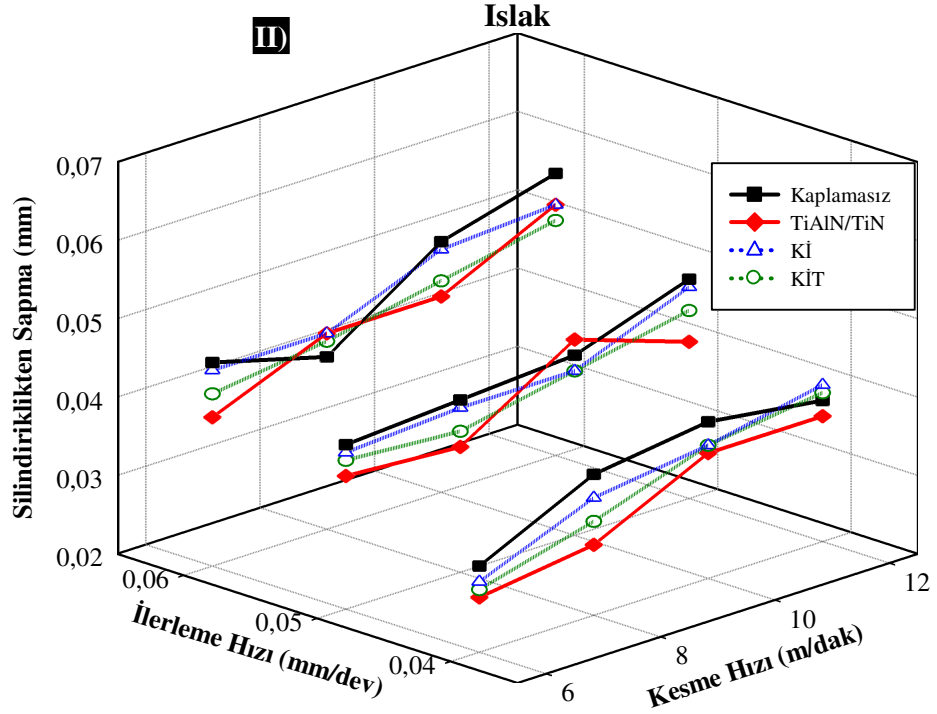
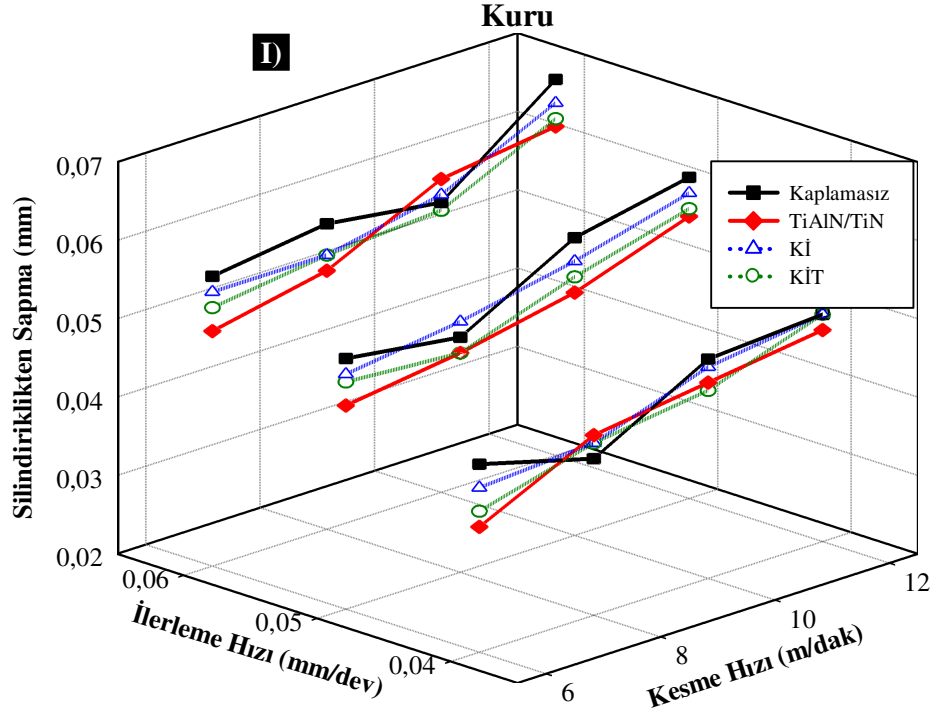
Şekil 7.27. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki silindiriklikten sapma değerlerindeki değişimler
a) 0,04 mm/dev b) 0,05 mm/dev c) 0,06 mm/dev

Kaplamalı ve kaplamasız takım ile delinen deliklerden elde edilen silindiriklikten sapma değerleri birbirine yakın olmakla birlikte istisnai durumlar hariç kaplamalı takımlarla daha düşük silindiriklikten sapma değerlerinin elde edildiği söylenebilir. Çok katlı TiAlN/TiN kaplama silindiriklikten sapma değerlerinde %30'lara kadar düşüşler sağlamıştır. Düşük sürtünme katsayısı sebebiyle kolaylaşan talaş tahliyesinin talaş sıkışmasını ve radyal kuvvetin büyümesini engellediği düşünülmektedir. Kaplamalı takım ile kaplamasız takım arasındaki en büyük silindiriklikten sapma farkı 0,04 mm/dev ilerlemede 8 m/dak kesme hızında elde edilmiştir.

Delik kalitesini tanımlayan diğer deney çıktılarında olduğu gibi silindiriklik üzerinde de ıslak kesme şartlarının önemli iyileşmeler sağladığı görülmüştür. İstisnasız test edilen bütün kesme parametrelerinde her iki takım içinde en düşük silindiriklikten sapma değerleri ıslak kesme şartlarında elde edilmiştir. Islak kesme şartları kuru kesme şartlarına göre silindiriklikten sapma değerlerinde %60'lara varan oranlarda düşüşler sağlamıştır. Delme işlemlerinde deliğin kalitesini belirleyen en önemli unsurlardan birinin talaş tahliyesi olduğu düşünülürse kesme sıvısının talaş tahliyesini kolaylaştırarak delik kalitesinin artması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Literatürde yapılan delme çalışmalarında termal bozulmaların deliğin silindirikliğini olumsuz yönde etkilediği ifade edilmektedir [167]. Özellikle Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde bunun ön plana çıkan bir etken olduğu söylenebilir. Soğutma sıvısı kullanımının ise termal bozulmalara sebep olan sıcaklıkları önemli ölçüde düşürmesinin deliğin silindirikliğinin iyileşmesini sağladığı düşünülmektedir.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların silindiriklikten sapma bakımından değerlendirilmesi

Kesme parametrelerine ve kesme şartlarına bağlı olarak kaplamasız, Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerin silindiriklikten sapma değerlerindeki değişimler Şekil 7.28'de verilmiştir. Dört takımda da kesme parametrelerine göre silindiriklikten sapma değerleri benzer eğilimler göstermiştir. Daha önce kesme parametrelerinin deliğin silindirikliği üzerindeki etkilerinin irdelenmiş olması sebebiyle bu kısımda parametrelerin etkilerine değinilmemiştir. Diğer deney çıktılarında (kesme kuvvetleri, delik çapları vb) olduğu gibi silindiriklikten sapma değerlerinde de kaplamasız takımlara göre Kİ ve KİT takımların olumlu yönde etkilerinin olduğu görülmüştür. Bu etkiye kriyojenik işlem ve temperleme işleminin takımların aşınma direncinde meydana getirdiği artışa bağlı olarak, delme esnasında takım aşınması sebebiyle oluşacak eksenel kaçıklığı minimize etmesinin etkili olduğuna inanılmaktadır.



Şekil 7.28. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak silindiriklikten sapmadaki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

Silindiriklikten sapma değerlerin de kaplamasız takıma göre Kİ ve KİT takımlar sırasıyla, kuru kesme şartlarında %8, %17 ıslak kesme şartlarında ise %10, %20'yi bulan düşüşler sağlamıştır. Buradan yola çıkılarak ıslak kesme şartlarının Kİ ve KİT takımların işleme performansını daha da arttırdığı söylenilebilir. Bu performans artışına soğutma sıvısının takımların aşınma direncinde sağladığı artışla birlikte delik kalitesini olumsuz yönde etkileyen kesme bölgesindeki talaşların tahliyesini kolaylaştırmasının sebep olduğuna inanılmaktadır. Hem ıslak hem de kuru kesme şartlarında en düşük silindiriklikten sapma değerleri TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. Çok katlı kaplamanın M42 HSS takımların performansını önemli ölçüde arttırarak tüm işleme çıktıları üzerinde olumlu etkiler göstermesini sağlamıştır.

7.5. Tungsten Karbür Matkaplar

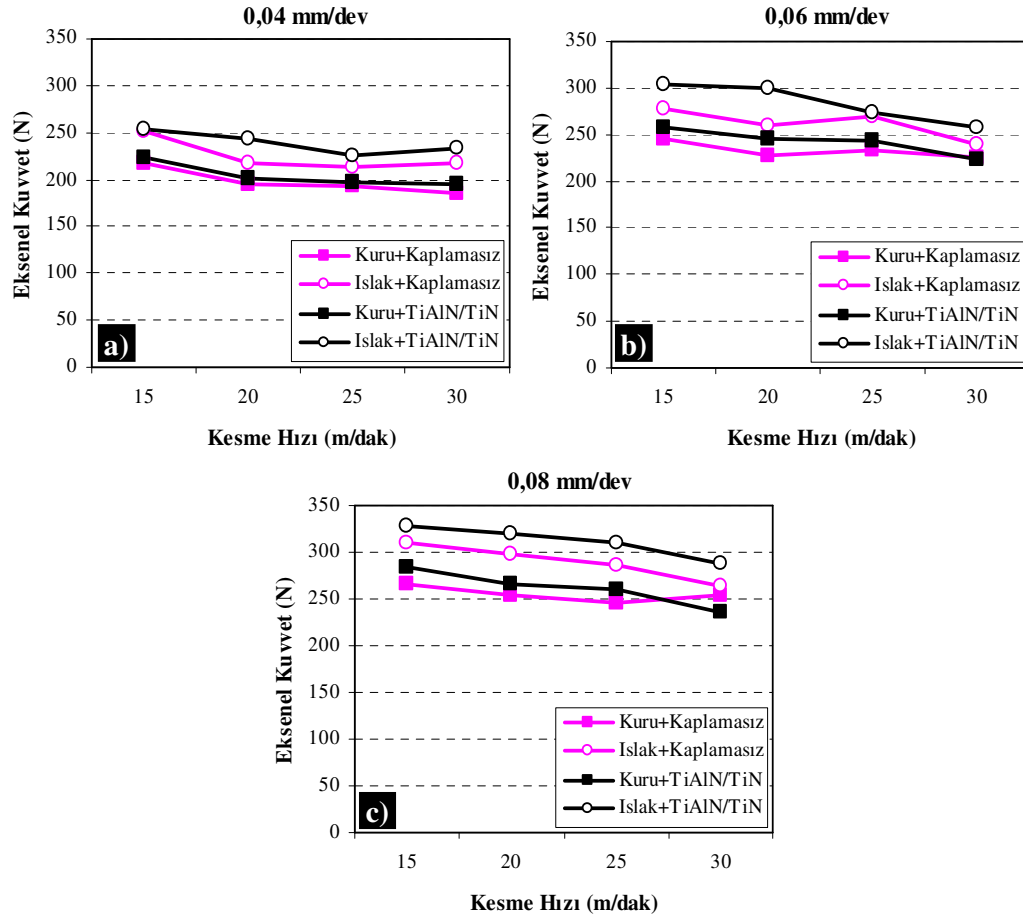
Bu bölümde tungsten karbür matkaplarla Çizelge 6.12'de belirtilen II. ve III. deney girdi parametrelerine bağlı olarak elde edilen II. deney çıktıları (ilerleme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülüğü vb.) ayrı ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir. II. deney çıktılarının her biri değerlendirilirken önce kaplamasız takımlarla kaplamalı takımlar mukayese edilmiş daha sonra ise Kİ ve KİT takımların bu takımlarla mukayesesi yapılmıştır. Deney çıktılarının değerlendirilmesinde, deney takrarları sonucu elde edilen ölçümlerin ortalamaları dikkate alınmıştır.

7.5.1. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların kesme kuvvetleri bakımından değerlendirilmesi

Şekil 7.29'daki grafikler karbür matkaplarla yapılan delme işlemlerinde kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak elde edilen kesme kuvveti değişimlerini göstermektedir. Artan kesme hızı, M42 HSS matkaplarda olduğu gibi karbür matkaplarda da kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olmuştur. Özellikle yüksek ilerlemelerde (0,08 mm/dev) kesme hızındaki artışın kesme kuvvetlerini düşürmede daha etkili olduğu görülmüştür. Kesme hızındaki %100'lük artışa karşılık kesme kuvvetlerinde

%20'lere varan düşüşler kaydedilmiştir. Bu durum M42 HSS matkaplarda ifade edildiği gibi artan sıcaklıkların malzemenin akma mukavemetini bir miktarda olsa düşürmesine atfedilmiştir [148-149].



Şekil 7.29. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki eksenel kuvvet değerlerindeki değişimler
a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev

İlerleme hızındaki artış her iki takımda da kesme kuvvetlerini belirgin bir şekilde arttırmıştır. Kesme kuvvetleri 0,04; 0,06 ve 0,08 mm/dev ilerlemelerde sırasıyla 186-253 N; 224-304 N; 237-328 N aralıklarında değişim göstermiştir. İlerleme hızındaki %100'lük artışa karşılık kesme kuvvetlerinde %3-33 arasında değişen artışlar kaydedilmiştir. M42 HSS matkaplarda olduğu gibi karbür matkaplarda da kesme hızından ziyade ilerleme hızındaki artışın kesme kuvvetleri üzerinde daha etkili

olduğu görülmüştür. Farklı kesme parametrelerinde test edilmelerine rağmen HSS matkaplarda ilerleme hızının kuvvetleri artırma etkisi karbür matkaplara göre daha yüksek olmuştur.

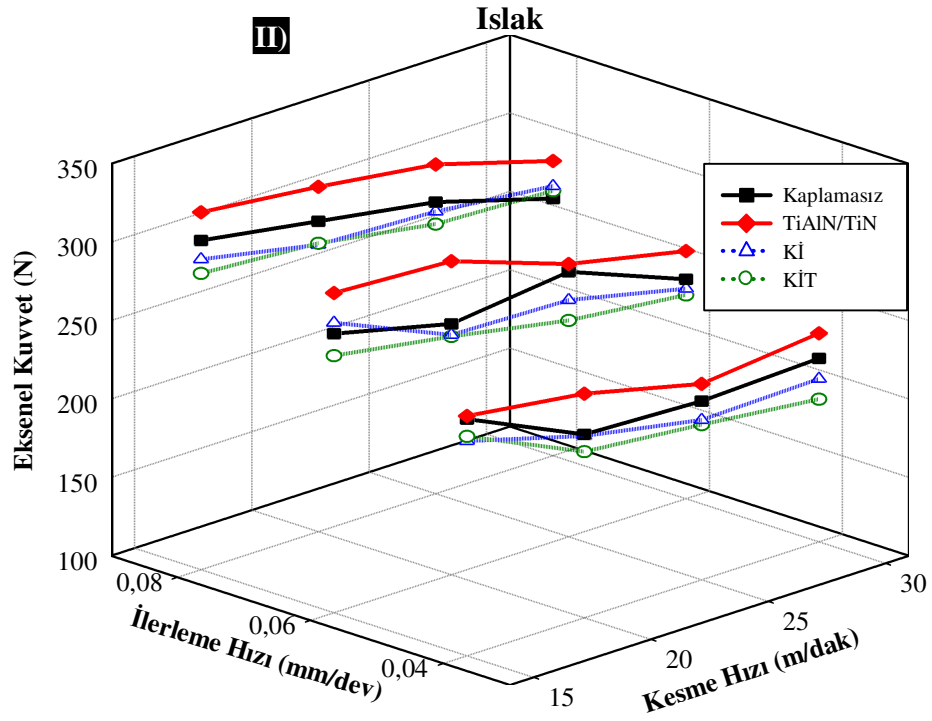
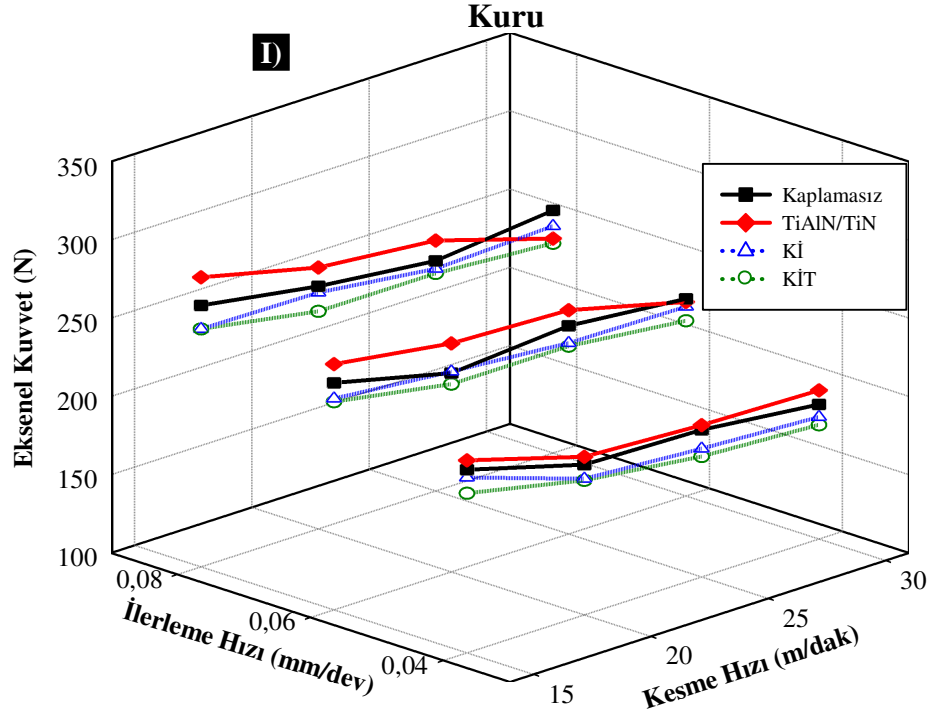
Kaplama uygulaması kuvvetler üzerinde çok fazla değişim meydana getirmemekle birlikte özellikle ıslak kesme şartlarında kuvvetlerin bir miktar artmasına sebep olduğu görülmüştür. HSS takımlarda çok katlı TiAlN/TiN kaplama malzemesi kesme kuvvetlerinde %14'e varan düşüşler sağlarken tungsten karbür takımlarda %12'lere varan artışlara yol açmıştır. Bu durum şu şekilde izah edilebilir. Matkabın talaş açısı kesici kenar boyunca değişmekte ve matkabın çevresinden merkeze doğru azalmaktadır. Matkabın hızının da çevreden merkeze doğru azalması nedeniyle kesme hızının sıfır olduğu merkez noktasında matkap ucu son derece verimsiz çalışmaktadır. Matkap merkezdeki malzemeyi kesmek yerine bastırıp ezerken talaş açısının negatif olduğu ve kesme hızının sıfıra yaklaştığı noktada bir plastik deformasyon oluşmaktadır. Bu basınç oldukça yüksek eksenel kuvvet bileşeninin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Radyal ağız nedeniyle ortaya çıkan elverişsiz çalışma koşullarının giderilmesi için radyal ağızda inceltme işlemi uygulanmakta ya da tamamen ortadan kaldırılmaktadır [35]. Deneylerde kullanılan her iki matkapta da radyal ağız tamamen ortadan kaldırılmıştır. Karbür takımlara uygulanan 6 katmanlı ve 4 µm kalınlığındaki TiAlN/TiN kaplamanın yukarıda bahsi geçen radyal ağızın bir miktar genişlemesine ve talaş açısının küçülmesine sebep olması sonucu kuvvetlerin arttığı düşünülmektedir. Aynı kaplama malzemesinin HSS takımlarda kuvvetlerde düşüş sağlaması ise kaplamanın kesici takım geometrisinde meydana getirdiği değişimden ziyade sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürmesi ve kızıl sertlikte sağladığı artışın daha etkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü HSS takımın sertliği ile uygulanan kaplamanın sertliği arasında ciddi bir fark vardır. Ancak karbür takımla uygulanan kaplamanın sertlik değerleri birbirine yakındır. Ayrıca kullanılan karbür ve HSS matkapların uç geometrileri ve uç açılarının farklı olması uygulanan kaplamanın her iki takımda da aynı etkiyi göstermemesinde etkili olabilir. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda ise titanyumun işlenmesinde karbür takımlar üzerine yapılan kaplamanın özellikle CVD kaplamaların takım performansını olumsuz yönde etkilediği [2-3] bazı çalışmalarda ise olumlu etkilerinin olduğu [168]

ifade edilmektedir. Yapılan literatür taramasında Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde matkaplar üzerine yapılan kaplamaların kesme kuvveti ve moment üzerindeki etkilerini ortaya koyan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak Srivastava ve arkadaşının yaptığı çalışmada Ti-6Al-4V alaşımın tornalanmasında karbür takımlar üzerine yapılan farklı kaplamaların kaplamasız takımlara göre daha yüksek kesme kuvveti değerleri verdiği tespit edilmiştir [169]. Islak kesme şartlarına göre kuru kesme şartlarında, kaplamalı ve kaplamasız takımlar arasındaki kuvvet farkının çok az olması ağırlaşan kesme şartlarında kaplamanın olumlu etkilerinin (düşük sürtüne katsayısı) görülmesi ile izah edilebilir.

Islak kesme şartlarında, HSS matkaplarda olduğu gibi karbür matkaplarda da kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. Bu durumun HSS matkaplarda ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi ıslak kesme şartlarının kesme bölgesindeki sıcaklıkları düşürerek malzemenin akma mukavemetini bir miktar arttırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Islak kesme şartları kesme kuvvetlerinde en fazla %21'lik bir artışa sebep olmuştur. HSS takımlarda bu oran %14'ler civarında kalmıştır. Bu durum karbür takımlarda kullanılan kesme hızı ve ilerleme değerlerinin daha yüksek olmasına bağlı olarak kesme bölgesinde daha yüksek sıcaklıkların oluşması ile izah edilebilir. Kesme bölgesindeki bu sıcaklıklar kuru kesme şartlarında malzemenin akma mukavemetinin daha fazla düşmesine sebep olarak bu farkı oluşturduğu düşünülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde artan kesme hızı ve ilerlemelerin kesme bölgesindeki sıcaklıkları arttırdığı ifade edilmektedir [92].

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların kesme kuvvetleri bakımından değerlendirilmesi

Daha önceki bölümde kaplamasız takımla TiAlN/TiN kaplı takım kesme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim bakımından mukayese edilmişti. Bu bölümde ise Kİ ve KİT takımların bu takımlarla mukayesi yapılmıştır. Dört takımın kesme parametrelerine ve kesme şartlarına bağlı olarak kesme kuvvetleri bakımından mukayese edildiği grafikler Şekil 7.30'da verilmiştir.



Şekil 7.30. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

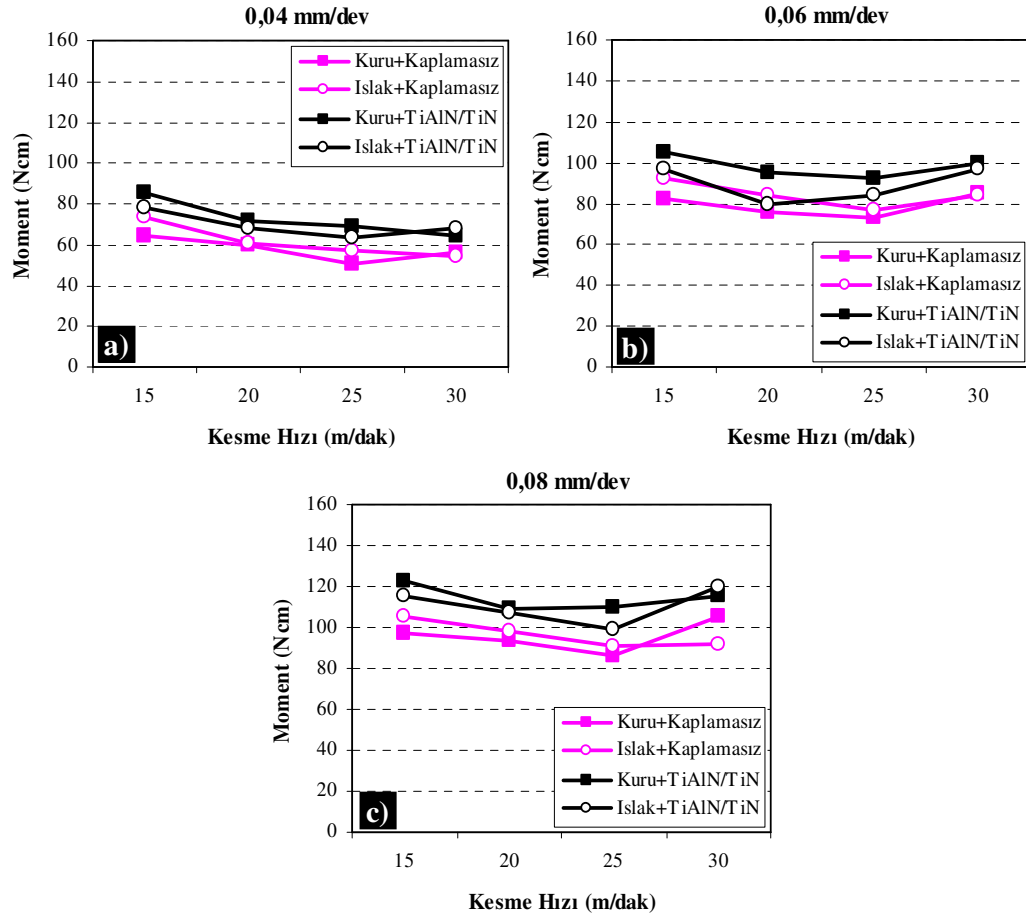
Grafiklere bakıldığında istisnai durumlar dışında kesme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvveti değişimleri dört takımda da paralellik göstermektedir. Daha önceki bölümde parametrelerin etkilerine detaylı bir şekilde değinilmiş olması sebebiyle bu bölümde kesme parametrelerinin kuvvetler üzerindeki etkisine değinilmemiştir. Dört takım arasında en düşük kesme kuvvetleri KİT takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. Bu takımı sırasıyla Kİ, işlemsiz ve TiAlN/TiN kaplı takımlar takip etmiştir. En yüksek kesme kuvveti değerlerinin TiAlN/TiN kaplı takımlarla elde edilme sebebi bir önceki bölümde izah edilmiştir. Kriyojenik işlem ve temperleme işleminin HSS takımlarda olduğu tungsten karbür takımlarda da kuvvetlerin düşmesi yönünde olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. İşlemsiz takıma göre Kİ takımlarla kesme kuvvetlerinde ortalama %3-4 düşüş kaydedilirken KİT takımlarla %6-7 arasında düşüşler elde edilmiştir. Bu oranlar yaklaşık olarak kuru ve ıslak kesme şartlarında birbirine yakın olmuştur. Yani ıslak kesme şartları kriyojenik işlem ile temperleme işleminin kuvvetleri düşürme etkisini çok fazla etkilememiştir. HSS takımlarda olduğu gibi tungsten karbür takımlarda da temperleme işlemi kriyojenik işleme göre az da olsa daha düşük kesme kuvvetleri elde edilmesini sağlamıştır. Kriyojenik işlemin sertlikte ve aşınma direncinde meydana getirdiği iyileşmenin kuvvetlerin düşmesi üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Yapılan takım aşınması ve takım ömrü deneyleri de bunu doğrulamaktadır. Islak kesme şartları diğer takımlarda olduğu gibi Kİ ve KİT takımlarda da kuvvetlerin bir miktar artmasına sebep olmuştur.

7.5.2. Momentlerin değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların moment bakımından değerlendirilmesi

Şekil 7.31’de karbür matkaplarla kaplama malzemesi, kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak elde edilen moment değerlerindeki değişimler görülmektedir. Tüm ilerleme hızlarında artan kesme hızları ile moment değerleri 25 m/dak kesme hızına kadar azalma eğilimi göstermiştir. Ancak bu kesme hızından sonra 0,04 mm/dev ilerleme hızında çok fazla değişim görülmezken 0,06 ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında artış eğilimi görülmüştür. Bu artışın yüksek kesme hızı-ilerleme

kombinasyonlarında kesici takım üzerine gelen yüklerin artmasına bağlı olarak takım-talaş arayüzündeki sürtünmenin artması sonucu gerçekleştiği düşünülmektedir [35]. Kesme hızındaki %100'lük artışlara karşılık moment değerlerinde %35'lere varan azalmalar kaydedilmiştir. En düşük moment değeri 51 Ncm olup bu değer kaplamasız takımla kuru kesme şartlarında 0,04 mm/dev ilerleme ve 25 m/dak kesme hızında elde edilmiştir.



Şekil 7.31. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki moment değerlerindeki değişimler
a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev

Kesme kuvvetlerinde olduğu gibi artan ilerleme hızı ile momentlerde belirgin bir artış görülmüştür. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 51-85 Ncm aralığında olan moment değerleri 0,06 ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla 73-105 ve 86-123 Ncm aralığında değişim göstermiştir. İlerleme hızındaki %100'lük artışa karşılık

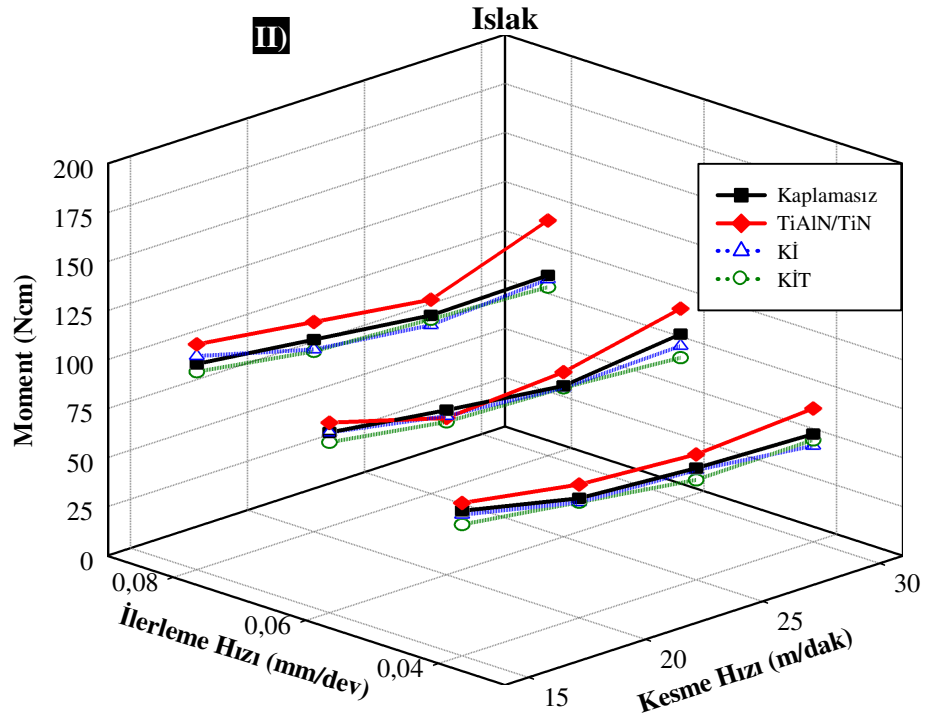
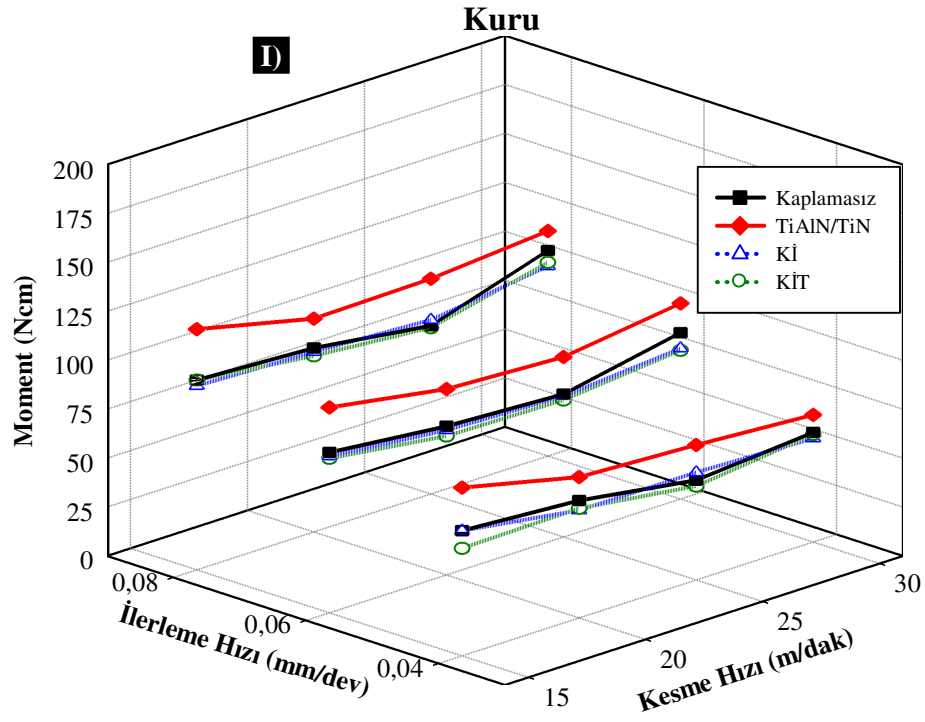
kaydedilen en büyük moment artışı %69 olmuştur. Buradan hareketle yapılan çalışmada karbür takımlar için momentlerin değişimi üzerinde kesme hızına göre ilerleme hızının daha etkili bir parametre olduğunu söylemek mümkündür.

Kesme kuvvetlerinde ifade edildiği gibi kaplama uygulamasının takım geometrisinde meydana getirdiği değişimin etkilerini momentler üzerinde de görmek mümkündür. Test edilen bütün kesme parametrelerinde TiAlN/TiN kaplı takımla elde edilen moment değerlerinin kaplamasız takımla elde edilenlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kaplamalı takımla kaplamasız takım arasındaki en büyük moment farkı 22 Ncm olup bu değer en düşük kesme ve ilerleme hızında elde edilmiştir.

Karbür takımlarda kuru ve ıslak kesme şartları moment üzerinde çok fazla değişim meydana getirmemekle birlikte, ıslak kesme şartlarında kaplamalı takımlarda momentin bir miktar düştüğü, kaplamasız takımlarda ise bir miktar arttığı görülmüştür. Kaplamasız takımlarda meydana gelen bu moment artışına, ıslak kesme şartlarında kesme bölgesindeki sıcaklıkların düşmesine bağlı olarak malzemenin akma mukavemetindeki artışın sebep olduğu düşünülmektedir. Aynı durumun kaplamalı takımlarda görülmemesi ise kaplamanın sahip olduğu katı yağlayıcı özelliği ile soğutma sıvısının yağlama özelliğinin birleşiminin takım-talaş arayüzeyindeki sürtünmeyi etkili bir şekilde azaltarak [42] momentlerde bir miktar düşüş sağladığına inanılmaktadır. Burada moment üzerinde soğutma sıvısının malzemenin akma mukavemetinde meydana getirdiği değişimden ziyade kaplama malzemesinin düşük sürtünme katsayısı ile yağlama özelliğinin daha etkili olduğu söylenebilir. Islak kesme şartları kaplamalı takımlarda kesme kuvvetlerini arttırırken momentleri düşürmesi, kesme kuvvetlerine göre momentin kesme bölgesindeki sürtünmeyi ve radyal yöndeki yükleri daha etkin bir şekilde ortaya koyduğunu göstermektedir. Aynı durumun HSS takımlarda görülmemesi ise karbür takımın sertliğinin HSS takıma göre çok daha yüksek olması ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip olması ile açıklanabilir. Sonuç olarak ıslak kesme şartları kaplamalı takımlarda moment değerlerinde %19'a ulaşan düşüşler sağlarken kaplamasız takımlarda %14'lere varan artışlara sebep olmuştur.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların moment bakımından değerlendirilmesi

Şekil 7.32’de kesme parametrelerine ve kesme şartlarına bağlı olarak işlemsiz, Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlarla delme esnasında ölçülen moment değerlerindeki değişimler görülmektedir. İşlemsiz, Kİ ve KİT takımlarla elde edilen moment değerleri birbirine çok yakın olmakla birlikte işlemsiz takımlara göre Kİ takımlarla momentlerde ortalama %3 civarı KİT takımlarla ise ortalama %6 civarı düşüşler elde edilmiştir. Islak kesme şartlarının kuru kesme şartlarına göre Kİ ve KİT takımlarla elde edilen moment değerlerinin düşmesinde küçükte olsa bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu düşüşte, soğutma sıvısının yağlama özelliğinin takım-talaş arayüzeyindeki sürtünmeyi bir miktar azaltmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda soğutma sıvısı kullanımı ile sıvanma eğiliminin azalmasında moment değerlerinin düşmesi üzerinde etkili olduğuna inanılmaktadır. Aşınma deneylerinde kuru kesme şartlarındaki sıvanma eğiliminin ıslak kesme şartlarına göre çok yüksek olması bunu doğrulamaktadır. Kesme kuvvetlerinde olduğu gibi en büyük moment değerleri TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. Buna yol açtığına inanılan muhtemel sebepler bölüm 7.5.1’de anlatılmıştır. Kriyojenik işlem ve temperleme işleminin kesme kuvvetlerinde sağladığı düşüşe paralel olarak momentler üzerinde de oransal bazda benzer düşüşler sağladığı tespit edilmiştir. Kİ ve KİT takımlar momentlerin değişimi üzerinde benzer özellikler sergilemiştir.



Şekil 7.32. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak momentlerdeki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

7.5.3. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

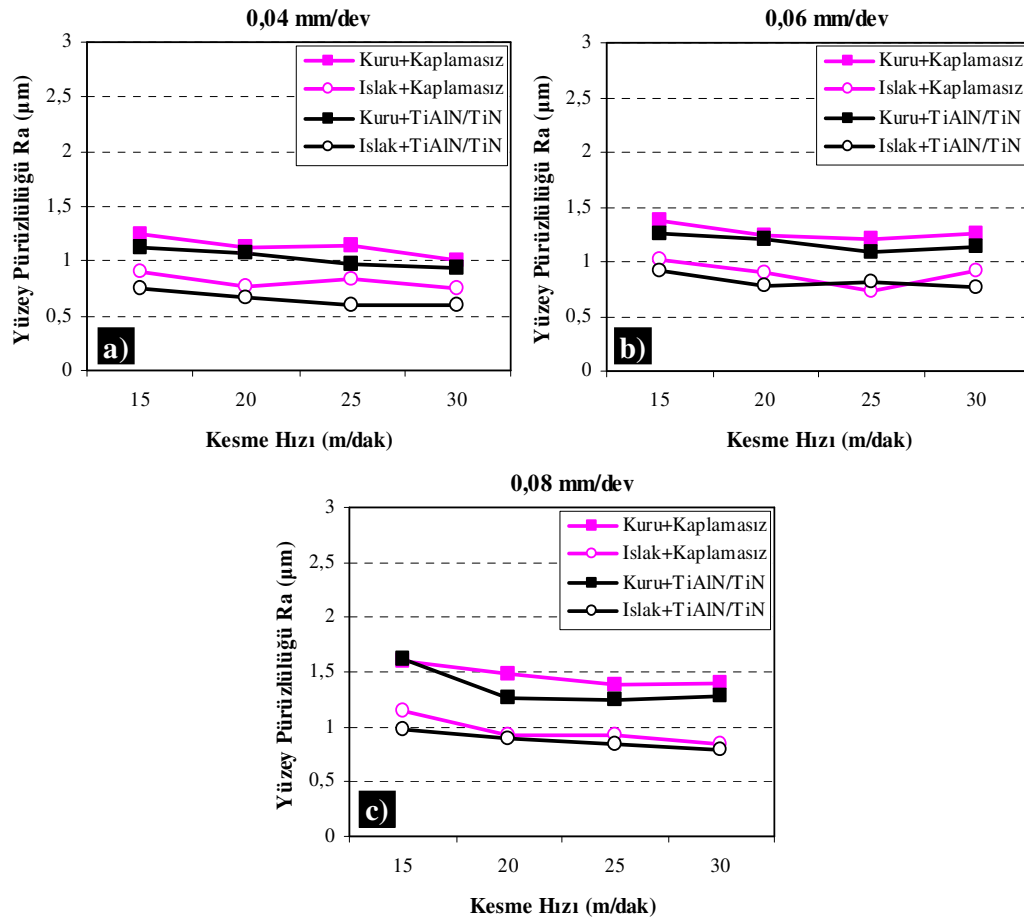
Kaplamasız ve kaplamalı takımların yüzey pürüzlülüğü bakımından değerlendirilmesi

Şekil 7.33’de karbür takımlarla delinen deliklerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimler verilmiştir. Grafiklere bakıldığında istisnai durumlar dışında genel olarak kesme hızının artması ile R_a değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın 25 m/dak kesme hızına kadar gerçekleştiği ancak bu kesme hızından sonra bazı parametrelerde R_a değerleri sabitlenirken bazı parametrelerde ise bir miktar artışın olduğu görülmüştür. HSS takımlarda olduğu gibi karbür takımlarda da artan kesme hızının takım-talaş ara yüzeyindeki temas alanını azaltması [149] sonucu azalan sürtünmenin yüzey kalitesini iyileştirdiği düşünülmektedir. Kesme hızındaki %100’lük artışla R_a değerlerinde kaydedilen en yüksek düşüşler 0,04; 0,06 ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla %25; %19 ve %35 şeklinde gerçekleşmiştir. Tüm delme deneylerinde ölçülen en düşük R_a değeri 0,6 μm olup bu değer kaplamalı takımla ıslak kesme şartlarında en düşük ilerleme (0,04 mm/dev) ve en yüksek kesme hızında (30 m/dak) elde edilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili bir parametre olarak bilinen ilerleme hızının artması özellikle kuru kesme şartlarında R_a değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Literatürdeki benzer çalışmalarda da artan ilerlemelerin R_a değerlerini arttırdığını görmek mümkündür [170]. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 0,6-1,24 μm aralığında olan R_a değerleri ilerleme hızının %100 arttırılması ile 0,08 mm/dev ilerleme hızında 0,79-1,62 μm aralığına ulaşmıştır. İlerleme hızındaki %100’lük artışın R_a değerlerinde en fazla %43’lük artışa sebep olduğu görülmüştür. Bu yüzdelik değerler göz önüne alındığında Ti-6Al-4V alaşımının karbür takımlarla delinmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok fazla olmamakla birlikte ilerleme hızının kesme hızından daha etkili bir parametre olduğu söylenebilir.

Deneylerde test edilen hemen hemen tüm kesme parametrelerinde en düşük R_a değerleri çok katlı TiAlN/TiN kaplı takımla elde edilmiştir. Kesme şartlarına ve

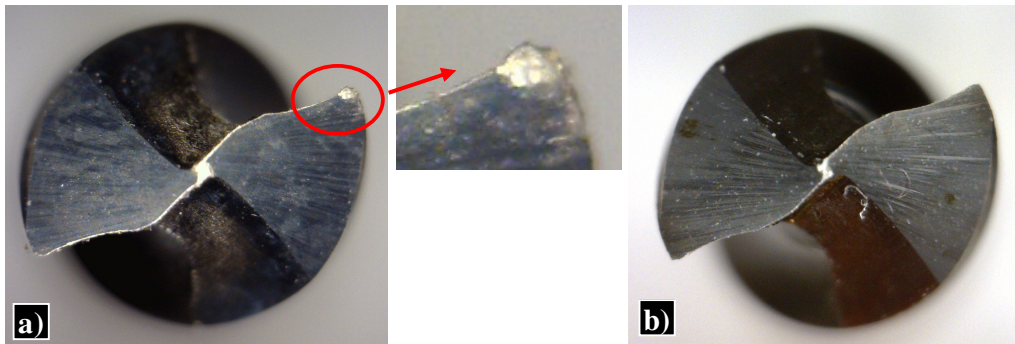
kesme parametrelerine göre değişmekle birlikte kaplama uygulaması yüzey kalitesinde %40'lara varan iyileşmeler sağlamıştır. Kaplama malzemesinin yüzey kalitesinin artması üzerinde, kesme kuvveti ve moment artışına sebep olan kesici takım geometrisinde meydana getirdiği değişimden ziyade sürtünme katsayısını düşürmesinin daha etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sağladığı sertlik artışı ve kimyasal kararlılığında [171] YT oluşumunu azaltarak R_a değerlerinin düşmesinde etkili olduğuna inanılmaktadır. Hem kuru hem de ıslak kesme şartları için kaplamalı takım ile kaplamasız takım arasındaki en belirgin R_a farkı 0,04 mm/dev ilerleme hızında oluşmuştur. Artan ilerleme hızları ile (0,06-0,08 mm/dev) özellikle ıslak kesme şartlarında bu farkın azaldığı görülmüştür.



Şekil 7.33. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişimler
a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev

Kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlarla delinen deliklerin yüzey kalitesinin artmasında en etkili unsurun soğutma sıvısı kullanımının olduğu Şekil 7.33'deki grafiklerde açık bir şekilde görülmektedir. İstisnasız tüm deney parametrelerinde en düşük R_a değerleri ıslak kesme şartlarında elde edilmiştir. Islak kesme şartları kuru kesme şartlarına göre R_a değerlerinde %65'lere ulaşan oranlarda ciddi bir azalma sağlamıştır. Bu oranın yüksek kesme hızı (30 m/dak) ve yüksek ilerleme hızında (0,08 mm/dev) elde edilmiş olması ağırlaşan kesme şartlarında soğutma sıvısı kullanımının, yüzey kalitesinin artması üzerindeki etkisini daha belirgin bir şekilde ortaya koyduğunu göstermektedir.

Şekil 7.34'te 30 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında test edilen kaplamasız takımın kuru ve ıslak kesme şartlarında üç delik sonundaki makro görüntüleri verilmiştir. Kuru kesme şartlarında kaplamasız takımın dış köşesinde meydana gelen YT oluşumunun yüzey kalitesinin düşmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir (Şekil 7.34.a). Aynı kesme parametrelerinde ancak ıslak kesme şartlarında test edilen takımda YT oluşumunun gerçekleşmediği görülmektedir (Şekil 7.34.b). Bu durum kuru ve ıslak kesme şartları arasındaki farkı açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Islak kesme şartları yüzey kalitesinin artmasında kaplama uygulamasının sağladığı iyileşmenin iki katına varan iyileşmeler sağladığı görülmüştür.

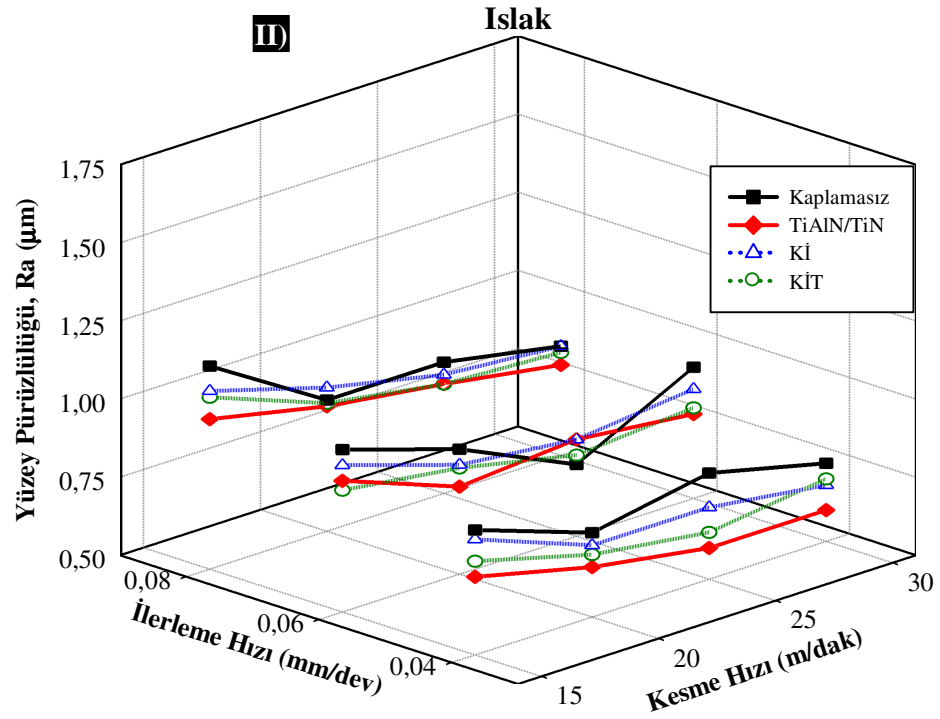
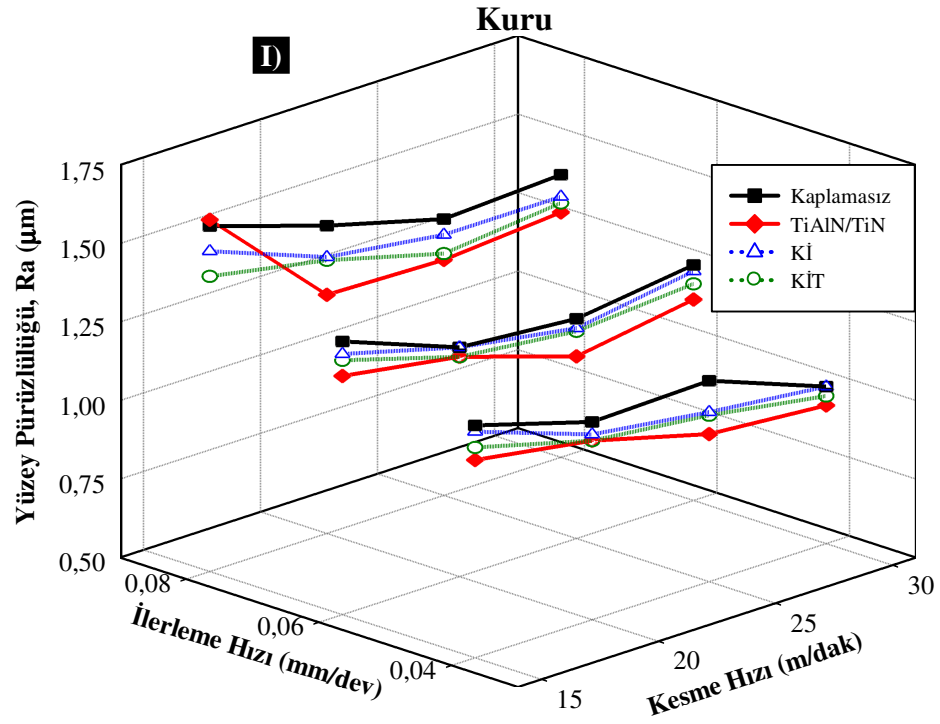


Şekil 7.34. Kaplamasız takımların 30 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında üç delik sonundaki makro görüntüleri
a) kuru kesme şartları b) ıslak kesme şartları

Genel olarak kaplamalı takımlarda soğutma sıvısının R_a değerlerinde meydana getirdiği düşüşün kaplamasız takımlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde soğutma sıvısı kullanımının kesme kuvvetleri ve moment dışındaki deney çıktılarının hemen hepsinde diğer işleme parametrelerine göre olumlu yönde önemli bir etkiye sahip olması ve bu çıktılar üzerinde ciddi iyileşmeler sağlaması titanyumun işlenmesinde soğutma sıvısı kullanımının elzem olduğunu göstermektedir.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların yüzey pürüzlülüğü bakımından değerlendirilmesi

İşlemsiz, Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımların farklı kesme şartlarında ve parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü bakımından mukayese edildiği grafikler Şekil 7.35'te verilmiştir. Dört takım arasında en düşük R_a değerleri TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. Bu takımı sırası ile KİT, Kİ ve işlemsiz takımlar takip etmiştir. Bu sıralama ıslak kesme şartlarındaki takım ömrü sıralaması ile paralellik göstermektedir (Bkz. Şekil 7.15). Nitekim takım aşınması ile yüzey pürüzlülüğü arasında kuvvetli bir bağın olduğu bilinmektedir [172]. Kuru kesme şartlarında R_a değerlerinde, işlemsiz takımlara göre Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlarla sırasıyla ortalama %3,6; %6,2; %8,9'luk düşüşler elde edilmiştir. Bu sıralama ıslak kesme şartlarında sırasıyla %4,5; %9,3; %14,4 olarak gerçekleşmiştir. Kriyojenik işlem ve temperleme işleminin, mikroyapıda meydana getirdiği olumlu değişimler ile sertlik ve aşınma direncinde sağladığı artışın TiAlN/TiN kaplama kadar olmasa da yüzey kalitesinin iyileşmesi yönünde önemli etkilerinin olduğu görülmüştür. Islak kesme şartları dört takımda da R_a değerlerinin düşmesi yönünde önemli iyileşme sağlamıştır. Ti-6Al-4V alaşımının işlenebilirliğini zor kılan en önemli etkenler düşük ısı iletim katsayısı ve yüksek kimyasal reaktifliğe sahip olmasıdır [3]. Soğutma sıvısı kullanımının talaş tahliyesini kolaylaştırarak kesme bölgesinde oluşan sıcakları gidermesi ve BUE oluşumunu önemli ölçüde azaltmasının takım ömründe sağlanan artışa paralel olarak yüzey kalitesinin artmasında önemli etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.35. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

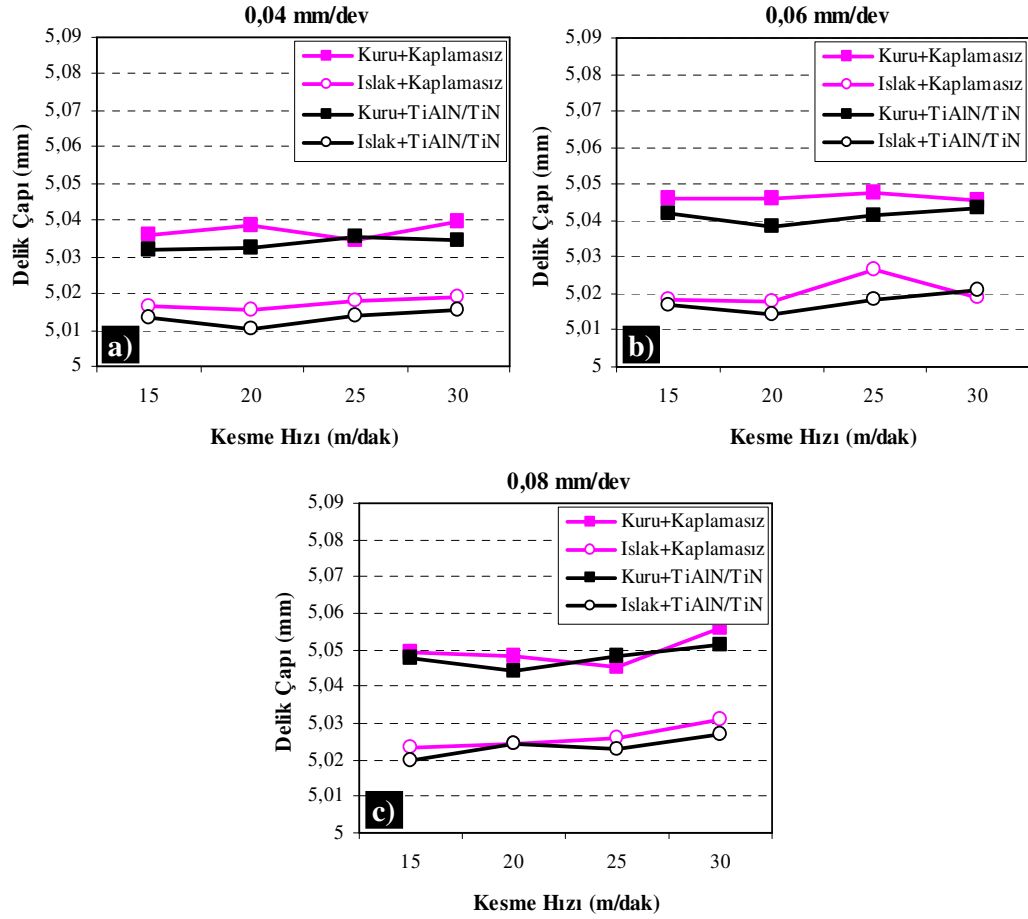
Literatürde yapılan bazı çalışmalarda kriyojenik işlem uygulanmış takımlarla işlemsiz takımlara göre yüzey pürüzlülük değerlerinde %20'leri bulan düşüşler elde edilmiştir [137]. Test edilen kesme parametreleri farklı olmakla birlikte tungsten karbür takımlara göre HSS takımlarda kriyojenik işlem ve temperleme işleminin R_a değerlerinin düşmesi yönünde daha etkili olduğu görülmüştür.

7.5.4. Delik çaplarının değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların delik çapları bakımından değerlendirilmesi

Karbür takımlarla, farklı kesme şartları ve kesme parametrelerinde delinen deliklerin çap değerlerindeki değişimler Şekil 7.36'da verilmiştir. Ölçülen tüm delik çap değerlerinin anma çapından daha büyük olduğu ve bu büyüklüğün matkap çapına göre %1'i bulan değerlerde kaldığı görülmüştür. Grafiklerdeki eğilim çizgilerine bakıldığında ise genel olarak kesme hızının artması ile delik çap değerlerinin arttığı görülmektedir. Artan kesme hızının, delik çaplarında %35'i bulan artışlara sebep olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızına bağlı artış eğiliminin özellikle yüksek ilerleme değerinde (0,08 mm/dev) daha belirgin olduğunu söylemek mümkündür. Kesme hızındaki %100'lük artışa karşılık 0,04; 0,06 ve 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında kaydedilen en büyük çaptan sapma yüzdeleri sırasıyla %12, %24 ve %35 şeklinde gerçekleşmiştir. Artan kesme hızının titreşimleri arttırmasının delik çaplarının büyümesine sebep olduğu düşünülmektedir [166].

İlerleme hızındaki artış özellikle kuru kesme şartlarında delik çaplarının büyümesine sebep olmuştur. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 5,010-5,040 mm aralığında değişen çap değerleri 0,08 mm/dev ilerleme hızında 5,020-5,056 mm arasında değişim göstermiştir. İlerleme hızındaki %100'lük artışın delik çapından sapmada meydana getirdiği artışın en fazla %54 olduğu görülmüştür. Birbirine yakın olmakla birlikte karbür takımlarla delinen delik çaplarındaki büyümede ilerleme hızının kesme hızından daha etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 7.36. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki delik çaplarındaki değişimler
a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev

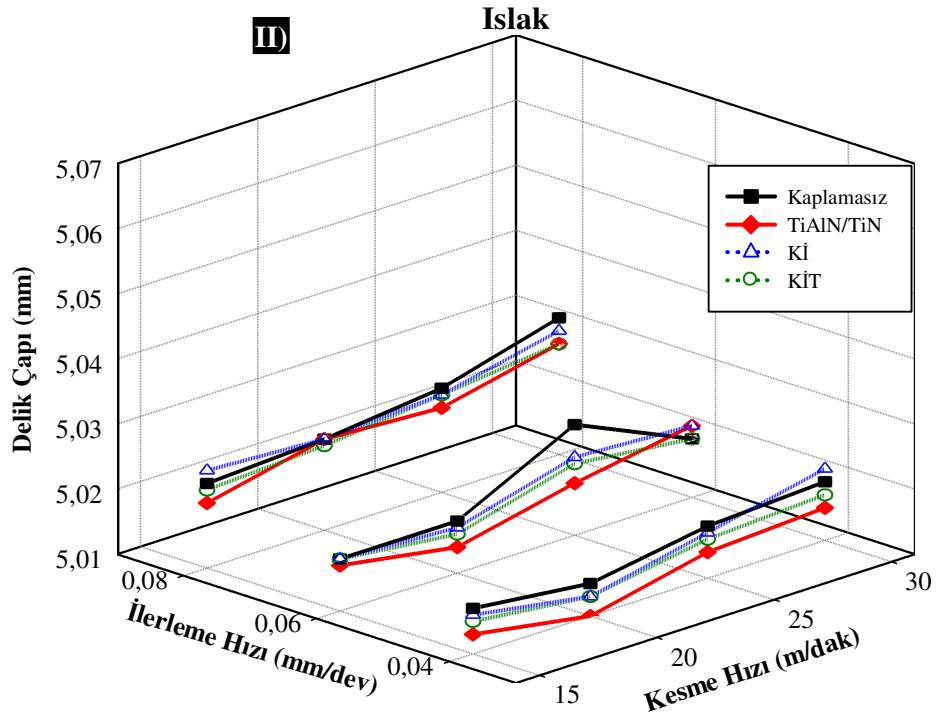
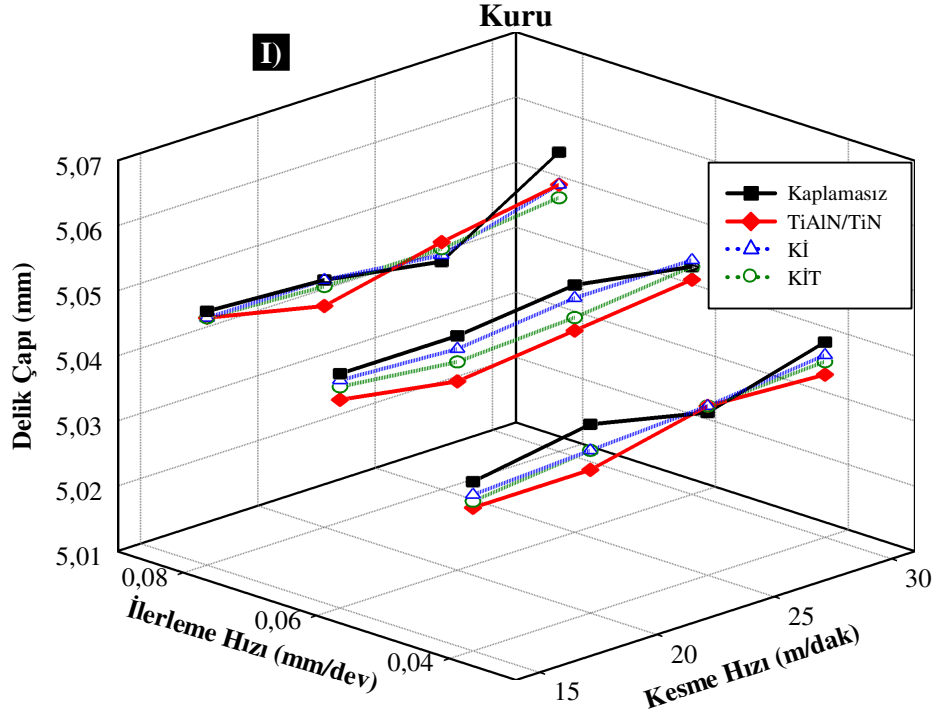
Karbür takımlar üzerine yapılan kaplama uygulaması anma çapına yakın delik çaplarının elde edilmesinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Bazı parametrelerde sapmaların dışında tüm kesme şartlarında anma çapına yakın çap değerleri kaplamalı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. Kaplama uygulaması delik çaplarından sapma değerlerinde %50'lere varan düşüşler sağlamıştır. 0,08 mm/dev ilerleme hızında test edilen bütün kesme hızlarında kaplamalı ve kaplamasız takım ile elde edilen delik çaplarının birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Delik çaplarından sapma üzerinde soğutma sıvısı kullanımının, diğer işleme parametrelerine (kesme hızı, ilerleme vb) göre olumlu yönde daha büyük etkiye

sahip olduğu Şekil 7.36'daki grafiklerden açık bir şekilde görülmektedir. İstisnasız tüm deneylerde her iki takımda da anma çapına yakın çap değerleri ıslak kesme şartlarında elde edilmiştir. Kuru kesme şartlarına göre ıslak kesme şartları çaptan sapma değerlerinde %247'leri bulan düşüşler sağlamıştır. Bu oran kaplamanın sağladığı çaptan sapma değerlerindeki düşüşün yaklaşık beş katına tekabül etmektedir. Bu da titanyum alaşımının delinmesinde soğutma sıvısı kullanımının önemini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların delik çapları bakımından değerlendirilmesi

Şekil 7.37'deki grafiklerde, kuru ve ıslak kesme şartlarında dört farklı tungsten karbür matkapla yapılan delme işlemleri sonunda ölçülen delik çap değerlerindeki değişimler gösterilmektedir. Grafiklerden kesme parametrelerine bağlı olarak Kİ ve KİT takımlarla elde edilen delik çap değerlerindeki değişimlerinin işlemsiz ve TiAlN/TiN kaplı takımlardaki değişimlere paralel olduğunu söyleyebiliriz. Kİ ve KİT takımlarla benzer delik çap değerleri elde edilmekle birlikte işlemsiz takımlara göre anma çapına (5 mm) daha yakın çap değerleri elde edilmiştir. Ancak yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi ideal delik çaplarının elde edilmesinde de en iyi performansı TiAlN/TiN kaplı takımlar sergilemiştir. Kuru kesme şartlarında Kİ ve KİT takımlar işlemsiz takımlara göre çaptan sapma değerlerinde ortalama %3-5'lik düşüşler sağlarken bu oran ıslak kesme şartlarında %10'lara ulaşmıştır. TiAlN/TiN kaplı takımlarda ise bu oranlar kuru kesme şartlarında ortalama %9 civarında iken ıslak kesme şartlarında ortalama %20'lerin üstüne çıkmıştır. Dolayısıyla soğutma sıvısı kullanımının dört takımda da anma çapına yakın çap değerlerinin elde edilmesinde önemli bir rol üstlenmiştir. İşlemsiz takımlara göre Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlarla anma çapına daha yakın çap değerlerinin elde edilmesinde takımların aşınma direncinin işlemsiz takımlara göre daha yüksek olmasının etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.37. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak delik çaplarındaki değişim

I) Kuru kesme, II) Islak kesme

Delik çapındaki sapmaların genellikle ideal kesmenin gerçekleşmediği durumlarda yani takım aşınmasının etkisiyle sürtünmelerin artması, sıvanmaların artması ve yüksek sıcaklıkların oluşması gibi durumlardan kaynaklandığı söylenebilir. Bu noktada kesici takımın uzun süre sahip olduğu geometriyi koruyabilecek dayanıma sahip olmasının önemi anlaşılmaktadır. Özde baktığımızda anma çapına yakın çap değerlerinin elde edilmesinde işlemsiz takımlara göre Kİ ve KİT takımlar ya da kaplamalı takımlar %1 gibi küçük bir etkiye sahip olmuştur. Dolayısıyla kesici takım farklılıklarının ya da işleme parametrelerinin çap değişimi üzerinde çok büyük etkilerinin olduğu söylenemez. Ancak çaptan sapma değerlerinde küçükte olsa farklılıklar oluşmuştur.

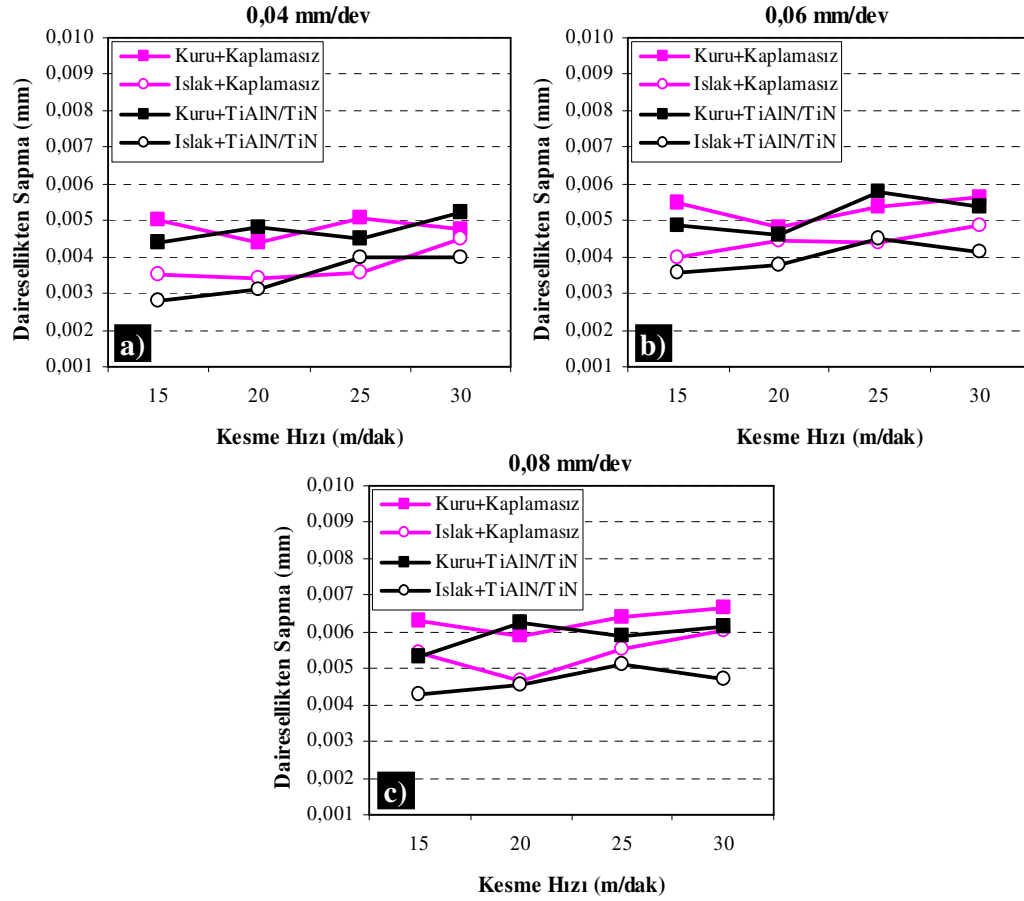
7.5.5. Dairesellikten sapmanın değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların dairesellikten sapma bakımından değerlendirilmesi

Deliğin daireselliğini etkileyen birçok parametre vardır. Bunlar kesme hızı, ilerleme, kaplama uygulaması, kesici takım malzemesi ve geometrisi, soğutma sıvısı kullanımı ve delme yöntemi (gagalayarak, boydan boya) şeklinde sıralanabilir [166]. İstenilen nitelikte daireselliğin elde edilebilmesi için delme işleme etki eden parametrelerin irdelenerek uygun işleme şartlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada yukarıda sayılan parametrelerin birçoğunun Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde delik kalitesi üzerindeki etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

İşleme şartlarına bağlı olarak tungsten karbür matkaplarla delinen deliklerin dairesellikten sapma değerlerindeki değişimler şekil 7.38’de verilmiştir. Genel itibariyle deneylerde test edilen parametrelerin, deliğin daireselliğinin bozulmasında çok büyük etkiye sahip olmadığı söylenebilir. Ölçülen dairesellikten sapma değerlerinin mikron mertebesinde olması bunun bir göstergesidir. Grafiklerdeki eğilim çizgilerine bakıldığında, değişkenlik göstermekle birlikte kesme hızındaki artış ile dairesellikten sapma değerlerinin büyüdüğü görülmektedir. Bu büyümenin özellikle 25 m/dak kesme hızından sonra daha belirgin hale geldiği söylenebilir.

Ölçülen en küçük dairesellikten sapma değeri (0,0028 mm) en küçük ilerleme ve kesme hızında elde edilirken iken en büyük değer (0,0067 mm) ise en yüksek ilerleme ve kesme hızında elde edilmiştir. Bu da mikron düzeyinde de olsa kesme hızı ve ilerlemenin dairesellik üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Kesme hızının %100 artması dairesellikten sapmada en fazla %43'lük artışa yol açmıştır.



Şekil 7.38. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki dairesellikten sapmadaki değişimler
b) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev

İlerleme hızı ile dairesellikten sapma değerlerindeki değişime bakıldığında ise artan ilerleme hızının dairesellikten sapma değerlerini arttırdığı söylenebilir. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 0,0028-0,0052 mm aralığında olan dairesellikten sapma değerleri ilerleme hızının %100 arttırılması ile 0,08 mm/dev ilerleme hızında 0,0043-0,0067 mm aralığına ulaşmıştır. İlerleme hızının 0,04 mm/dev'den 0,08 mm/dev' e çıkması ile kaydedilen en büyük dairesellikten sapma yüzdesi %54 olmuştur. Bu değer göz

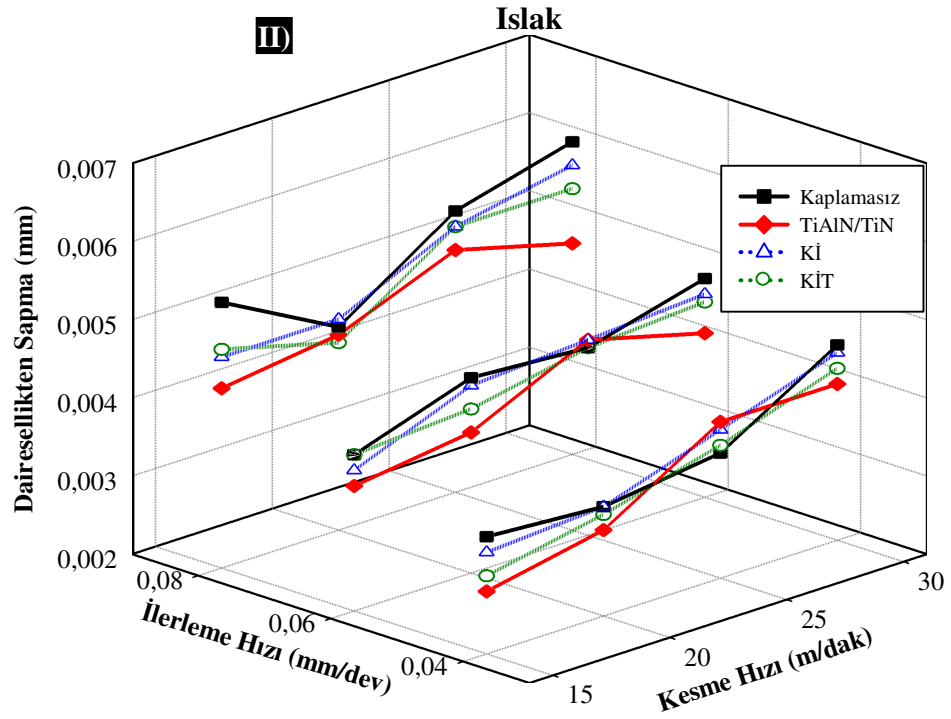
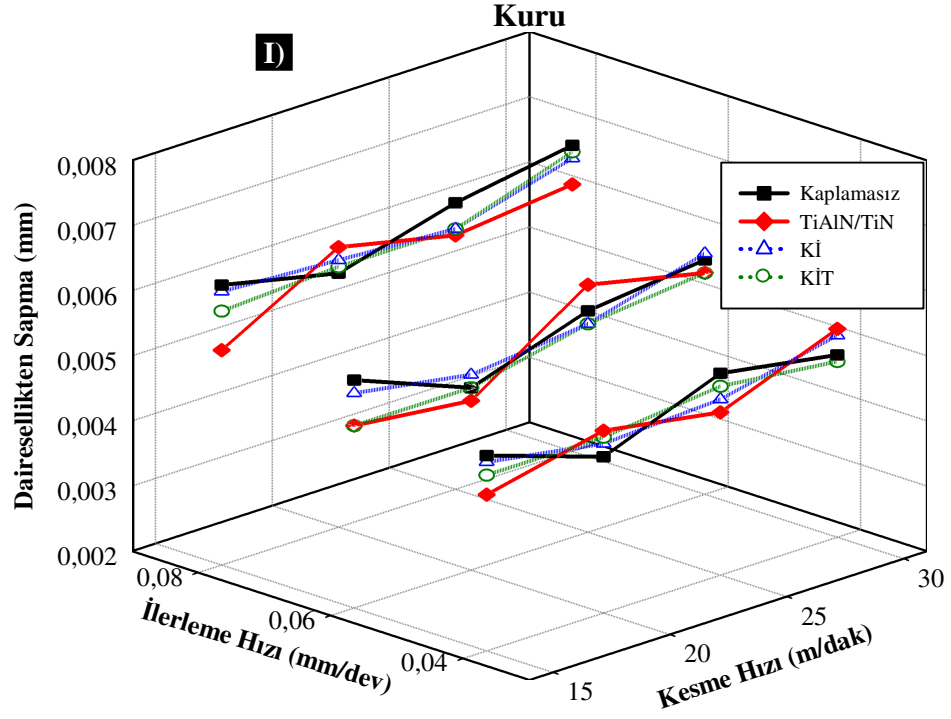
önüne alındığında Ti-6Al-4V alaşımının karbür matkaplarla delinmesinde deliğin daireselliği üzerinde ilerleme ve kesme hızının benzer etkilere sahip olduğu söylenebilir.

Kaplama uygulamasının deliğin daireselliği üzerinde olumlu etkileri olmakla birlikte genellikle dairesellikten sapma değerlerinin kaplamasız takımlarla delinen deliklerdekine yakın olduğu görülmüştür. Kaplamalı takımlarla kaplamasız takımlar arasındaki en büyük dairesellikten sapma farkları yüksek kesme ve ilerleme hızlarında delinen deliklerden elde edilmiştir. Bazı kesme parametrelerinde kaplamasız takımlar daha iyi sonuç vermekle birlikte çok katlı TiAlN/TiN kaplama dairesellikten sapma değerlerinde %30'a kadar düşüşler sağlamıştır.

HSS takımlarda olduğu gibi karbür takımlarda da soğutma sıvısı kullanımının deliğin kalitesini arttırmada en büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. İstisnasız tüm kesme parametrelerinde hem kaplamalı hem de kaplamasız karbür takımlar için en düşük dairesellikten sapma değerleri ıslak kesme şartlarında elde edilmiştir. Kaplamalı takımlarda ıslak kesme şartları dairesellikten sapma değerlerinde %57'ye varan düşüşler sağlarken bu oran kaplamasız takımlarda %43'ler civarında olmuştur. Bu durum kaplama uygulaması ile ıslak kesme şartlarının olumlu etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Delme deneylerinde kullanılan soğutma sıvısının yağlama özelliğinden ziyade soğutma özelliğinin etkili olduğu vurgulanmıştır. Kaplamanın katı yağlayıcı özelliği ile soğutma sıvısının soğutma özelliğinin ideal kesme işleminin gerçekleşmesinde önemli role sahip olduğunu söylemek mümkündür.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların dairesellikten sapma bakımından değerlendirilmesi

Dairesellikten sapma değerleri bakımından Kİ ve KİT takımların işlemsiz ve TiAlN/TiN kaplı takımlarla mukayese edildiği grafikler Şekil 7.39'da verilmiştir. Dört takımla delinen deliklerden elde edilen dairesellikten sapma değerleri bindelik değerler bazında farklılık göstermiştir.



Şekil 7.39. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak dairesellikten sapmadaki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

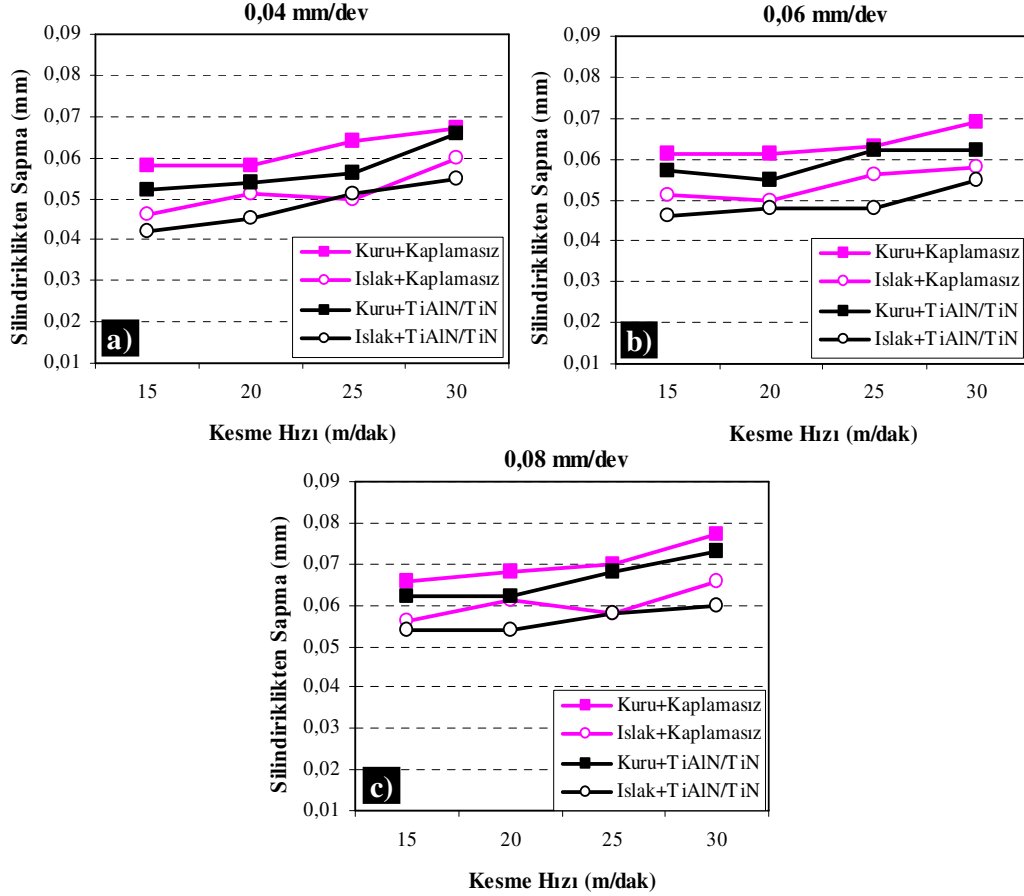
Kesici takım farklılıkları ve kesme parametrelerindeki değişimden ziyade dairesellikten sapma değerlerinin değişimi üzerinde en büyük paya soğutma sıvısı kullanımının sahip olduğu görülmüştür. Onun dışında kuru kesme şartlarında işlemsiz takımlara göre Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlar dairesellikten sapma değerlerinde sırasıyla ortalama %1, %3,1 ve %4,6 düşüş sağlamıştır. Bu sıralama, ıslak kesme şartlarında soğutma sıvısı kullanımının takımların kesme performanslarını arttırması sonucu sırasıyla %2,8, %6,2 ve %12,4 şeklinde gerçekleşmiştir. Islak kesme şartlarında kuru kesme şartlarına göre Kİ ve KİT takımlarla delinen deliklerin dairesellikten sapma değerlerinde yaklaşık iki kat düşüş görülürken TiAlN/TiN kaplı takımlarda üç kata yakın düşüşler elde edilmiştir. Bu da Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde kaplama uygulaması ile soğutma sıvısının birlikte kullanımının delik kalitesinin artması üzerindeki etkisini göstermektedir. Genel olarak dairesellikten sapma değerlerinin delik çaplarındaki sapma ile paralellik gösterdiği söylenebilir. Delik çapının büyümesine neden olan olumsuz kesme koşullarının deliğin daireselliğinde bozulmasına yol açtığı düşünülmektedir.

7.5.6. Silindiriklikten sapmanın (Eksenel kaçıklık) değerlendirilmesi

Kaplamasız ve kaplamalı takımların silindiriklikten sapma bakımından değerlendirilmesi

Karbür matkaplarla yapılan delme işlemlerinde deliklerin silindiriklikten sapma değerlerindeki değişimler Şekil 7.40'ta verilmiştir. Grafıklere bakıldığında genel olarak artan kesme hızı ile silindiriklikten sapma değerleri artış göstermiştir. Ancak bu artış lineer olmamıştır. 20 m/dak kesme hızına kadar silindiriklikten sapma değerlerinde çok fazla değişim olmazken bu kesme hızından sonra özellikle 0,04-0,08 mm/dev ilerleme hızlarında artış eğiliminin daha belirgin olduğunu söylemek mümkündür. En düşük silindiriklikten sapma değeri 0,042 mm en büyük silindiriklikten sapma değeri ise 0,077 mm olarak ölçülmüştür. Kesme hızındaki %100'lük artış silindiriklikten sapma değerlerini en fazla %31 arttırmıştır. Artan kesme hızı ile meydana gelen yüksek sıcaklıkların kesici takım ve iş parçası boyutsal

kararlılığını olumsuz yönde etkileyerek silindiriklikten sapma değerlerini arttırdığı düşünülmektedir [167].



Şekil 7.40. Kesme parametreleri ve kesme şartlarına bağlı olarak iki takım arasındaki silindiriklikten sapmadaki değişimler

a) 0,04 mm/dev b) 0,06 mm/dev c) 0,08 mm/dev

İlerleme hızındaki artış, silindiriklikten sapmayı kesme hızındaki artıştan farklı bir şekilde etkilemiştir. 0,04 ve 0,06 mm/dev ilerleme hızlarında silindiriklikten sapma değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ancak 0,08 mm/dev ilerleme hızında bir miktar arttığı görülmüştür. Bu durum, düşük ilerleme hızlarında delik içerisinde bekleyen talaşın meydana getirdiği ilave radyal yüklere atfedilebilir. 0,08 mm/dev ilerleme hızındaki artış ise artan ilerleme hızı ile eksenel kuvvetteki artışın eksenel kaçıklığın büyümesine neden olması şeklinde açıklanabilir. 0,04 mm/dev ilerleme hızında 0,042-0,067 mm arasında değişen silindiriklikten sapma değerleri ilerleme hızının %100 arttırılması ile 0,08 mm/dev ilerleme hızında 0,054-0,077 mm arasında

değişim göstermiştir. İlerlemedeki bu artışa karşılık silindiriklikten sapma değerlerinde kaydedilen en büyük artış %29 olmuştur.

HSS takımlarda olduğu gibi karbür takımlarda da kaplama uygulamasının deliğin silindirikliğinin muhafaza edilmesi yönünde olumlu etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu etki, çok büyük olmamakla birlikte bir miktar silindiriklikten sapma değerlerinin azalmasını sağlamıştır. Kaplamalı takım kaplamasız takıma göre silindiriklikten sapma değerlerinde en fazla %17'lik iyileşme sağlamıştır. Kaplama uygulamasının deliğin silindirikliği üzerinde kaplamasız takıma sağladığı üstünlük kuru ve ıslak kesme şartlarında benzerlik göstermiştir.

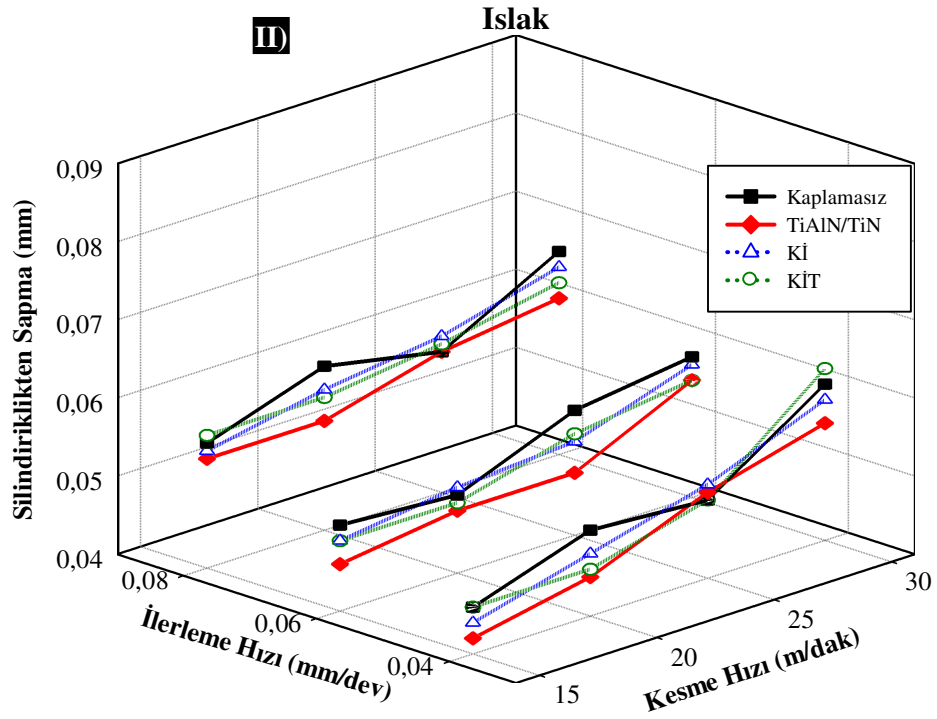
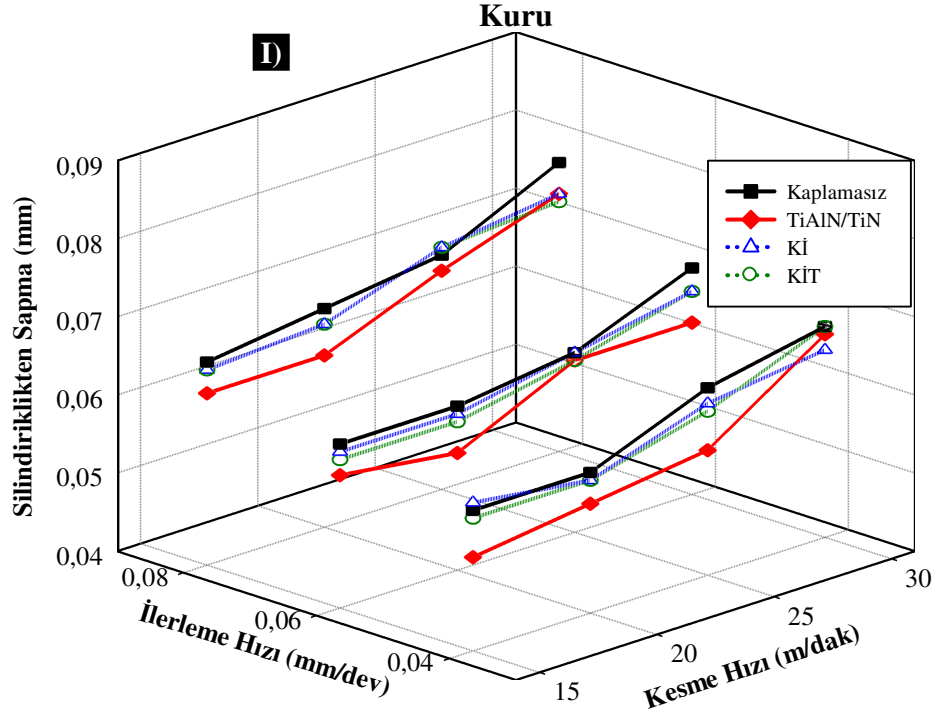
Islak kesme şartları, HSS takımlarla yapılan delme deneylerinde delik kalitesini belirleyen unsurların (yüzey pürüzlülüğü, delik çapı vb.) tamamında önemli iyileşmeler sağladığı gibi karbür takımlarda da deliğin silindirikliği dâhil olmak üzere delik kalitesini oluşturan tüm unsurlar üzerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. İstisnasız test edilen tüm parametrelerde ıslak kesme şartlarındaki silindiriklikten sapma değerleri kuru kesme şartlarındakinden düşük olmuştur. Islak kesme şartları kuru kesme şartlarına göre silindiriklikten sapma değerlerinde %30'a varan düşüşler sağlamıştır. Soğutma sıvısının deliğin kalitesini olumsuz yönde etkileyen talaşın tahliyesini kolaylaştırması ve termal bozulmalara sebep olan kesme sıcaklıklarını azaltmasının sonucu olarak silindiriklikten sapma değerlerinin düştüğü düşünülmektedir.

Karbür takımlarla yapılan delme işlemlerinde kullanılan kesme parametreleri HSS takımlara göre farklılık göstermesine rağmen karbür takımlarla elde edilen delik çap ve dairesellikten sapma değerleri HSS takımlarla elde edilenlere göre daha düşük olmuştur. Ancak silindiriklikten sapma değerlerinin HSS takımlarla elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. HSS takımların karbür takımlara göre daha tok olmasının, artan kesme ve ilerleme hızlarında kesici takım üzerine gelen yüklerin etkisiyle oluşan titreşimleri azaltmada etkili olduğuna inanılmaktadır. Bunun sonucu olarak da HSS takımlarla daha düşük silindiriklikten sapma değerlerinin elde edildiği düşünülmektedir. Karbür takımlarla yapılan deneylerde

kullanılan kesme hızı ve ilerleme değerlerinin HSS takımlardakine göre çok daha yüksek olmasının da bu farkın oluşması üzerinde etkili olacağı unutulmamalıdır.

Kaplamasız, kaplamalı, Kİ ve KİT takımların silindiriklikten sapma bakımından değerlendirilmesi

Delik kalitesini belirleyen unsurlardan bir diğeri olan deliğin silindiriklikliği üzerinde Kİ ve KİT takımların diğeri takımlara göre performansını ortaya koymak amacıyla yapılan deneyler neticesinde elde edilen silindiriklikten sapma değerlerindeki değişimler Şekil 7.41’de verilmiştir. Kİ ve KİT takımlar işlemsiz takımlara göre dairesellikten sapma değerlerinde çok büyük etkiye sahip değilken delik çapından sapma değerlerinde olduğu gibi silindiriklikten sapma değerlerinde de olumlu yönde bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Hem kuru hem de ıslak kesme şartlarında Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlar işlemsiz takımlara göre silindiriklikten sapma değerlerinde sırasıyla ortalama %2,1-2,6; %2,2-2,8 ve %7,5-7,8 arasında düşüşler sağlamıştır. Bu sonuçlar, deliğin silindirikliği üzerinde soğutma sıvısı kullanımının Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımların işlemsiz takımlara göre performansını arttırmada çok fazla etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Ancak kesici takımlar kuru ve ıslak kesme şartlarında kendi içinde mukayese edildiğinde soğutma sıvısı kullanımı silindiriklikten sapma değerlerinin düşmesi yönünde önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 7.41. Kesme parametreleri ve kesici takımlara bağlı olarak silindiriklikten sapmadaki değişim
I) Kuru kesme, II) Islak kesme

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının kuru ve ıslak kesme şartları altında işlemsiz, Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı M42 HSS ve tungsten karbür takımlarla delinmesinde, kesme parametrelerinin; kesme kuvvetleri, moment, yüzey pürüzlülüğü, delik çapları, dairesellik ve silindiriklikten sapma ile takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem ile kriyojenik işlem ardına uygulanan temperleme işleminin işlemsiz takımlara göre mikroyapı ile mekanik özelliklerde meydana getirdiği değişimlerde irdelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- i. SEM analizleri HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlemin, karbür boyutlarını küçülterek homojen karbür dağılımı sağladığı ve geleneksel ısıtıl işlem sonrası yapıdaki kalıntı östeniti martensite dönüştürdüğünü göstermiştir. Ayrıca kriyojenik işlem sonrası yapılan temperleme işlemi ile küçük ikincil karbürlerin yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Mikroyapıdaki bu değişimler kesici takımların sertlik ve aşınma direncinin artmasında önemli bir rol oynamıştır.
- ii. Tungsten karbür takımlarda ise kriyojenik işlem ve temperleme işlemi η (eta) karbürlerinin yoğunluğunu arttırmıştır. Bu ince parçacıklar daha büyük tungsten karbür parçacıklarıyla birlikte daha yoğun, birbirini tutan ve daha sağlam matris meydana getirmiştir. Bu da kesici takımların sertlik ve aşınma direncini önemli ölçüde arttırmıştır.
- iii. Yapılan mikrosertlik ölçümleri, kriyojenik işlemin hem HSS hem de tungsten karbür takımlarının sertliğini arttırdığını, kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işleminin ise kriyojenik işleme göre bir miktar sertlik kaybına sebep olmakla birlikte işlemsiz takımından daha yüksek sertlik değerleri verdiğini göstermiştir.

- iv. Kesme kuvvetleri ve moment açısından işlemsiz, Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı HSS takımlar mukayese edildiğinde en düşük kesme kuvveti ve moment değerleri TiAlN/TiN kaplı takımlarla elde edilmiştir. İşlemsiz takımlara göre Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlarla sırası ile kesme kuvvetlerinde ortalama %4, %7 ve %11, moment değerlerinde ise ortalama %4, %8 ve %18'i bulan düşüşler kaydedilmiştir.
- v. Tungsten karbür takımlarda ise TiAlN/TiN kaplamanın hem kesme kuvvetlerini hem de momentleri bir miktar arttırdığı görülmüştür. HSS takımlarda olduğu gibi tungsten karbür takımlarda da işlemsiz takımlara göre kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına uygulanan temperleme işlemi kesme kuvvetlerinde sırası ile ortalama %3 ve %6, momentlerde ise ortalama %3,5 ve %7'yi bulan düşüşler sağlamıştır. Her iki takım malzemesinde de kesme kuvvetleri ve momentin değişimi üzerinde ilerleme hızının kesme hızından daha etkili olduğu ve kuru kesme şartlarına göre ıslak kesme şartlarının kesme kuvvetleri ve momenti bir miktar arttırdığı tespit edilmiştir.
- vi. Her iki takım malzemesinde de kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işlemi yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesinde önemli bir role sahip olmuştur. Ancak dört farklı takım arasında en düşük R_a değerleri TiAlN/TiN kaplı takımlarla delinen deliklerden elde edilmiştir. HSS takımlarda; ıslak kesme şartlarında işlemsiz takımlara göre Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlar R_a değerlerinde sırasıyla ortalama %6, %10 ve %15'e varan düşüşler sağlamıştır. Bu sıralama tungsten karbür takımlarda sırasıyla ortalama %4,5, %9,3 ve %14,4 şeklinde gerçekleşmiştir. Tüm deney değişkenleri içerisinde R_a değerlerinin düşmesinde en büyük paya soğutma sıvısı kullanımının sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak artan kesme hızı ile R_a değerleri azalırken artan ilerlemelerin R_a değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir.
- vii. Delinen delik çaplarının anma çapına yakın olmasında kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işleminin her iki kesici takım malzemesinde de önemli bir etkiye sahip olduğu

sonucuna varılmıştır. Hem HSS hem de tungsten karbür takımlarda, yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi anma çapına en yakın çap değerlerinin elde edilmesinde de TiAlN/TiN kaplı takımlar diğer takımlara üstünlük sağlamıştır. HSS takımlara yapılan TiAlN/TiN kaplama delik çaplarından sapma değerlerinde ortalama %15'e varan düşüşler sağlarken bu oran tungsten karbür takımlarda ortalama %14'ler civarında olmuştur. Yine ıslak kesme şartlarında işlemsiz takımlara göre Kİ ve KİT HSS takımlarla delik çaplarından sapma değerlerinde sırası ile ortalama %6,5 ve %10,4'e varan düşüşler elde edilmiştir. Bu oranlar tungsten karbür takımlarda sırası ile ortalama %4,5 ve %9,3 olarak gerçekleşmiştir. Soğutma sıvısının talaşı tahliye etmesi, kesme bölgesi sıcaklıklarını düşürmesi ve takım aşınmasını geciktirmesi gibi olumlu özellikleri sayesinde delik çaplarından sapma değerlerinin düşmesinde önemli bir etken olduğu görülmüştür.

viii. Yapılan delme deneyleri sonucunda deliklerin dairesellikten sapma değerlerinin genel itibariyle mikron mertebesinde olduğu kesme şartlarına, kesme parametrelerine, kaplama malzemesine ve kesici takımlara uygulanan işlemlere bağlı olarak çok büyük değişimlerin olmadığı görülmüştür. Ancak mikron düzeyinde de olsa küçük farklar kaydedilmiştir. Her iki kesici takım malzemesine de uygulanan kriyojenik işlem, kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işlemi ile TiAlN/TiN kaplamanın özellikle ıslak kesme şartlarında dairesellikten sapma değerlerinin düşmesi üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Delik kalitesini belirleyen diğer deney çıktılarında olduğu gibi deliğin daireselliği üzerinde de soğutma sıvısı kullanımının önemli bir etken olduğu görülmüştür.

ix. HSS takımlara uygulanan kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işlemi ile TiAlN/TiN kaplamanın, karbür takımlara göre silindiriklikten sapmanın azalmasında daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Islak kesme şartlarında KİT HSS ve tungsten karbür takımlar işlemsiz takımlara göre silindiriklikten sapma değerlerinde sırası ile ortalama %8 ve %2,8 düşüş sağlamıştır. Benzer şekilde kaplama uygulaması da HSS ve tungsten karbür

takımlarda sırası ile ortalama %11,7 ve %7,8'i bulan düşüşler sağlamıştır. Silindiriklikten sapma değerlerinin değişimi üzerinde kesme hızı ve ilerleme hızının benzer etkilere sahip olduğu görülmüştür.

- x. Takım ömrü bakımından Kİ ve KİT HSS takımlar işlemsiz takımlara göre önemli bir üstünlük sağlayarak TiAlN/TiN kaplı takımlara yakın performans göstermişlerdir. Ayrıca soğutma sıvısı kullanımının takım ömrünün artmasında önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kuru kesme şartlarında kaydedilen en yüksek takım ömrü 2,7 dakika iken bu değer ıslak kesme şartlarında 19,9 dakikaya ulaşmıştır. Kuru kesme şartlarında, işlemsiz takıma göre Kİ, KİT ve TiAlN/TiN kaplı takımlar sırasıyla %25, %50, %68'lik ömür artışı sağlamıştır. Bu oranlar ıslak kesme şartlarında sırasıyla %76, %87, %112 şeklinde olmuştur. HSS takımlarda kuru kesme şartlarında etkin aşınma tipleri BUE ve takım bozulması (catastrophic failure), ıslak kesme şartlarında ise yanak aşınması ve dış köşe aşınması şeklinde gerçekleşmiştir.
- xi. HSS takımlarda olduğu gibi tungsten karbür takımlarda kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işleminin takım ömrünün artmasında önemli bir role sahip olduğu görülmüştür. Tungsten karbür takımlarda kuru kesme şartlarında kaplamasız takıma göre Kİ takım %55, KİT takım %75 ve TiAlN/TiN kaplı takım %55'lik ömür artışı sağlarken ıslak kesme şartlarında bu artış oranları sırasıyla %75, %83 ve %149 şeklinde gerçekleşmiştir. Dört farklı takımla yapılan ömür deneylerinde kuru kesme şartlarına göre %50 daha yüksek kesme hızı kullanılmasına rağmen soğutma sıvısı kullanımının takım ömrünü ciddi bir şekilde arttırdığı görülmüştür. Kuru kesme şartlarında kaydedilen en yüksek takım ömrü 3,5 dakika iken bu değer ıslak kesme şartlarında 15,7 dakikaya çıkmıştır. Tungsten karbür takımlarda kuru kesme şartlarında etkin aşınma tipleri BUE ve dış köşe aşınması, ıslak kesme şartlarında ise yanak aşınması ve çatlama şeklinde olduğu görülmüştür.
- xii. Karbür takımlara göre HSS takımlarda kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem ardına yapılan temperleme işleminin takım ömrünü arttırmada daha etkili olduğu

tespit edilmiştir. Kriyojenik işlemin kaplamalara göre en büyük avantajlarının uygulanmasının daha ucuz olması ve malzemenin tüm kesitini etkilemesinin olduğu söylenebilir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar kriyojenik işlemin geliştirilmesi ile kaplamaların alternatifi olabileceğini göstermektedir.

8.2. Öneriler

- ✓ Hemen hemen tüm deney çıktılarında olumlu sonuçların ıslak kesme şartlarında alınmış olması sebebiyle Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde soğutma sıvısı kullanılması tavsiye edilebilir.
- ✓ Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde, çok katlı TiAlN/TiN kaplamanın HSS ve tungsten karbür takımların işleme performansını önemli ölçüde arttırdığı göz önünde bulundurulursa bu alaşımın delinmesinde kaplamalı takımlar tercih edilmelidir.
- ✓ Üretim zamanının ön plana çıktığı durumlarda Ti-6Al-4V alaşımın işlenmesinde HSS takımlar yerine tungsten karbür takımlar tercih edilmelidir.
- ✓ Kesici takımlara uygulanacak kriyojenik işlem ile üretim maliyetlerini önemli ölçüde düşürülebilir.
- ✓ Bu çalışmada ele alınamayan ancak üzerinde çalışılabilecek konular:
 - Kriyojenik işlem için farklı bekletme sıcaklıkları ile sürelerinin kesici takımların işleme performansı üzerindeki etkileri araştırılarak optimum bekletme süresi ve bekletme sıcaklığının tespit edilmesi,
 - Kriyojenik işlemin kaplamalı HSS ve karbür takımlara uygulanarak işleme verimlilikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi,

- Kriyojenik işlem ardına yapılan tekli ve çoklu temperlmelerin etkilerinin araştırılması,
- Kriyojenik işlem uygulanmış takımlarla birlikte takım-talaş arayüzeyine uygulanan kriyojenik soğutmanın takım ömrü üzerindeki etkilerinin araştırılması,
- İşleme esnasında yüksek basınçlı soğutma sıvısı ile normal basınçlı soğutma sıvısının talaş kaldırmadaki etkileri,
- Minimum yağlama sistemiyle yapılan yağlamanın işlenebilirlik üzerindeki etkisinin belirlenmesi,
- İçten soğutmalı ve dıştan soğutmalı matkaplar kullanılarak kesme performansı ve kuru kesme ile mukayesesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi,
- Delme esnasındaki ısının ölçülmesi ve bu ısının kesici takım ve iş parçası üzerindeki etkisinin belirlenmesi,

şeklinde özetlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Kurt, B., "Ti-6Al-4V Alaşımı İle Farklı Tip Paslanmaz Çeliklerin Difüzyon Kaynağı", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2005).
2. Nabhani, F., "Machining of Aerospace Titanium Alloys", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 17: 99-106 (2001).
3. Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., "Titanium Alloys and Their Machinability-A Review", *Journal of materials processing technology*, 68: 262-274 (1997).
4. Schueller, J.K., Tlusty, J., Smith, S., Leigh, E., "Advanced Machining Techniques on Titanium Rotor Parts", *American Helicopter Society*, 56th Annual Forum, Virginia Beach, VA, (2000).
5. Zeng, L., Bieler, T.R., "Effects of Working, Heat Treatment, and Aging on Microstructural Evolution and Crystallographic Texture of α' , α'' , α''' and β Phases in Ti-6Al-4V Wire", *Materials Science and Engineering A*, 392: 403-414 (2005).
6. Fujii, H., "Strengthening of $\alpha+\beta$ titanium alloys by thermomechanical processing", *Materials Science and Engineering A*, 243: 103-108 (1998).
7. Huang, J.Y., Zhu, Y.T., Liao, X.Z., Beyerlein, I.J., Bourke, M.A., Mitchell, T.E., "Microstructure of Cryogenic Treated M2 Tool Steel", *Mater. Sci. Eng. A*, 339: 241-244 (2003).
8. Collins, D.N., "Deep Cryogenic Treatment of Tool Steels: A Review", *Heat Treat. Met.*, 23: 40-42 (1996).
9. Molinari, A., Pellizzari, M., Gialanella, S., Straffelini, G., Stiasny, K.H., "Effect of Deep Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of Tool Steels", *J Mater Process Tech.*, 118 (5): 350-355 (2001).
10. Da silva, F.J., Franco, D.D., Machado, A.R., Ezugwu, E.O., Souza Jr, A.M., "Performance of Cryogenically Treated HSS Tools", *Wear*, 261: 674-685 (2006).
11. Tonshoff, H.L., Spintig, W., Konig, W., Neises, A., "Machining of Holes Developments in Drilling Techonolgy", *Annals of the CIRP*, 43 (2): 551-560 (1994).
12. Smith, W.F., "Structure and properties of engineering alloys, Second Edition", Çeviri, Erdoğan, M., Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 2: 446-497 (2001).

13. Leyens, C., Peters, M., "Titanium and Titanium Alloys-Fundamentals and Applications", **WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA**, Almanya, 5-20, (2003).
14. Lacalle, L.N., Lopez de, P.J., Llorente, J.I., Sanchez, J.A., "Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys", **Journal of Materials Processing Technology**, 100: 1-11 (2000).
15. Tian, Y.S., Chen, C.Z., Chen, L.B., Chen, L.X., "Study on the microstructure and wear resistance of the composite coating fabricated on Ti-6Al-4V under different processing conditions", **Applied Surface Science**, 253: 1494-1499 (2006).
16. Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y., "An Overview of The Machinability of Aero-engine Alloys", **Journal of Materials Processing Technology**, 134: 233-253 (2003).
17. Ensarioğlu C., Çakır M.C., "Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü 1. Bölüm.", **Mühendis ve Makine**, Cilt: 46 Sayı: 546 (2005).
18. ASM Committee, "Introduction to Titanium and Its Alloys", **ASM Metals Handbook, ASM International, Metals Park**, Ohio, USA, 351-417 (1980).
19. Lütjering, G., Williams, J.C., Gysler, A., "Microstructure and Properties of Materials", J.C.M. Li, Editor, **World Scientific Publishing**, 1-25 (2000).
20. Lütjering, G., Williams, J.C., "Engineering Materials and Processes, 2nd edition", **Springer**, New York, 10-30 (2007).
21. Doyle, L.E., Kayser, C.A., Leach, J.L., Schrader, G.F., Singer, M.B., "Manufacturing Processes and Materials for Engineer, Third Edition", USA, 110-120 (1985).
22. Joshi, V.A., "Titanium Alloys", **Taylor & Francis**, London, 5-20 (2006).
23. Matthew, J., Donachie, Jr., "Titanium - A Technical Guide, 2nd edition", **ASM International**, ABD, 100-105 (2000).
24. Grujicic, M., Narayan, C.P., "A Study of $\beta \rightarrow \alpha$ Martensitic Transformation Volume Change in Ti-Al-V Alloys", **Materials Science and Engineering: A**, 151: 217-226 (1992).
25. Rhodes, C.G., Paton, N.E., "Formation Characteristics of the α/β Interface Phase in Ti-6Al-4V", **Metallurgical Transactions A**, 10: 209-216 (1979).
26. Taktak, Ş., "Plazmada Nitrülenmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Difüzyon Kinetiği ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", Doktora Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 5-10 (2002).

27. Boyer, R.R., Welsch, G., Collings, E.W., “Materials Properties Handbook: Titanium Alloys”, *ASM Int.*, Materials Park, OH, 465-480 (1994).
28. Wessel, J.K., “Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs”, *Wiley-Interscience publication*, Printed in the United States of America, 271-280 (2004).
29. Donachie, M.J., “Titanium: A Technical Guide”, *ASM International*, Metal Park, Ohio, (1989).
30. Karaduman, A., Meydanoğlu, O., Kayalı, E.S., Çimenoglu, H., “Geleneksel Toz Metalurjisi Yöntemi ile Titanyum Matrisli Titanyum Karbür Takviyeli Kompozit Üretimi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Karabük, Türkiye, (2009).
31. Niinomi, M., “Mechanical Properties of Biomedical Titanium Alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 243: 231-236 (1998).
32. Boyer, R.R., “An overview on the use of titanium in the aerospace industry”, *Materials Science and Engineering: A*, 213: 103-114 (1996).
33. Chen, W.C., Tsao, C.C., “Cutting performance of different coated twist drills”, *J Mater Process Technol.*, 88: 203-207 (1999).
34. Zhao, H., “Predictive models for forces, power and hole oversize in drilling operations”, *PhD thesis*, University of Melbourne, Australia, (1994).
35. Çakır, M.C., “Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri”, *Vipaş A.Ş.*, Bursa, 350-390 (2000).
36. Akkurt, M., “Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları”, *Birsen Yayınevi*, Ankara, (1998).
37. Şahin, Y., “Talaş Kaldırma Prensipleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 1: 97-98 (2000).
38. Sandvik Coromant, “Drilling Catalog”, (2010).
39. Demir, H., Ulaş, H.B., Zeyveli, M., “Talaşlı üretimde kullanılan kesme sıvılarından istenen özellikler”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Karabük, Türkiye, (2009).
40. Çakır, O., Yardımeden, A., Özben, T., Kılıçkap, E., “Selection of cutting fluids in machining processes”, *Journal of Achievements in materials and Manufacturing engineering*, 25, 2, (2007).

41. Yücel, E., Günay, M., Ayyıldız, M., Erkan, Ö., Kara, F., “Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının İnsan Sağlığına Etkileri Ve Sürdürülebilir Kullanımı”, **6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)**, Elazığ, Turkey, (2011).
42. Dal, M., “Bitkisel esaslı kesme sıvılarının frezelemedeki performanslarının araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, **GYTE.**, Kocaeli, (2009).
43. Suresh, N., Reddy, K.P., Rao, V., “Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling”, **International Journal of Machine Tools&Manufacture**, 46: 189-198 (2006).
44. Yildiz, Y., Gunay, M., Seker, U., “The Effect of the cutting fluid on surface roughness in boring of low carbon steel”, **Machining Science and Technology**, 11(4): 553-560 (2007).
45. Yalçın, B., Yılmaz, N., “Ark PVD Yüzey Kaplama Metoduyla Titanyum Nitrid (TiN) Kaplanmış Matkap Takımlarında Takım Aşınmasının Deneysel Olarak İncelenmesi”, **Mühendis ve Makine**, 531 (2004).
46. Avuncan, G., "Kesici Takımların Bilenmesi", **Mavi Tanıtım ve Pazarlama Ltd. Sti. Yayınları**, Gebze, 62-80 (1998).
47. Fuerst, J.D., “Cryotreatment”, Panacea or Black Magic, (1996).
48. Baldissera, P., Delprete, C., “Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel”, **Materials & Design**, 30: 1435-1440 (2009).
49. Liu, H., Wang, J., Yang, H., Shen, B., “Effects of cryogenic treatment on microstructure and abrasion resistance of CrMnB high-chromium cast iron subjected to subcritical treatment”, **Mater Sci Eng A**, 478: 324-328 (2008).
50. Baron, R.F., “Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance”, **Cryogenics**, 22 (8): 409-413 (1982).
51. Jordine, A., “Increased life of carburised race car gears by cryogenic treatment”, **Int J Fatigue**, 18 (6): 418 (1996).
52. Meng, F., Tagashira, K., Sohma, H., “Wear resistance and microstructure of cryogenic treated Fe-1.4Cr-1C bearing steel”, **Scripta Metall Mater**, 31 (7): 865-868 (1994).
53. Vinothkumar, T.S., Miglani, R., Lakshminarayanan, L., “Influence of deep dry cryogenic treatment on cutting efficiency and wear resistance of nickel- titanium rotary endodontic instruments”, **J Endod**, 33 (11): 1355-1358 (2007).

54. Anooshiravani, D., Svec, T., White, K., Powers, J., "Effects of cryogenic treatment on wear resistance of endodontic stainless steel files", *J Endod*, 25 (4): 282-313 (1999)
55. Bensely, A., Prabhakaran, A., Mohan Lal, D., Nagarajan G., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment", *Cryogenics*, 45: 747-754 (2006).
56. Mohan Lal, D., Renganarayanan, S., Kalanidhi, A., "Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels", *Cryogenics*, 41: 149-155, (2001).
57. Leskovšek, V., Ule, B., "Influence of deep cryogenic treatment on microstructure, mechanical properties and dimensional changes of vacuum heat-treated highspeed steel", *Heat Treat Met*, 3: 72-76 (2002).
58. Zhirafar, S., Rezaeian, A., Pugh, M., "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 186: 298-303 (2007).
59. Bensely, A., Venkatesh, S., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., Rajadurai, A., Junik, K., "Effect of cryogenic treatment on distribution of residual stress in case carburized En 353 steel", *Materials Science and Engineering, A*, 479: 229-235 (2008).
60. Kalia, S., "Cryogenic Processing: A Study of Materials at Low Temperatures", *J Low Temp Phys*, 158: 934-945 (2010).
61. Alava, L.A., "Multistage Cryogenic Treatment Of Materials: Process Fundamentals And Examples Of Application", *Cryobest International*, S.L. Vitoria, Spain.
62. Hogarth, S., "Cryogenics: a technology seeks legitimacy", *Manuf Eng.*, 124 (3): 132-146 (2000).
63. Baldissera, P., Delprete, C., "Deep cryogenic treatment: a bibliographic review", *Open Mech Eng J*, 2: 1-11 (2008).
64. Su, Y., He, N., Li, L., Li, X.L., "An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V", *Wear*, 261: 760-766 (2006).
65. Ginting, A., Nouari, M., "Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 758-768 (2006).

66. Wang, Z.G., Wong, Y.S., Rahman, M., “High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 105-114 (2005).
67. Nouari, M., Ginting, A., “Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy”, *Surface & Coatings Technology*, 200: 5663-5676 (2006).
68. Xu, J.H., Geng, G.S., “Experimental study on the milling of a Ti Beta 21S”, *Journal of Materials Processing Technology*, 129: 190-192 (2002).
69. Jawaid, A., Sharif, S., Koksai, S., “Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 99: 266-274 (2000).
70. Mantle, A.L., Aspinwall, D.K., “Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide”, *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 143-150 (2001).
71. Ensarioğlu, C., Çakır, M.C., “Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü 2. Bölüm”, *Mühendis ve Makine*, Cilt: 46 Sayı: 547 (2005).
72. Sun, J., Guo, Y.B., “A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 4036-4042 (2009).
73. Akyol, S., “Ti6Al4V titanyum alaşımlarının işlenebilirliğinin ısı işlem yardımıyla artırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2008).
74. Cantero, J.L., Tardío, M.M., Canteli, J.A., Marcos, M., Miguélez, M.H., “Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45: 1246-1255 (2005).
75. Dursun, M., “Titanyum ve Inconel 718 malzemelerinin frezelenmesinde takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2007).
76. Hong, S.Y., Ding, Y., “Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41: 1417-1437 (2001).
77. Yalçın, B., “Toz metalürjisi yöntemiyle imal edilen titanyum alaşımı implantların temel özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2007).

78. Sharif, S., Rahim, E.A., "Performance of coated and uncoated carbide tools when drilling titanium alloy-Ti-6Al4V", *Journal of Materials Processing Technology*, 185: 72-76 (2007).
79. Güven, A., Sınmazçelik, T., Günay, V., "Ti-6Al-4V alaşımlarında çentiklerde süperpozisyon etkisinin incelenmesi", *Proceedings of 8th International Fracture Conference*, İstanbul, 104-114 (2007).
80. Heinemann, R., Hinduja, S., Barrow, G., Petuelli, G., "Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46: 1-6 (2006).
81. Palanisamy, S., McDonald, S.D., Dargusch, M.S., "Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49: 739-743 (2009).
82. Nady, A.K., Gowrishanka, M.C., Paul, S., "Some studies on high-pressure cooling in turning of Ti-6Al-4V", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49: 182-198 (2009).
83. Arrazola, P.J., Garaya, A., Iriarte, L.M., Armendia, M., Marya, S., Maître, F.L., "Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 2223-2230 (2009).
84. Ezugwu, E.O., Da Silva, R.B., Bonney, J., Machado, A.R., "Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 1009-1114 (2005).
85. Wang, Z.G., Rahman, M., Wong, Y.S., "Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys", *Wear*, 258: 752-758 (2005).
86. Erdem, S., Aydın, K., "Gaz türbünlü uçak motorlarında titanyum alaşımlarının kullanımı", *Mühendis ve Makine*, 47: 44-53, (2006)
87. Venugopal, K.A., Paul, S., Chattopadhyay, A.B., "Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy", *Cryogenics*, 47: 12-18 (2007).
88. Hong, S.Y., Markus, I., Jeong, W.C., "New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41: 2245-2260 (2001).
89. Haşçalık, A., Çaydaş, U., Gürün, H., "Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining", *Materials and Design*, 28: 1953-1957 (2007).

90. Hong, S.Y., Ding, Y., Jeong, W.C., Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41: 2271-2285 (2001).
91. Zhu, L., Wang, J., "A Study on Titanium Alloys Deep-hole Drilling Technique", *Materials Science Forum*, 532-533: 945-948 (2006).
92. Zeilmann, R.P., Weingaertner, W.L., "Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant", *Journal of Material Processing Technology*, 179: 124-127 (2007).
93. Li, R., Albaert, J.S., "Spiral point temperature and stres in high-throughput drilling of titanium", *Internatioanl Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47: 2005-2017 (2007).
94. Ünal, E., Karaca, F., "Ti-6Al-4V alaşımının dik işlem merkezli cnc tezgahında işlenebilirliğinin araştırılması", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 135-139 (2007).
95. Firouzdor, V., Nejati, E., Khomamizadeh, F., "Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill", *Journal of Materials Processing Technology*, 206: 467-472 (2008).
96. Gill, S.S., Singh, R., Singh, H., Singh, J., "Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49: 256-260 (2009).
97. Sreerama Reddy, T.V., Sornakumar, T., VenkataramaReddy, M., Venkatram. R., "Machinability of C45 steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts", *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27: 181-185 (2009).
98. Akhbarizadeh, A., Shafyei, A., Golozar, M.A., "Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel", *Materials and Design*, 30: 3259-3264 (2009).
99. Yong, A.Y.L., Seah, K.H.W., Rahman, M., "Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide, tools in turning", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47: 754-759 (2006).
100. Yong, A.Y.L., Seah, K.H.W., Rahman, M., "Performance of cryogenically treated tungsten carbide tools in milling operations", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32: 638-643 (2007).
101. Gisip, J., Gazo, R., Stewart, H.A., "Effects of cryogenic treatment and refrigerated air on tool wear when machining medium density fiberboard", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 5117-5122 (2009).

102. Seah, K.H.W., Rahman, M., Yong, K.H., "Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide cutting tool inserts", *Journal of Engineering Manufacture*, 217: 29-43 (2003).
103. Darwin, J.D., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., "Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18% Cr martensitic stainless steel by Taguchi method", *Journal of Materials Processing Technology*, 195: 241-247 (2008).
104. Thakur, D., Ramamoorthy, B., Vijayaraghavan, L., "Influence of different post treatments on tungsten carbide-cobalt inserts", *Materials Letters*, 62: 4403-4406 (2008).
105. Harish, S., Bensely, A., Mohan Lal, D., Rajadurai, A., Lenkey, G.B., "Microstructural study of cryogenically treated En 31 bearing steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 3351-3357 (2009).
106. Preciado, M., Bravo, P.M., Alegre, J.M., "Effect of low temperature tempering prior cryogenic treatment on carburized steels", *Journal of Materials Processing Technology*, 176: 41-44 (2006).
107. Wang, J., Xiong, J., Fan, H., Yang, H.S., Liu H.H., Shen, B.L., "Effects of high temperature and cryogenic treatment on the microstructure and abrasion resistance of a high chromium cast iron", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 3236-3240 (2009).
108. Leskovšek, V., Kalin, M., Vižintin, J., "Influence of deep-cryogenic treatment on wear resistance of vacuum heat-treated HSS", *Vacuum*, 80: 507-518 (2006).
109. Das, D., Dutta, A.K., Ray, K.K., "Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel", *Cryogenics*, 49: 176-184 (2009).
110. Dhokey, N.B., Nirbhavne, S., "Dry sliding wear of cryotreated multiple tempered D-3 tool steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1484-1490 (2009).
111. Surberg, C.H., Stratton, P., Lingenhöle, K., "The effect of some heat treatment parameters on the dimensional stability of AISI D2", *Cryogenics*, 48: 42-47 (2008).
112. Liu, H.H., Wang, J., Yang, H.S., Shen, B.L., Gao, S.J., Huang, S.J., "Effect of Cryogenic Treatment on Property of 14Cr2Mn2V High Chromium Cast Iron Subjected to Subcritical Treatment", *Journal of Iron and Steel Research*, 13: 43-48 (2006).

113. Indumathi, J., Bijwe, J., Ghosh, A.K., Fahim, M., Krishnaraj N., “Wear of cryo-treated engineering polymers and composites”, *Wear*, 225-229: 343-353 (1999).
114. Bramipour, D., Svec, T.A., White, K.W., Powers, J.M., “Wear Resistance of Cryogenically Treated Stainless Steel Files”, *Journal of Endodontics*, 27: 212-213 (2001).
115. Bensely, A., Senthilkumar, D., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., Rajadurai, A., “Effect of cryogenic treatment on tensile behavior of case carburized steel-815M17”, *Materials Characterization*, 58: 485-491 (2007).
116. Xuan, F.Z., Huang, X., Tu, S.T., “Comparisons of 30Cr2Ni4MoV rotor steel with different treatments on corrosion resistance in high temperature water”, *Materials & Design*, 29: 1533-1539 (2008).
117. Bensely, A., Shyamala, L., Harish, S., Mohan Lal, D., Nagarajan, G., Junik, K., Rajadurai, A., “Fatigue behaviour and fracture mechanism of cryogenically treated En 353 steel”, *Materials & Design*, 30: 2955-2962 (2009).
118. Vadivel, K., Rudramoorthy, R., “Performance analysis of cryogenically treated coated carbide inserts”, *Int J Adv Manuf Technol.*, 42: 222-232 (2009).
119. Harold A.S., “Cryogenic treatment of tungsten carbide reduces tool wear when machining medium density fiberboard”, *International Journal of Applied Engineering Research*, 54, 53-56 (2008).
120. Poomani, A., Mohan, B., Senthilkumar, A., Rajadurai, A., Sornakumar T., “Effectiveness of Cryogenic treatment on the Performance of Cermet Cutting Tool While Machining AISI 4340 Steel”, *International Journal of Materials Sciences*, 4 (3): 215-228 (2009).
121. Sreerama, R., Sorna, K., Venkatarama, R., Ajaykumar, B.S., Venkatram, R., “Performance studies of deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts on machining steel”, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 2: 92-98 (2008).
122. Ramji, B.R., Narasimha Murthy, H.N., Krishna, M., “Performance study of cryo treated HSS drills in drilling cast iron”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2: 2530-2536 (2010).
123. Yong, J., Ding, C., “Effect of cryogenic treatment on WC–Co cemented carbides”, *Materials Science and Engineering A*, 528: 1735-1739 (2010).
124. Ramji, B.R., Narasimha Murthy, H.N., Krishna, M., “Analysis of forces, roughness, wear and temperature in turning cast iron using cryotreated carbide

- inserts” *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2: 2521-2529 (2010).
125. Koneshlou, M., Asl, K.M., Khomamizadeh, F., “Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure, Mechanical and Wear Behaviors of AISI H13 Hot Work Tool Steel”, *Cryogenics*, 51: 55-61 (2010).
 126. Gill, S.S., Singh, J., Singh, H., Singh, R., “Investigation on wear behaviour of cryogenically treated TiAlN coated tungsten carbide inserts in turning”, *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, 51: 25-33 (2011).
 127. Baldissera, P., “Fatigue scatter reduction through deep cryogenic treatment on the 18NiCrMo5 carburized steel”, *Materials & Design*, 30: 3636-3642 (2009).
 128. Internet: Titanium Metals Corporation, “TIMETAL_6-4_Properties” http://www.timet.com/images/document/technicalmanuals/TIMETAL_6-4_Properties.pdf (2012).
 129. Rahim, E.A., Sharif, S., “Investigation on tool life and surface integrity when drilling Ti-6Al-4V and Ti-5Al-4V-Mo/Fe”, *JSME International Journal*, Series C, 49: 340-345 (2006).
 130. Guhring, *Drilling Catalog*, (2010).
 131. Aptodry, Brite-Euram-Projekt, JRC, Ispra, Italy.
 132. Michael, F., Kahles, J.F., Koster W.P., ASM Handbook: “Surface finish and surface integrity”, *American Society for Metals*, 3: 468-475 (1989).
 133. Internet: Mahr Federal Inc., “Four methods of measuring out-of-roundness” <http://www.mahr.com/index.php?NodeID=13616> (2009).
 134. Mohammed, T.H., “Hole quality in deep hole drilling”, *Materials and Manufacturing Processes*, 16 (2): 147-164 (2001).
 135. Mohan, S., Shan, H.S., “Analysis of Roundness Error and Surface Roughness in the Electro Jet Drilling Process”, *Materials and Manufacturing Processes*, 21: 1-9 (2006).
 136. Dong, Y., Lin, X., Xiao, H., “Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechanism”, *Heat Treatment of Metals*, 3: 55-59 (1998).
 137. Sreerama Reddy, T.V., Sornakumar, T., Venkatarama Reddy, M., Venkatram, R., Senthilkumar, A., Turning studies of deep cryogenic treated P-40 tungsten carbide cutting tool inserts-technical communication”, *Machining Science and Technology*, 13: 269–281 (2009).

138. Gill, S.S., Singh, J., Singh, H., Singh, R., “Metallurgical and mechanical characteristics of cryogenically treated tungsten carbide (WC-Co)”, *Int J Adv Manuf Technol.*, Article in press.
139. Tayanç, M., Zeytin, G., “Yüksek hız çeliklerinin iç yapı ve ısıtıl işlem özellikleri” *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2 (1): 103-122 (2000).
140. Gimenez, S., Iturriza, I., Microstructural charcterisation of PM M35MHV as a function of the processing route, *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144: 555-560 (2003).
141. Uygur, I., “Microstructure and wear properties of AISI 1038H steel weldments”, *Industrial Lubrication and Tribology*, 58: 303-311 (2006).
142. ASTM (2000) ASTM B657-92: standard method for metallographic determination of microstructure in cemented carbides. In: ASTM Annual book of ASTM standards. ASTM, Philadelphia, 02.05: 387–392 (1992).
143. Bryson, W.E., Cryogenics. Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 81–107 (1999).
144. Gündoğdu, H.E., “Kesme sıvılı ve kuru talaşlı işlemenin iş parçası ve kesici takım üzerindeki etkiler”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2006).
145. Li, R., Hedge, P., Shih, A.J., “High-throughput drilling of titanium alloys”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (1): 63-74 (2007).
146. Sreerama Reddy, T.V., Sornakumar, T., Venkatarama Reddy, M., Venkatram, R., “Effect of cryogenic treatment of tungsten carbide cutting tool on machining temperature”, *International Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(1): 85–94 (2008).
147. Sreerama Reddy, T.V., Sornakumar, T., Venkatarama Reddy, M., Venkatram, R., “Machining performance of low temperature treated P-30 tungsten carbide cutting tool inserts”, *Cryogenics*, 48: 458–461 (2008).
148. Çiftçi, İ., “Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 20, No 2, 205-209 (2005).
149. Liu, G., He, N., Man, Z.L., Li, L., “Cutting Force in the Milling of Inconel 728”, *Key Engineering Material*, 259-260: 824-828 (2004).

150. Kim, D., Ramulu, M., “Cutting and drilling characteristics of hybrid titanium composite laminate (HTCL)”, *In Proceedings of Materials and Processing Technologies for Revolutionary Applications Fall Technical Conference*, 1-8 (2005a).
151. Kim, D., Ramulu, M., Pedersen, W., “Machinability of titanium/graphite hybrid composites in drilling”, *Transactions of NAMRI/SME*, 33: 445-452 (2005).
152. Ramulu, M., Branson, T., Kim, D., “A study on the drilling of composite and titanium stacks”, *Composite Structures*, 54 (1): 67-77 (2001).
153. Braic, V., Zotia, C.N., Balaceanu, M., Kiss, A., Vladescu, A., Popescu, A., Braic, M., “TiAlN/TiAlZrN multilayered hard coatings for enhanced performance of HSS drilling tools”, *Surface & Coatings Technology*, Cilt 204, 1925-1928 (2010).
154. Anonymous, “Tips for aerospace machining”, *Manufacturing Engineering*, 110 (3): 67-69 (1993).
155. Özcatalbaş, Y., Ercan, F., “The Effects of Heat Treatment on The Machinability of Mild Steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, 136/1-3: 227-238 (2003).
156. Çiçek, A., Kivak, T., Uygur, İ., Ekici, E., Turgut, Y., “Performance of cryogenically treated M35 HSS drills in drilling of austenitic stainless steels”, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Article in press.
157. Trent, E.M., “Metal cutting”, *Butterworths Press*, London, 1-171 (1989).
158. Williams, J.E., Smart, E.F., Milner, D.R., “The Metallurgy of Machining- Part 2”, *Metallurgia*, February, 51-60 (1970).
159. Lambert, B.K., “Prediction of force, torque and burr length in drilling titanium -composite materials”, *SME Technical Paper*, MR79-363 (1979a).
160. Rao, C.S.P., Murty, R.L., Raja, G.L.G., “Drilling of titanium clad steel plate”, *Journal of the Institution of Engineers (India)*, Part PR: Production Engineering Division, 71 (1): 1-3 (1990).
161. Asiltürk, I., Çunkas, M., “Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method”, *Expert Systems with Applications*, 38: 5826–5832 (2011).
162. Singh, P.D., Rao, V., “A surface roughness prediction model for hard turning process”, *Int J Adv Manuf Technol*, 32: 1115-1124 (2007).

163. Kikuchi, M., “The use of cutting temperature to evaluate the machinability of titanium alloys”, *Acta Biomaterialia*, 5: 770–775 (2009).
164. Sandvik Coromant, “Modern Metal Cutting”, *Sandvikens Tryckeri*, Sweden, 43-47 (2008).
165. Basile, S.A., “Modeling transverse motions of a drill bit for process understanding”, *Precis Eng*, 15: 258-265 (1993).
166. Kurt, M., Kaynak, Y., Bagci, E., “Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy”, *Int J Adv Manuf Technol*, 37: 1051-1060 (2008).
167. Bono, M., Ni, J., “The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes”, *Int J Mach Tools Manuf*, 41: 2261-2270 (2001).
168. Motorcu A.R., “Nikel esaslı süperalaşımların ve titanyum alaşımlarının İşlenebilirliği, 1. Bölüm: Sinterlenmiş karbür takımların performanslarının değerlendirilmesi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25 (1-2): 302-330 (2009).
169. Srivastava, A.K., Iverson, J., “An Experimental Investigation Into The High Speed Turning Of Ti-6Al-4VTitanium Alloy”, *Proceedings of the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2010*, Erie, Pennsylvania, USA, (2010).
170. Kıvak, T., Habalı, K., Şeker, U., “Investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness and chip formation in drilling of Inconel 718 super alloy”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (2): 293-298 (2010).
171. Yong-qiang, W., Chun-wei, L., Chun-zhi, G., Xiu-bo, T., Shi-in, Y., “Microstructure and mechanical properties of TiN/TiAlN multilayer coatings deposited by arc ion plating with separate targets”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21: 1068–1073 (2011).
172. Dhar, N.R, Paul, S., Chattopadhyay, A.B., “Machining of AISI 4140 steel undercryogenic cooling-tool wear, surface roughness and dimensional deviation”, *J. Mater Process Tech*, 123: 483–489 (2002).

EKLER

EK-1 Deneylerde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımına ait malzeme sertifikası

QUALITY CERTIFICATE

EN10204-3.1

证书编号 (Certificate): CX00100720-2

合同号 Contract No. / 牌号 Product Name: Titanium block

批号 Lot No. PS100911-1

锭号 Heat No. CXDS105-12

数量 Quantity (pc) 8

规格 Size (mm) 8.15×80×100

净重 (kg) Net Weight 4.28

技术条件 Specification ASTM B365

箱号 Case No. /

室温力学性能 (Tensile Test)	试样状态 Sample Condition	σ_s Tensile Strength (M Pa)	$\sigma_{0.2}$ Yield Strength 0.2% (M Pa)	δ_5 Elongation [%]	ψ Reduction of area [%]	a_k [J/cm ²]	HB(d) [mm]	弯曲实验 Bend test	低倍组织 Macrostructure	高倍组织 Microstructure
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
其他 *Others	外形尺寸 Dimensional Inspection	表面质量 Visual Inspection	探伤检验 Ultrasonic Inspection	高倍评级 Microstructure grade	/	/	/	/	/	/
部位 Location	pass	pass	pass	/	/	/	/	/	/	/

化学成分 (%) Chemical Composition

Ti	AL	V	Mg	Pd	Zn	S	Si	Fe	C	N	H	O	其他元素 (others)
基 Remainder	5.9	4.0	/	/	/	/	/	0.09	0.01	0.01	0.002	0.14	单个 (Each) : /
中 Middle	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	总和 (Total) : /
下 Bottom	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

备注 Note: 21/9/2014/3/2010 Tarih ve 84680284663 Nolu Fatura muhteviyatının Sertifikasıdır.

经办人 (Inspector): 李 东

审核 (Auditor): 李 东

2010年09月19日 (Date)

检测单位: 检测单位

TIMET

EK-2 Deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Çizelge 1.1. HSS takımlarla yapılan delme deneylerinde deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Deney No	Kesme Şartı	Kesici Takım	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Eksenel Kuvvet (N)	Moment (Ncm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Delik Çapı (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Silindiriklikten Sapma (mm)
1	Kuru Kesme	Kaplamaşız M42 HSS	0,04	6	237	111	1,53	5,043	0,0071	0,044
2				8	221	104	1,45	5,041	0,0061	0,040
3				10	191	81	1,32	5,049	0,0066	0,048
4				12	196	88	1,28	5,052	0,0069	0,049
5			0,05	6	245	138	1,73	5,050	0,0076	0,052
6				8	234	104	1,45	5,045	0,0072	0,050
7				10	229	101	1,33	5,061	0,0066	0,058
8				12	235	113	1,19	5,069	0,0078	0,061
9			0,06	6	301	175	1,95	5,056	0,0080	0,057
10				8	261	155	1,82	5,054	0,0083	0,059
11				10	256	129	1,57	5,066	0,0083	0,057
12				12	273	153	1,81	5,076	0,0084	0,068
13	Kuru Kesme	TiAlN/TiN Kaplı M42 HSS	0,04	6	219	93	1,47	5,038	0,0066	0,036
14				8	197	90	1,14	5,036	0,0060	0,043
15				10	174	71	1,14	5,040	0,0060	0,045
16				12	169	70	1,18	5,047	0,0065	0,047
17			0,05	6	231	111	1,52	5,041	0,0070	0,046
18				8	210	90	1,36	5,039	0,0066	0,048
19				10	206	85	1,23	5,046	0,0069	0,051
20				12	203	99	1,32	5,058	0,0073	0,056
21			0,06	6	257	147	1,9	5,049	0,0075	0,050
22				8	244	128	1,52	5,061	0,0077	0,053
23				10	233	118	1,47	5,059	0,0077	0,060
24				12	247	143	1,6	5,068	0,0081	0,062

EK-2 (Devam) Deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Çizelge 1.1. (Devam) HSS takımlarla yapılan delme deneylerinde deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Deney No	Kesme Şartı	Kesici Takım	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Eksenel Kuvvet (N)	Moment (Ncm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Delik Çapı (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Silindiriklikten Sapma (mm)
25	Kuru Kesme	Kriyojenik İşlem Uygulanmış M42 HSS	0,04	15	225	103	1,62	5,040	0,0070	0,041
26				20	205	99	1,32	5,040	0,0062	0,042
27				25	199	85	1,26	5,045	0,0065	0,047
28				30	184	83	1,24	5,050	0,0068	0,049
29			0,06	15	243	129	1,65	5,044	0,0074	0,050
30				20	228	105	1,40	5,046	0,0069	0,052
31				25	226	93	1,28	5,054	0,0068	0,055
32				30	216	101	1,20	5,067	0,0072	0,059
33			0,08	15	281	169	1,94	5,054	0,0079	0,055
34				20	256	148	1,68	5,056	0,0081	0,055
35				25	242	133	1,58	5,062	0,0082	0,058
36				30	262	148	1,65	5,074	0,0082	0,065
37	Kuru Kesme	Kriyojenik+Temper İşlemi Uygulanmış M42 HSS	0,04	15	214	103	1,50	5,039	0,0068	0,038
38				20	203	94	1,21	5,037	0,0061	0,042
39				25	184	85	1,24	5,045	0,0063	0,044
40				30	178	79	1,22	5,046	0,0064	0,049
41			0,06	15	242	125	1,52	5,046	0,0072	0,049
42				20	220	99	1,39	5,042	0,0068	0,048
43				25	213	98	1,19	5,053	0,0067	0,053
44				30	209	98	1,20	5,059	0,0069	0,057
45			0,08	15	271	161	1,91	5,053	0,0079	0,053
46				20	251	146	1,62	5,056	0,0079	0,055
47				25	248	127	1,52	5,061	0,0081	0,056
48				30	249	136	1,60	5,071	0,0081	0,063

EK-2 (Devam) Deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Çizelge 1.1. (Devam) HSS takımlarla yapılan delme deneylerinde deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Deney No	Kesme Şartı	Kesici Takım	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Eksenel Kuvvet (N)	Moment (Ncm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Delik Çapı (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Silindiriklikten Sapma (mm)
49	Islak Kesme	Kaplamaşız M42 HSS	0,04	6	253	130	1,08	5,021	0,0055	0,031
50				8	227	110	0,91	5,026	0,0051	0,038
51				10	218	103	0,83	5,022	0,0053	0,040
52				12	200	101	0,89	5,027	0,0055	0,038
53			0,05	6	276	145	1,17	5,027	0,0054	0,041
54				8	249	114	1,11	5,026	0,0053	0,042
55				10	244	112	0,98	5,029	0,0059	0,043
56				12	243	117	1,02	5,034	0,0061	0,048
57			0,06	6	320	198	1,4	5,033	0,0063	0,046
58				8	288	163	1,16	5,028	0,0062	0,042
59				10	282	151	1,07	5,038	0,0070	0,052
60				12	280	163	1,26	5,042	0,0069	0,056
61	Islak Kesme	TiAlN/TiN Kaplı M42 HSS	0,04	6	229	103	0,99	5,016	0,0051	0,027
62				8	216	97	0,75	5,017	0,0048	0,029
63				10	185	87	0,83	5,016	0,0046	0,036
64				12	185	82	0,66	5,019	0,0052	0,036
65			0,05	6	266	122	1,08	5,018	0,0048	0,037
66				8	226	103	0,93	5,018	0,0052	0,036
67				10	223	95	0,86	5,024	0,0051	0,045
68				12	218	103	0,93	5,022	0,0059	0,040
69			0,06	6	283	170	1,15	5,025	0,0063	0,039
70				8	268	137	1,09	5,026	0,0056	0,045
71				10	265	133	0,95	5,033	0,0058	0,045
72				12	259	136	1,06	5,038	0,0066	0,052

EK-2 (Devam) Deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Çizelge 1.1. (Devam) HSS takımlarla yapılan delme deneylerinde deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Deney No	Kesme Şartı	Kesici Takım	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Eksenel Kuvvet (N)	Moment (Ncm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Delik Çapı (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Silindiriklikten Sapma (mm)
73	Islak Kesme	Kriyojenik İşlem Uygulanmış M42 HSS	0,04	15	243	129	1,02	5,023	0,0055	0,029
74				20	223	108	0,85	5,021	0,0052	0,035
75				25	211	98	0,75	5,023	0,0051	0,037
76				30	201	100	0,83	5,024	0,0053	0,040
77			0,06	15	263	135	1,10	5,024	0,0055	0,040
78				20	247	118	1,00	5,024	0,0052	0,041
79				25	239	107	0,93	5,027	0,0056	0,041
80				30	233	112	1,04	5,028	0,0061	0,047
81			0,08	15	301	188	1,28	5,030	0,0064	0,045
82				20	283	162	1,12	5,031	0,0061	0,045
83				25	288	147	1,04	5,035	0,0064	0,051
84				30	274	150	1,13	5,040	0,0069	0,052
85	Islak Kesme	Kriyojenik+Temper İşlemi Uygulanmış M42 HSS	0,04	15	229	125	0,98	5,019	0,0053	0,028
86				20	224	101	0,84	5,021	0,0049	0,032
87				25	198	92	0,76	5,019	0,0049	0,037
88				30	190	100	0,76	5,023	0,0054	0,039
89			0,06	15	260	134	1,11	5,023	0,0052	0,039
90				20	236	108	0,92	5,020	0,0051	0,038
91				25	222	103	0,95	5,027	0,0053	0,041
92				30	237	102	0,94	5,027	0,0057	0,044
93			0,08	15	303	179	1,23	5,028	0,0062	0,042
94				20	274	156	1,12	5,028	0,0060	0,044
95				25	277	145	1,00	5,030	0,0063	0,047
96				30	256	145	1,07	5,035	0,0064	0,050

EK-2 (Devam) Deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Çizelge 1.2. Tungsten karbür takımlarla yapılan delme deneylerinde deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Deney No	Kesme Şartı	Kesici Takım	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Eksenel Kuvvet (N)	Moment (Ncm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Delik Çapı (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Silindiriklikten Sapma (mm)
1	Kuru Kesme	Kaplamaşız Karbür	0,04	15	217	64	1,24	5,036	0,0050	0,058
2				20	196	60	1,13	5,039	0,0044	0,058
3				25	194	51	1,14	5,035	0,0051	0,064
4				30	186	56	1	5,040	0,0048	0,067
5			0,06	15	245	82	1,37	5,046	0,0055	0,061
6				20	227	76	1,23	5,046	0,0048	0,061
7				25	233	73	1,2	5,048	0,0054	0,063
8				30	226	85	1,25	5,045	0,0056	0,069
9			0,08	15	267	97	1,6	5,049	0,0063	0,066
10				20	255	94	1,48	5,048	0,0059	0,068
11				25	247	86	1,38	5,045	0,0064	0,07
12				30	255	105	1,4	5,056	0,0067	0,077
13	Kuru Kesme	TiAlN/TiN Kaplı Karbür	0,04	15	223	86	1,13	5,032	0,0044	0,052
14				20	201	72	1,07	5,032	0,0048	0,054
15				25	197	69	0,97	5,036	0,0045	0,056
16				30	195	65	0,94	5,035	0,0052	0,066
17			0,06	15	257	105	1,26	5,042	0,0048	0,057
18				20	246	95	1,2	5,039	0,0046	0,055
19				25	243	92	1,08	5,041	0,0058	0,062
20				30	224	100	1,14	5,043	0,0054	0,062
21			0,08	15	285	123	1,62	5,048	0,0053	0,062
22				20	267	109	1,26	5,044	0,0063	0,062
23				25	260	110	1,25	5,048	0,0059	0,068
24				30	237	115	1,28	5,051	0,0061	0,073

EK-2 (Devam) Deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Çizelge 1.2. (Devam) Tungsten karbür takımlarla yapılan delme deneylerinde deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Deney No	Kesme Şartı	Kesici Takım	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Eksenel Kuvvet (N)	Moment (Ncm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Delik Çapı (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Silindiriklikten Sapma (mm)
25	Kuru Kesme	Kriyojenik İşlem Uygulanmış Karbür	0,04	15	212	64	1,22	5,034	0,0049	0,059
26				20	187	55	1,09	5,035	0,0046	0,057
27				25	182	55	1,04	5,036	0,0047	0,062
28				30	178	53	1,00	5,038	0,0051	0,064
29			0,06	15	235	80	1,33	5,045	0,0053	0,060
30				20	228	74	1,23	5,044	0,0050	0,060
31				25	222	72	1,17	5,046	0,0052	0,063
32				30	221	77	1,23	5,046	0,0057	0,066
33			0,08	15	252	94	1,52	5,048	0,0062	0,065
34				20	251	92	1,38	5,048	0,0061	0,066
35				25	242	89	1,33	5,046	0,0060	0,071
36				30	245	97	1,33	5,051	0,0065	0,073
37	Kuru Kesme	Kriyojenik+Temper İşlemi Uygulanmış Karbür	0,04	15	202	55	1,17	5,033	0,0047	0,057
38				20	186	56	1,07	5,035	0,0047	0,057
39				25	177	48	1,03	5,036	0,0049	0,061
40				30	173	55	0,97	5,037	0,0047	0,067
41			0,06	15	233	79	1,31	5,044	0,0048	0,059
42				20	220	71	1,20	5,042	0,0048	0,059
43				25	220	70	1,16	5,043	0,0052	0,062
44				30	212	76	1,19	5,045	0,0054	0,066
45			0,08	15	252	97	1,44	5,048	0,0059	0,065
46				20	239	90	1,37	5,047	0,0060	0,066
47				25	239	85	1,27	5,047	0,0060	0,071
48				30	234	99	1,31	5,049	0,0066	0,072

EK-2 (Devam) Deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Çizelge 1.2. (Devam) Tungsten karbür takımlarla yapılan delme deneylerinde deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Deney No	Kesme Şartı	Kesici Takım	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Eksenel Kuvvet (N)	Moment (Ncm)	Yüzey Pürüzlülüğü (μ m)	Delik Çapı (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Silindiriklikten Sapma (mm)
49	Islak Kesme	Kaplama-sız Karbür	0,04	15	251	74	0,9	5,017	0,0035	0,046
50				20	217	61	0,77	5,015	0,0034	0,051
51				25	214	57	0,84	5,018	0,0036	0,05
52				30	217	55	0,75	5,019	0,0045	0,06
53			0,06	15	278	92	1,02	5,018	0,0040	0,051
54				20	260	84	0,9	5,018	0,0045	0,05
55				25	269	77	0,73	5,027	0,0044	0,056
56				30	240	84	0,92	5,019	0,0048	0,058
57			0,08	15	310	105	1,15	5,023	0,0054	0,056
58				20	298	98	0,92	5,024	0,0046	0,061
59				25	286	91	0,92	5,026	0,0056	0,058
60				30	264	92	0,85	5,031	0,0060	0,066
61	Islak Kesme	TiAlN/TiN Kaplı Karbür	0,04	15	253	78	0,75	5,013	0,0028	0,042
62				20	243	68	0,66	5,010	0,0031	0,045
63				25	225	64	0,6	5,014	0,0040	0,051
64				30	233	68	0,6	5,015	0,0040	0,055
65			0,06	15	304	97	0,92	5,017	0,0036	0,046
66				20	300	80	0,78	5,014	0,0038	0,048
67				25	274	84	0,81	5,018	0,0045	0,048
68				30	258	97	0,77	5,021	0,0041	0,055
69			0,08	15	328	115	0,98	5,020	0,0043	0,054
70				20	320	107	0,9	5,024	0,0045	0,054
71				25	310	99	0,85	5,023	0,0051	0,058
72				30	288	120	0,79	5,027	0,0047	0,06

EK-2 (Devam) Deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Çizelge 1.2. (Devam) Tungsten karbür takımlarla yapılan delme deneylerinde deney girdilerine bağı olarak elde edilen deney çıktıların ortalamları

Deney No	Kesme Şartı	Kesici Takım	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Eksenel Kuvvet (N)	Moment (Ncm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Delik Çapı (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Silindiriklikten Sapma (mm)
73	Islak Kesme	Kriyojenik İşlem Uygulanmış Karbür	0,04	15	237	72	0,87	5,016	0,0033	0,044
74				20	216	59	0,73	5,013	0,0034	0,048
75				25	202	56	0,73	5,017	0,0039	0,052
76				30	204	49	0,68	5,021	0,0044	0,058
77			0,06	15	285	92	0,97	5,018	0,0038	0,049
78				20	253	81	0,85	5,017	0,0044	0,051
79				25	251	76	0,81	5,022	0,0045	0,052
80				30	234	78	0,85	5,021	0,0046	0,057
81			0,08	15	298	109	1,07	5,025	0,0047	0,055
82				20	283	93	0,96	5,024	0,0047	0,058
83				25	280	86	0,88	5,025	0,0054	0,060
84				30	272	90	0,85	5,029	0,0057	0,064
85	Islak Kesme	Kriyojenik+Temper İşlemi Uygulanmış Karbür	0,04	15	240	67	0,80	5,015	0,0030	0,046
86				20	206	59	0,70	5,013	0,0033	0,046
87				25	199	51	0,65	5,016	0,0037	0,050
88				30	191	52	0,70	5,017	0,0042	0,062
89			0,06	15	264	87	0,89	5,018	0,0040	0,049
90				20	252	78	0,84	5,016	0,0041	0,049
91				25	238	76	0,76	5,021	0,0044	0,053
92				30	230	72	0,79	5,019	0,0045	0,055
93			0,08	15	289	101	1,05	5,022	0,0048	0,057
94				20	284	92	0,91	5,023	0,0044	0,057
95				25	272	89	0,85	5,025	0,0054	0,059
96				30	269	86	0,83	5,027	0,0054	0,062

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KIVAK, Turgay
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 23.10.1983/Eskişehir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (506) 256 57 08
 e-mail : turgaykivak@duzce.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Bölümü	2008
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Bölümü	2005
Lise	Eskişehir Atatürk End. Mes. Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-	Düzce Üniversitesi Cumayeri MYO	Öğretim Görevlisi (Müdür Yrd.)
2006-2008	Gazi Üniversitesi Atatürk MYO	Öğretim Görevlisi (Dışarıdan Görevlendirme)
2006-2007	Gazi Üniversitesi TÜBİTAK Projesi	Proje Asistanı
2005-2006	Efor Makine Sanayi ve Dış Tic. Ltd. Şti.	Tasarım ve Ürün Geliştirme Sorumlusu

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler :

A1. Çiçek, A., **Kıvak, T.**, Uygur, İ., Ekici, E., Turgut, Y., “Performance of cryogenically treated M35 HSS drills in drilling of austenitic stainless steels”, Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-011-3616-8.

A2. Çiçek, A., **Kıvak, T.**, Samtaş, G., “Application of Taguchi Method for Surface Roughness and Roundness Error in Drilling of AISI 316 Stainless Steel”, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Article in press 2012.

A3. **Kıvak, T.**, Habalı, K., Şeker, U., “Investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness and chip formation in drilling of Inconel 718 super alloy”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (2), 293-298, 2010.

B. Engineering Index :

B1. **Kıvak, T.**, Habalı, K., Şeker, U., “The effect of cutting paramaters on the hole quality and tool wear during the drilling of Inconel 718”, Gazi University Journal of Science, Article in press 2012.

C. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler :

C1. Çiçek, A., Ekici, E., Uygur, İ., Akıncıoğlu, S., **Kıvak, T.**, “AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Delinmesinde Derin Kriyojenik İşlemin Takım Ömrü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması”, SDÜ Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, Basımda 2012.

D. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler :

D1. **Kıvak, T.**, Çiçek, A., Turgut, Y., Uygur, İ., Ekici, E., “Paslanmaz çeliğin delinmesinde Nano kaplamaların kesme kuvveti, delik çapı ve takım ömrü üzerindeki etkileri”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ, Türkiye.

D2. Çiçek, A., **Kıvak, T.**, Turgut, Y., Uygur, İ., Ekici, E., “Derin kriyojenik işlemin kesme kuvveti ve delik çapları üzerine etkileri”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ, Türkiye.

D3. Turgut, Y., Çiçek, A., **Kıvak, T.**, Uygur, İ., Ekici, E., “Çok katlı kaplamaların AISI 304 paslanmaz çeliğin işlenebilirliği üzerindeki etkileri”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ, Türkiye.

D4. Kıvak, T., Habalı, K., “Inconel 718’in delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisinin araştırılması”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.

Projeler

1. AISI H13 Sıcak İş Takım Çeliğinin İşlenmesinde Kriyojenik İşlemin Yüzey Kalitesi ve Takım Ömrü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Düzce Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), **Yardımcı Araştırmacı**, 2011-devam ediyor.
2. Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti-6Al-4V Alaşımının Delinebilirliği Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), 07/2010-38, **Araştırmacı**, 2010- 2011.
3. AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Kriyojenik Proses Uygulanmış Kesici Takımlar ile Delinebilirliğinin Araştırılması, Düzce Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), 2009.03.02.030, **Yardımcı Araştırmacı**, 2009-2010.
4. Inconel 718’in Delinebilirliğinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), 07/2007-41, **Araştırmacı**, 2007-2008.

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Balık tutma, Yüzme, Futbol, Masa tenisi, Satranç